

Schlussbericht

zum Vorhaben

**Optimierung der Brandbekämpfungsmethoden und -techniken für
Gebäude in moderner Holzbauweise**

H_oBraT_ec

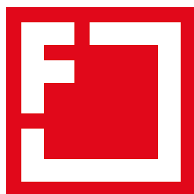
Teilvorhaben 2

**Validierung von Einsatzmitteln der Feuerwehr zur Brandbekämpfung von
Konstruktions- und Hohlraumbränden im Holzbau (FKZ: 13N15747)**



Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Abteilung Forschung
Biederitzer Straße 5
39175 Biederitz

Projektpartner



Teilvorhaben 1 (Projektleitung):

Freie und Hansestadt Hamburg
Behörde für Inneres und Sport – Amt für Feuerwehr
FLSt34 Forschungsprojekt HOBRATEC
Westphalenweg 1
20099 Hamburg



Teilvorhaben 3:

Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Breitscheidstraße 2
39114 Magdeburg

Laufzeit:

01.07.2021 bis 30.03.2024

GEFÖRDERT VOM

Monat der Erstellung:

09/2024



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 13N15747 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Autoren

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge
Abteilung Forschung

Dr.-Ing. Sebastian Wegner

Dr.-Ing. Daniel Butscher

Dr.-Ing. Michael Neske

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

Inhalt

1	Erzielte Ergebnisse	2
1.1	Arbeitspaket 1: Analyse der Brandbekämpfungsstrategien international und national, Übertragung der Erkenntnisse auf die Freie und Hansestadt Hamburg	2
1.1.1	Eigenschaften von Hohlraumbränden	2
1.1.2	Bewertung von Einsatzmitteln zur Detektion von Hohlraumbränden	3
1.1.3	Einsatzmittel zur Bekämpfung von Hohlraumbränden	3
1.2	Arbeitspaket 2: Experimentelle und numerische Untersuchung des Einflusses von Brandfläche, Ventilation und Konstruktionsweise auf den Brandverlauf.....	6
1.2.1	Brandversuche am Bauteilofen.....	6
1.2.2	Konzeption eines Brandcontainers	16
1.3	Arbeitspaket 3: Experimentelle Untersuchung und Optimierung geeigneter Löschtechnik und –taktik unter Zuhilfenahme von Einsatzmitteln, wie Wärmebildkameras.....	18
1.3.1	Brandversuche im Brandcontainer	18
1.3.2	Untersuchung zur Wurfhöhe unterschiedlicher Strahlrohre.....	20
1.3.3	CO-Permeation durch Dampfsperren	21
1.3.4	CO-Ausbreitung in Holzrahmenbauteilen	21
1.4	Arbeitspaket 4: Ermittlung von charakteristischen Kenngrößen bei der Anwendung geeigneter Löschmittel und -techniken im Realmaßstab	22
1.4.1	Versuche im Realmaßstab	22
1.5	Arbeitspaket 5: Erarbeitung von Ausbildungsmaterialien für Feuerweherschulen und praktische Ausbildungsinhalte sowie Einsatzhilfsmittel.....	27
1.6	Arbeitspaket 6: Publikation und Praxistransfer.....	30
1.7	Literaturverzeichnis	31
1.8	Abkürzungsverzeichnis.....	31
1.9	Abbildungsverzeichnis.....	32
1.10	Tabellenverzeichnis	32
2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	33
3	Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit	34
4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	34
5	Erkenntnisse von Dritten	34
6	Veröffentlichungen.....	34

1 Erzielte Ergebnisse

1.1 Arbeitspaket 1: Analyse der Brandbekämpfungsstrategien international und national, Übertragung der Erkenntnisse auf die Freie und Hansestadt Hamburg

Seitens des IBK wurde im Arbeitspaket 1 (AP 1) federführend das Teilarbeitspaket 1.3 bearbeitet.

Arbeitspaket 1.3: Zusammenstellung von Eigenschaften von Hohlraumbränden zur Validierung von Einsatzhilfsmitteln zur Detektion dieser Brände und Löschmitteln zur Brandbekämpfung

Ziele:

- Korrelation zwischen Löschwirkung der verschiedenen Löschmittel und Einsatztechnik in den Konstruktionen mit den Daten der Wärmebildkamera in Abhängigkeit der Löschvorgehensweise (Dauer, Menge an Löschmittel, kontinuierlich oder intermittierend)
- Bewertung der verschiedenen Löschmittel bezüglich Löschwirkung und Handhabung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Wandkonstruktionen und Dämmmaterialien
- Skalierungseinflüsse im Hinblick auf die Brandversuche aus AP 2

1.1.1 Eigenschaften von Hohlraumbränden

Bleiben Hohlraumbrände unentdeckt, können sie sich unbemerkt ausbreiten, die Struktur schädigen und bei ausreichender Sauerstoffzufuhr schlagartig an Brisanz gewinnen. Aus diesem Grund ist die Detektion von Hohlraumbränden bspw. nach Brandereignissen entscheidend, um keine weiteren Schäden zu verursachen. Die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren veröffentlichte im Januar 2024 die Empfehlung „Löschmaßnahmen bei Bränden von Holzfaserdämmung“ [1]. In dieser Arbeit werden Großeinsätze mit beachtlichem Personaleinsatz (bis zu 300 Personen) und großer Einsatzdauer (bis zu 30 h) aufgeführt. Diese enormen Zeiten sind auch darauf zurückzuführen, dass durch Erkundungsmaßnahmen sichergestellt wurde, dass keine Hohlraumbrände vorlagen.

Um eine geeignete Vorgehensweise zur Detektion und Brandbekämpfung zu erarbeiten, wird zunächst auf die Eigenschaften von Hohlraumbränden eingegangen. Bei Hohlraumbränden findet die Verbrennung im Inneren der Konstruktion statt. Der Transport von Sauerstoff in die Konstruktion ist durch die mehrlagige Bauweise reduziert. Durch die geringe Sauerstoffzufuhr findet eine unvollständige Verbrennung statt. Diese ist selbsterhaltend, solange die durch die Verbrennung freigesetzte Wärme größer ist als die an die Umgebung abgegebene und die Sauerstoffkonzentration 12 Vol.-% nicht unterschreitet [2]. Durch die guten isolierenden Eigenschaften des Dämmstoffs ist die abgegebene Wärme sehr gering, wodurch nur eine geringe Wärmefreisetzung und damit Stoffumsetzung stattfindet [3]. Dieser Vorgang wird als Schwelen bezeichnet. Verglichen mit einem Flammenbrand sind die Temperaturen geringer, es entstehen mehr Rauchgase und die freigesetzten Partikel sind größer als bei einer vollständigen Verbrennung [4].

Bei unvollständiger Verbrennung entsteht infolge der reduzierten O₂-Konzentrationen mehr Kohlenstoffmonoxid (CO) als bei der vollständigen Verbrennung, bei der stattdessen vorwiegend Kohlenstoffdioxid (CO₂) gebildet wird. Weitere Reaktionsprodukte bei Pyrolyse, Schwelen und Verbrennen können [2] entnommen werden. In dieser Quelle werden ausführliche Daten zu den Reaktionsprodukten in Abhängigkeit von der Verbrennungsart und dem Dämmstoff vorgestellt.

Zur Detektion von Hohlraumbränden können Gasmessgeräte eingesetzt werden, die typische Reaktionsprodukte eines Schwelbrands identifizieren können. Im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsvorhabens wurden hauptsächlich Holzfaser, Zellulose und Mineralwolle (Glas- und Steinwolle) als Dämmmaterialien verwendet. Bei der Pyrolyse von Holzfaserdämmstoffen entstehen Catechol und Methylfuran. Beim Schwelen werden außerdem CO, Schwefeldioxid, Methan, Toluol und Furfural freigesetzt. Bei einer vollständigen Verbrennung entstehen CO₂, Methylbenzofuran und Styrol. Schwelbrände können mithilfe von Gasmesstechnik lokalisiert werden. Besonders CO eignet sich dafür, da es in großen Mengen freigesetzt wird. Zudem dringt CO schnell durch Baustoffe, insbesondere Gips, wodurch es sogar an der Außenseite der Bauteile gemessen werden kann [5] [6].

Eine gängige Methode zur Erkennung von Bränden und Glutnestern besteht darin, die Oberflächentemperatur zu messen. Hierfür verwenden Feuerwehreinsatzkräfte Wärmebildkameras. Die Technik hat jedoch Grenzen, da die Erkennung von Schwelbränden im Inneren von Bauteilen aufgrund ihrer niedrigen Verbrennungstemperatur und der guten Dämmeigenschaften erschwert ist. Es zeigte sich, dass durch die im Einsatzfall mit Löschwasser benetzten Wände keine Rückschlüsse auf mögliche Schwelbrände in der Konstruktion zuließen. Die korrekte Bedienung der Einsatztechnik ist für die Detektion von Hohlraumbränden essenziell. Handgehaltene Wärmebildkameras besitzen oft verschiedene Darstellungsvarianten. Der zeitliche Verlauf der Temperaturen ist entscheidend, da die Wärmeleitung durch die verwendeten Dämmstoffe sehr gering ist und die Temperatur auf der Außenseite zeitversetzt zum Inneren des Bauteils ist.

Eine weitere Möglichkeit Schwelbrände zu identifizieren ergibt sich aus der erhöhten Rauchgasfreisetzung. Allerdings befindet sich der Rauch im Inneren der Wand, sodass er nur zur Identifikation geeignet ist, wenn er austritt oder ein Loch in das Element gebohrt wird. Dieses kann in der Folge für Löscharbeiten oder Temperaturmessungen genutzt werden.

1.1.2 Bewertung von Einsatzmitteln zur Detektion von Hohlraumbränden

Folgende Kriterien werden für die Bewertung der möglichen Einsatzmittel zur Detektion von Hohlraumbränden genutzt:

- Erkennbarkeit des Schwelbrandes (a),
- Zeitaufwand (b),
- Verwendbarkeit bei der Feuerwehr (c),
- Schäden am Gebäude (d),
- Gefahr der erneuten Anfachung durch Öffnung (e) und
- Kosten der Geräte (f).

Die Bewertung der Einsatzmittel zur Hohlraumbranddetektion erfolgte im Anschluss an die Versuche. Die daraus hervorgegangene Matrix zeigt Tabelle 4.

1.1.3 Einsatzmittel zur Bekämpfung von Hohlraumbränden

Neben der Betrachtung von Einsatzmitteln der Detektion wurden mit Hilfe einer Literaturrecherche die Einsatzmittel zur Brandbekämpfung von Hohlraumbränden bewertet. Die Einsatzmittel

- Hohlstrahlrohr nach Öffnen der Struktur und Entfernen des Dämmmaterials ¹(1),
- Löschnagel (2),
- Schneidlöschsystem (3),
- Löschgas (CO₂, Stickstoff) (4),
- Pulverlöscher (5) und
- Schaum (6)

kommen für die Brandbekämpfung grundsätzlich in Frage. Diese wurden auf Grundlage der Literaturrecherche hinsichtlich ihrer Wirksamkeit evaluiert und in Tabelle 1 als Bewertungsmatrix visualisiert.

Als Bewertungskriterien werden

- Verfügbarkeit (a),
- Umweltverträglichkeit (b),
- Löschmittelmenge (c),
- Handhabbarkeit (d),
- Personalaufwand (e),
- Zeitaufwand (f),
- Kosten für die Feuerwehr (g),
- Kosten für durch Gebäudeschäden (h),
- Gefahr der Anfachung während des Öffnens (i),
- Gefahr der Anfachung nach Löschen (j),
- Gefahr für Personen (k),
- Gefahr bei falscher Bedienung (l) und
- Ist die Taktik sinnvoll (m)

festgelegt.

¹ Außerdem wird auf die Nutzbarkeit von Netzmitteln und Gelbildnern als Additive eingegangen.

Auf der Basis der vorgenannten Betrachtungen wurde die Bewertungsmatrix in Tabelle 1 erstellt. Sie resultiert aus der durchgeführten Literaturrecherche (++sehr positiv,+ positiv, - negativ, -- sehr negativ und 0 neutral). Bei / kann keine Aussage getroffen werden.

Tabelle 1: Bewertungsmatrix auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche der Einsatzmittel zur Brandbekämpfung von Hohlraumbränden

	Strahlrohr	Lösch- nagel	Schneid- löschsys.	Löschgas	Pulver	Schaum
a	++	0	--	-	+	+
b	+	++	+	++	-	+
c	0	++	+	/	/	/
d	0	+	-	0	-	-
e	0	0	-	+	0	-
f	0	++	+	+	+	-
g	++	+	--	-	0	+
h	0	+	0	++	0	0
i	0	++	++	++	-	0
j	+	++	++	--	0	-
k	++	++	0	++	0	++
l	0	0	--	+	-	-
m	++	++	++	+	-	-

1.1.3.1 Hohlstrahlrohr nach Öffnen der Struktur und Entfernen des Dämmmaterials

Die Öffnung der Struktur und das anschließende Löschen mit einem Hohlstrahlrohr dient als Referenz, da dieses Vorgehen von jeder Feuerwehr angewendet werden kann und es üblicherweise der Standard bei der Brandbekämpfung ist. Wasser als Löschmittel ist in Deutschland überall verfügbar und nicht giftig. Allerdings kann beim Löschen verunreinigtes Wasser in die Umwelt gelangen. Löschmittelmenge, Handhabbarkeit, Personal und Zeitaufwand werden als Vergleichswert definiert, wobei der Personal- und Zeitaufwand für das Entfernen des Dämmmaterials nicht zu unterschätzen ist. Diese Taktik ist nicht mit Anschaffungskosten verbunden, kann aber bei falscher Anwendung zu Wasserschäden führen. In [7] wurde diese Methode verwendet und es wurden zwei potenzielle Probleme aufgeführt. Zum einen konnte die Kettensäge aufgrund der Rauchgase nur bedingt verwendet werden, zum anderen konnte sich das Feuer durch falsch gesetzte Öffnungsschnitte und die einströmende Frischluft schnell zu einem Vollbrand entwickeln. Wegen dieser Probleme wird die Methode in [7] als effektiv, aber fehleranfällig beschrieben. Die richtige Handhabung ist dementsprechend entscheidend für den Einsatzerfolg. Einmal gelöscht Material sollte sich nicht noch einmal entzünden, da es durch die geschaffene Öffnung direkt entfernt werden kann und Wasser eine gute Kühlwirkung besitzt, wodurch die Gefahr der Entzündung stark reduziert wird. Die Verwendung von Netzmittel wird für Hohlraumbrände empfohlen, weil es die Oberflächenspannung verringert, wodurch das Wasser besser in das Dämmmaterial eindringen kann. Dadurch werden weniger Wasser und Zeit zum Löschen benötigt [8]. Demgegenüber wird von der Verwendung von Gelbildnern abgeraten, welche die Viskosität erhöhen, wodurch das Wasser schlechter in die Struktur eindringen kann, um das Material zu kühlen. Des Weiteren kann es zum Verstopfen der Aggregate der Feuerwehr kommen [8].

1.1.3.2 Löschnagel

Löschnägel bieten die Möglichkeit, das Löschwasser direkt in die Wand- und Deckenstruktur einzubringen, ohne eine große Öffnung zu schaffen, wodurch die Gefahr der Anfachung eines Schmelbrandes zum Vollbrand stark reduziert wird. Dazu muss entweder ein Loch gebohrt oder der Nagel in die Wand geschlagen werden. Ein schnelles Arbeiten ist möglich, wenn eine Person die Bohrungen vornimmt und die andere den Löschnagel bedient. Probleme, die Bohrung zu finden, können bei schlechter Sicht auftreten [7]. Die Wassermenge, die in

die Struktur eingebracht wird, ist vergleichbar mit dem großflächigen Öffnen und dem Einsatz von einem Hohlstrahlrohr [7]. Die Handhabbarkeit gegenüber einem Schneidlöschsystem ist sehr gut, da flexible D-Schläuche verwendet werden. Damit sind Löschnägel eine vielversprechende Variante für die Brandbekämpfung im modernen Holzbau. Die Löschwirkung kann unter Nutzung von Additiven weiter verbessert werden [8] [9].

1.1.3.3 Schneidlöschsystem

Das Schneidlöschsystem ist in der Tabelle 1 mehrfach negativ bewertet. Das ist aber nicht darin begründet, dass das System ungeeignet ist, sondern dass es kaum Feuerwehren in Deutschland besitzen (Verfügbarkeit, Kosten für die Feuerwehr). Die Gefahr der falschen Bedienung lässt sich durch geeignete Schulungen beheben. Beispielhaft sei hier genannt, dass keine Personen hinter der Wand sein dürfen, falls diese durchdrungen wird [10]. Ein weiterer Nachteil ist die Handhabbarkeit, da spezielle Hochdruckschläuche, die relativ steif sind, verwendet werden müssen, wodurch ein höherer Personalaufwand resultiert [10]. Ansonsten ist es in skandinavischen Ländern, in denen der Holzbau weit verbreitet ist, ein häufig eingesetztes und in der Literatur empfohlenes Mittel für Hohlraumbrände [10] [7]. Das System wird in einem Winkel von 45 ° auf die Wand aufgesetzt. Es wird mit kurzen Pulsationen gearbeitet, um diese nicht zu durchdringen. Es wird empfohlen, das Löschergerät nicht mittig auf das Glutnest zu richten, sondern etwas außerhalb, da sich der Hohlraumbrand bereits weiter ausgebreitet haben kann [10]. Der große Vorteil dieses Systems ist nach [7], dass die Öffnung der Wand und das Löschen des Brandes mit einem Werkzeug erfolgt, wodurch die Angriffspunkte schnell gewechselt werden können und damit dem Brand nur wenig Zeit zur weiteren Ausbreitung oder weiteren Anfachung geboten wird.

1.1.3.4 Löschgase

Löschgase zeichnen sich dadurch aus, dass es besonders sauber ist und keinerlei Schäden am Gebäude oder der Umwelt hervorruft, da Stickstoff und CO₂ ohnehin natürlich in der Luft vorkommen. Problematisch ist die Form der Einbringung und die Bereitstellung. In [10] wird Trockeneis in die Struktur eingebracht. Als ungünstig erwies sich, dass das Trockeneis an der Dämmwolle haftete, wodurch die kühlende Wirkung nur lokal auftrat. Dennoch konnte bei ausreichend dichter Bauweise ein Löscherfolg erreicht werden [10]. In einem Brandversuch in einem Holzhaus konnte der Brand hingegen nicht gelöscht werden [10]. Flüssiger Stickstoff wurde ebenfalls in [10] untersucht. Dieser lässt sich leichter einleiten und verdampfen als Trockeneis. Allerdings ist er schwer bereitzustellen. Eine andere Möglichkeit, die für Schaltschränke entwickelt wurde, wird bei [9] eingesetzt. Hier wird das CO₂ mittels Löschnagel und CO₂-Löscher in die Struktur eingebracht. Nachteilig ist, dass das Löschgase, wenn es in gasförmiger Variante eingebracht wird, keinerlei Kühlwirkung besitzt, wodurch es leicht zum erneuten Schwelen kommen kann. Außerdem wirkt es erstickend, sodass nach einem Löscheinsatz in geschlossenen Räumen mit einer gesundheitsgefährdenden Atmosphäre zu rechnen ist.

1.1.3.5 Pulver

Pulver hat im Allgemeinen eine hohe Löschwirkung. In [11] wurde Pulver genutzt, um Konstruktionsbrände in Hohlräumen zu löschen, wobei jedoch große Pulvermengen notwendig waren. Für den Innenangriff wird Pulver als Löschmittel nicht empfohlen, weil es in alle Spalten zieht, dort schwer zu entfernen ist und zu Korrosion führen kann. Außerdem kann es zu zusätzlichen Sichtbehinderungen führen [12].

1.1.3.6 Schaum

Schaum besitzt den gleichen Nachteil wie Gelbildner. Er verhindert, dass das Wasser an die gewünschten Stellen gelangt und dort seine kühlende Wirkung entfaltet. Die erstickende Wirkung des Schaums kann sich kaum entfalten, da der Schwelbrand bei geringer Sauerstoffzufuhr aufrechterhalten wird [13]. Die Injektion in die Wand kann beispielsweise mit dem System „HIPRESS Carbon“ direkt in die Wand erfolgen.

1.1.3.7 Netzmittel

Netzmittel verringert die Oberflächenspannung des Wassers, wodurch dieses besser in das Fasermaterial eindringen kann. Dadurch kann sowohl die Löschmittelmenge als auch die Einsatzzeit verringert werden. Die Kombinationsmöglichkeit von Netzmittel und Löschnägeln ist sehr vielversprechend.

1.1.3.8 Zusammenfassende Bewertung der Löschmittel

Zusammenfassend bieten sich anhand der Literaturrecherche drei Löschmittel als vielversprechend an und werden für die nachfolgenden Untersuchungen als geeignet eingestuft. Das sind die Verwendung eines Hohlstrahlrohres mit entsprechender Öffnung der Konstruktion als Referenz, die Nutzung von Löschnägeln in Kombination mit Wasser oder Netzmitteln als eine Variante ohne große Nachteile, das Schneidlöschsystem, das in der Literatur als sehr geeignet beschrieben wird. Das Schneidlöschsystem zeigte bei den Öffnungsversuchen der Projektpartner aus Hamburg Nachteile, weshalb nachfolgend ein Bohrlöschsystem untersucht wird. Details können dem Schlussbericht der Feuerwehr Hamburg entnommen werden.

1.2 Arbeitspaket 2: Experimentelle und numerische Untersuchung des Einflusses von Brandfläche, Ventilation und Konstruktionsweise auf den Brandverlauf

Seitens des IBK wurde im AP 2 federführend das Teilarbeitspaket 2.3 bearbeitet.

Arbeitspaket 2.3: Überprüfung der Detektionsmöglichkeiten von Konstruktions- und Hohlraumbränden mittels Wärmebildkameras

Ziele:

- Überprüfung der Möglichkeiten der Detektion von Konstruktions- und Hohlraumbränden in Wand- und Deckenaufbauten aus Holz
- Grafische Darstellung eines Brandes in der Konstruktion durch Wärmebild- und Videokamera sowohl auf der brandabgewandten wie auch auf der brandzugewandten Seite der Probekörper
- Mitwirkung bei der Konzeptionierung des Brandcontainers für AP 3

1.2.1 Brandversuche am Bauteilofen

Für die Erprobung von Detektions- und Brandbekämpfungsstrategien wurden Brandversuche an einem gasbefeuelten Normbrandofen durchgeführt.

1.2.1.1 Versuchsaufbau

Die Projektpartner der Hochschule Magdeburg-Stendal und des Instituts für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge (IBK) führten gemeinsam Brandversuche in dem in Abbildung 1 dargestellten gasbefeuelten Ofen durch. Je Versuch wurden zwei Probekörper, also entweder zwei Wand- oder ein Wand- und ein Deckenelement untersucht. Die Versuche wurden in Dauerversuche und Löschversuche unterteilt. Bei beiden Versuchsvarianten wurden die Probekörper bis zu 30 min einseitig beflammt, wobei die Temperatur im Ofen der Einheitstemperaturkurve (ETK) entsprach. Dadurch wurde ein Raumbrand abgebildet. Nach 30 min wurden die Probekörper aus dem Ofen entfernt und auf der brandbeanspruchten Seite mit ein bis zwei Litern Wasser aus einer Kübelspritze beaufschlagt. Dies sollte das Löschen des Raumbrandes der Feuerwehr und das Kühlen der Bauteiloberfläche darstellen. Bei den Dauerversuchen wurde nicht in den Brandverlauf eingegriffen und die Branddynamik der Hohlraumbrände mit Wärmebildkamera, Gasmesstechnik und Videokamera beobachtet. Zusätzlich lieferten Thermoelemente die Temperaturen im Inneren der Bauteile. Bei den Löschversuchen wurden neben der wissenschaftlichen Messtechnik, die auch bei den Dauerversuchen zum Einsatz kam, handgehaltene Wärmebildkameras und Gasmesstechnik genutzt, um die Hohlraumbrände gegebenenfalls zu detektieren und mit Löschnägeln zu bekämpfen. Die insgesamt 36 Wand- und Deckenbauteile von 1 x 1 m lieferten Erkenntnisse zum Brandverhalten unterschiedlicher Baustoffe sowie zur Detektion und Löschbarkeit von Hohlraumbränden. Abbildung 1 veranschaulicht den Versuchsaufbau. Die verwendeten Messgeräte sind in Tabelle 2 dargestellt.

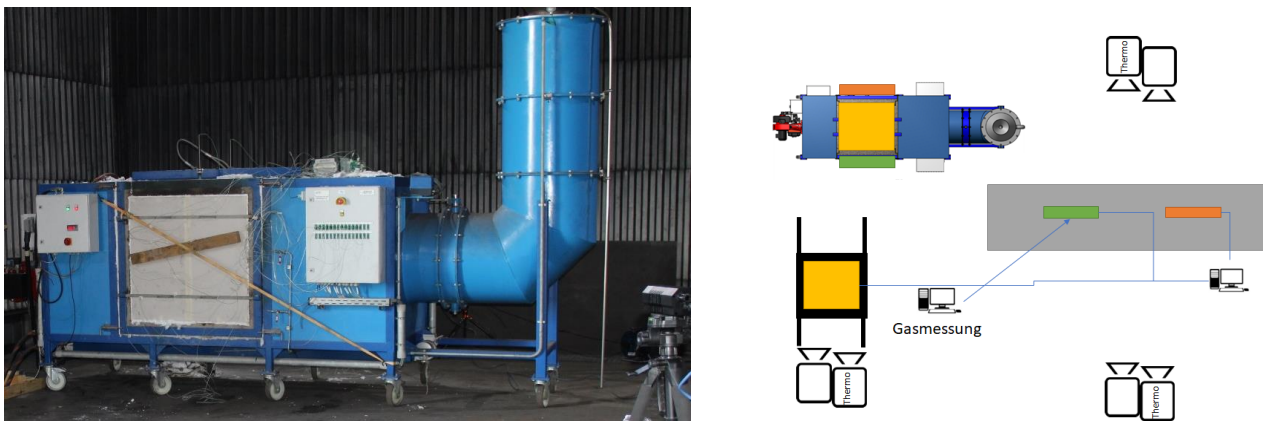


Abbildung 1: Links, Foto des gasbefeuelten Bauteilofens für die Untersuchung von 1 m x 1 m Probekörpern mit einseitiger ETK-Bearspruchung und rechts, schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Ofenversuche.

Tabelle 2: Verwendete Messgeräte bei den durchgeführten Versuchen am Bauteilofen.

Anzahl	Messgerät	Beschreibung	Dauer (D) bzw. Löschversuch (L)
2	Wissenschaftliche Wärmebildkameras (InfraTec)	Messung der Oberflächentemperaturen der Probekörper	D und L
Ca. 6 je Gefach und Messebene	Thermoelemente	Messung der Temperaturen im Bauteil	D und L
1	Gasmessgerät (Rae Systems)	Messung der aus den Fehlstellen austretenden Brandgase (O ₂ , CO, CO ₂)	D und L
2	Videokameras	Bildaufnahmen der Probekörper	D und L
1	Handgehaltene Wärmebildkamera	Messung der Oberflächentemperaturen mit Feuerwehrtechnik	L
1	Mehrgasmessgerät	Messung von CO mit Feuerwehrmesstechnik	L

1.2.1.2 Versuchsdurchführung

Tabelle 3 listet die durchgeführten Versuche auf.

Tabelle 3: Untersuchungsmatrix der durchgeführten Ofenversuche

Versuch	Wand/Decke	Bekleidung	Dämmstoff	Art	ETK in min
1	W	12,5 GKF	Holzfaser	Langzeit	5
1	W	12,5 GKF	Glaswolle	Langzeit	5
2	W	12,5 GKF	Holzfaser	Langzeit	30
2	W	12,5 GKF	Glaswolle	Langzeit	30
3	W	18 GKF	Holzfaser	Langzeit	30
3	W	18 GKF	Glaswolle	Langzeit	30
4	W	OSB + 18 GKF	Holzfaser	Langzeit	30
4	W	OSB + 18 GKF	Glaswolle	Langzeit	30
5	W	18 GKF	Holzfaser	Lösch	30
5	W	OSB + 18 GKF	Holzfaser	Lösch	30
6	W	18 GKF	Steinwolle	Langzeit	30
6	W	OSB + 18 GKF	Steinwolle	Langzeit	30
7	W	2 x 18 GKF	Steinwolle	Langzeit	30
7	W	2 x 18 GKF	Steinwolle	Langzeit	30
8	W	OSB + 2 x 18 GKF	Holzfaser	Langzeit	30
8	W	OSB + 2 x 18 GKF	Steinwolle	Langzeit	30
9	W	OSB + 12,5 GKB	Holzfaser	Langzeit	30
9	W	OSB + 12,5 GKB	Steinwolle	Langzeit	30
10	W	12,5 GKB	Holzfaser	Langzeit	30
10	W	12,5 GKB	Glaswolle	Langzeit	30
11	W	OSB + 18 GKF	Steinwolle	Lösch	30
11	W	mehrere Lagen	Holzfaser und Steinwolle	Lösch	30
12	W	18 GKF	Holzfaser	Lösch	30
12	D	18 GKF + OSB	Holzfaser	Langzeit	30
13	W	18 GKF	Holzfaser	Lösch	30
13	D	18 GKF + OSB (größere Fehlstelle)	Holzfaser	Langzeit	30
14	W	mehrere Lagen	Holzfaser und Steinwolle	Langzeit	30
14	D	18 GKF + OSB (größere Bohrung)		Langzeit	30
15	W	Holzmassiv + 18 GKF	Holzfaser	Langzeit	30
15	D	Holzmassiv + 18 GKF	Holzfaser	Langzeit	30
16	W	Holzmassiv + 18 GKF	Steinwolle	Langzeit	30

16	D	18 GKF + Sparschalung	Holzfaser	Langzeit	30
17	W	mehrere Lagen	Holzfaser und Steinwolle	Langzeit	30
17	D	18 GKF + Sparschalung	Holzfaser	Langzeit	30
18	W	18 GKF	Cellulose	Langzeit	30
18	W	OSB + 18 GKF	Cellulose	Langzeit	30

1.2.1.3 Versuchsauswertung hinsichtlich der Detektion von Hohlraumbränden

Die Branddynamik und der Einfluss verschiedener Konstruktionen auf die Branddynamik werden von der Hochschule Magdeburg-Stendal untersucht. Aus diesem Grund wird in diesem Bericht schwerpunktmäßig auf die für die Detektion und Brandbekämpfung entscheidenden Punkte eingegangen. Abbildung 2 zeigt beispielhaft den mit der Wärmebildkamera und den Thermoelementen ermittelten Verlauf des verdeckten Hohlraumbrandes auf der brandzugewandten und brandabgewandten Seite des Bauteils. Es ist zu sehen, wie sich der Hohlraumbrand über Stunden ausbreitet und zum Versagen des Bauteils führt. Diese Aufnahmen existieren zu allen Versuchen und zeigen den Einfluss der gewählten Konstruktion auf den Brandverlauf.

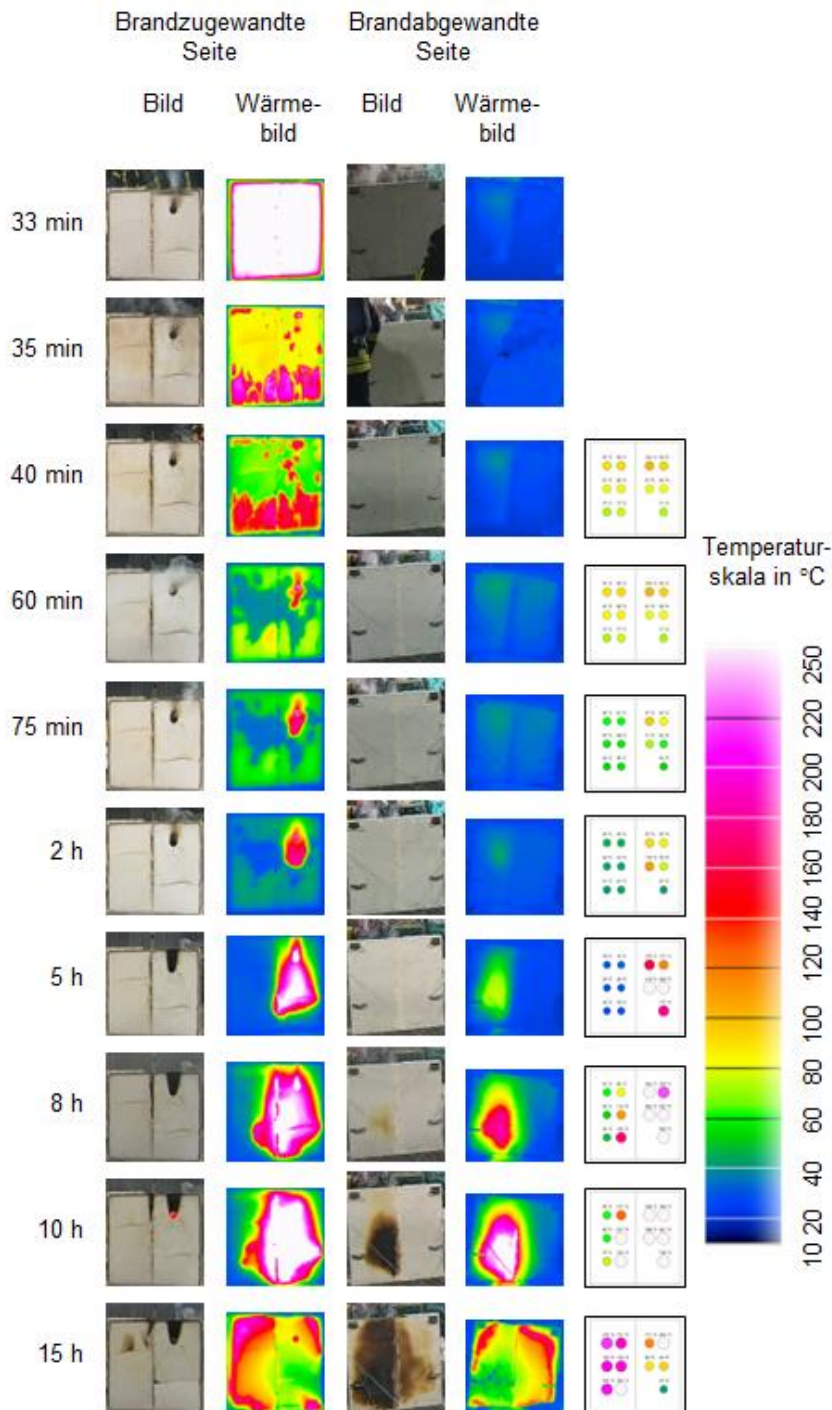


Abbildung 2: Brandentwicklung in einem 1 x 1 m Probekörper mit Glaswolle, OSB-Platte und 18 mm GKF-Platte über einen Zeitraum von 15 h.

Abbildung 3 gibt einen Überblick über das mit bloßem Auge sichtbare Brandverhalten von Wandbauteilen mit unterschiedlicher Bekleidung. Zeiten mit Rauchaustritt und sichtbarer Flammenercheinung sind gekennzeichnet. Es ist zu sehen, dass Hohlraumbrände ausschließlich bei Wandbauteilen mit brennbarem Dämmstoff und/oder mit OSB-Platte auftreten. Diese können auch nach Stunden erneut aufflammen und das Bauteil vollständig zerstören. Bauteile mit nicht brennbarem Dämmstoff und ohne OSB-Platte sind dagegen unkritisch.

Für die Untersuchung der Detektion werden zunächst die Innenwandbauteile mit mindestens einer 18 mm Gipskarton-Feuerschutzplatte (GKF) herangezogen. Bei einer geringeren Bekleidung (12,5 mm Gipskarton-Bauplatte (GKB)) trat kein verdeckter Schwelbrand auf, sondern die Bekleidung war nicht in der Lage, der gewählten Temperaturbeanspruchung standzuhalten. Das Versagen der brandschutztechnischen Bekleidung war durch Herabfallen des Gipses, Risse und austretenden Rauch zu erkennen, sodass dieser Brand schnell entdeckt worden wäre. Das heißt nicht, dass diese Bauteile nicht zu Schwelbränden neigen. Diese können auch bei einer geringeren Temperaturbeanspruchung als den bei diesen Versuchen gewählten 30 min auftreten, sodass die Ergebnisse auch auf diese Bauteile übertragen werden können. Bei der Detektion von Hohlraumbränden nach einem Innenbrand ist die Maskierung des Hohlraumbrands durch die hohe Wandtemperatur ein wesentliches Problem. Abbildung 4 zeigt den zeitlichen Verlauf der maximalen Temperatur auf der Bauteiloberfläche der brandbeanspruchten Seite. Diese wurde mit einer wissenschaftlichen Wärmebildkamera bestimmt. Am schnellsten fallen die Temperaturen bei den Bauteilen 18 mm GKF und 2x 18 mm GKF und Steinwolle. In diesen Bauteilen trat kein Hohlraumbrand auf, die Bauteile kühlen sich dementsprechend an der Umgebungsluft ab. Ca. 1 h nach Entnahme aus dem Ofen beträgt die maximale Temperatur in den Bauteilen ca. 50 °C. 2 h nach Entnahme liegt die Temperatur unterhalb von 35 °C.

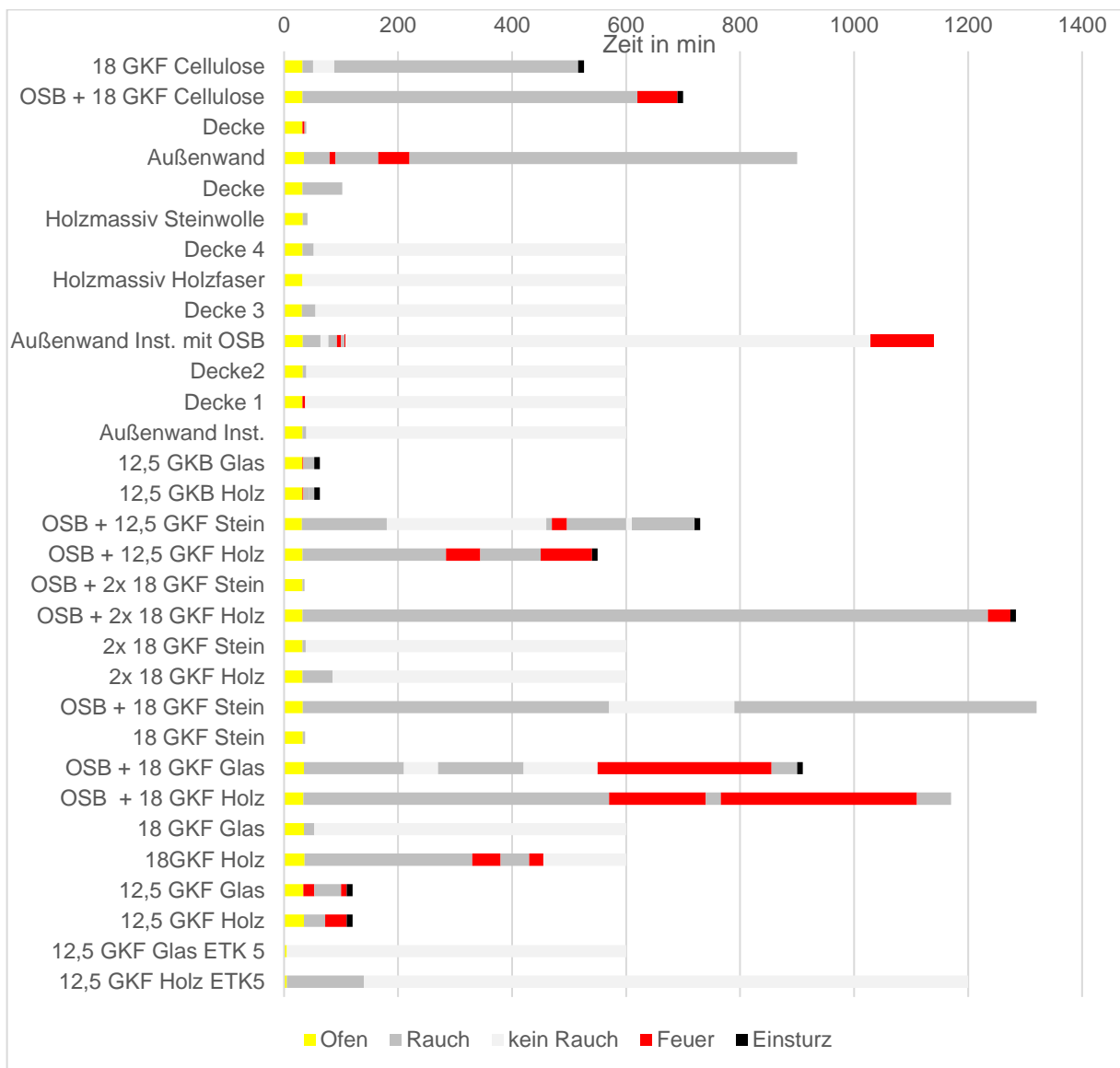


Abbildung 3: Überblick über optisch wahrnehmbares Brandverhalten verschiedener Konstruktion hinsichtlich sichtbarer Flammen, austretendem Rauch und Einsturz des Bauteils.

Etwas langsamer verringern sich die maximalen Temperaturen bei dem Bauteil mit OSB, 2x 18 mm GKF und Steinwolle sowie dem Bauteil mit 18 mm GKF und Glaswolle (siehe Abbildung 4?). Beim Bauteil mit OSB kam es im Bereich der Fehlstelle zur Verkohlung der OSB-Platte. Hier trat also ein verdeckter Brand auf, der im Laufe des Versuchs jedoch selbstständig verlöschte. Dementsprechend war die maximale Temperatur im Bereich der Fehlstelle sichtbar. Bei dem Bauteil mit Glaswolle trat im Bereich des Mittelständers ein Einbrand auf, bei dem die maximale Temperatur auftrat. Im Bereich der Gefache gab es keine auffälligen Bereiche. Das langsame Sinken der Maximaltemperatur ist bei diesen Bauteilen dementsprechend auf lokale Brandereignisse zurückzuführen. Nachdem diese von selbst verlöschten oder mit der Kübelspritze beendet wurden, verringerte sich die Maximaltemperatur zügig.

Das Bauteil mit 2 x 18 mm GKF mit Holzfaserdämmung kühlt stetig, aber signifikant langsamer ab als die vorherigen genannten Bauteile. Die Wärmebildaufnahmen zeigen hohe Oberflächentemperaturen im Bereich der Fehlstelle. Etwa 90 min nach der Entnahme aus dem Ofen ist ein Hohlraumbrand unterhalb der Fehlstelle zu erkennen. Während sich die Temperatur in der Fehlstelle kontinuierlich verringert, was am Abfallen der Kurve erkennbar ist, breitet sich der Hohlraumbrand innerhalb des Gefachs nach unten aus. 4 h nach der Ofenentnahme bleibt die mit der WBK gemessene Maximaltemperatur an der Bauteiloberfläche konstant bei 40 °C. Zu diesem Zeitpunkt ist die Temperatur auf der Bauteiloberfläche im Bereich der Fehlstelle geringer als im Bereich des Schwelbrands. Dieser verändert weiterhin seine Position, die maximale Temperatur hält sich im Bereich von 40°C, bis der Versuch nach 20 h beendet wird. Der Verlauf der Maximaltemperatur zeigt bei diesem Bauteil bei ca. 300 min einen Knick. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die maximale Temperatur zunächst an der Fehlstelle auftritt. Diese kühlt im Verlauf des Versuchs ab. In der Zwischenzeit wandert der Schwelbrand und verursacht eine Temperatur an der Bauteiloberfläche von etwa 40 °C. Nach 300 min ist fällt die Temperatur an der Fehlstelle unter 40 °C, so dass die maximale Temperatur nun im Bereich des Schwelbrandes auftritt. Es ist deutlich ersichtlich, dass auch bei Oberflächentemperaturen von 40 °C Hohlraumbrände vorhanden sein können. Vielmehr deuten konstante Temperaturen oberhalb der Raumtemperatur auf einen Hohlraumbrand hin. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass Bauteile ohne Hohlraumbrand kontinuierlich abkühlen. Aufgrund der guten Dämmeigenschaften dauert der Abkühlvorgang entsprechend lange. Eine Temperatur von 40 °C wurde bei einigen Versuchen nach 50 min bis 200 min erreicht. Durch diesen großen Bereich ist keine Aussage darüber möglich, nach welcher Zeit bestimmte Temperaturen erreicht werden sollen, um Hohlraumbrände auszuschließen. Dies verdeutlicht, dass die Temperaturen beobachtet und dokumentiert werden müssen. An dieser Stelle muss bemerkt werden, dass bei den durchgeführten Versuchen nur ein, verglichen mit dem Einsatzfall, kleines Bauteil untersucht wurde. Im Realfall sind deutlich größere Flächen betroffen, sodass eine ausführliche Dokumentation der Maximaltemperaturen und Hotspots notwendig ist, um den zeitlichen Verlauf erfassen zu können. Um nicht den Überblick zu verlieren, könnten die Temperaturen und Zeiten auf die Wand geschrieben werden.

Bei den übrigen Bauteilen treten Hohlraumbrände auf, wodurch über einen langen Zeitraum Temperaturen oberhalb 100 °C gemessen werden können. Wenn das brennbare Material aufgebraucht ist, verringert sich die Temperatur. Abbildung 5 zeigt die Temperaturen der Bauteiloberflächen zu bestimmten Zeiten, um zu verdeutlichen, wo und wie großflächig die maximalen Temperaturen in Abbildung 4 auftreten.

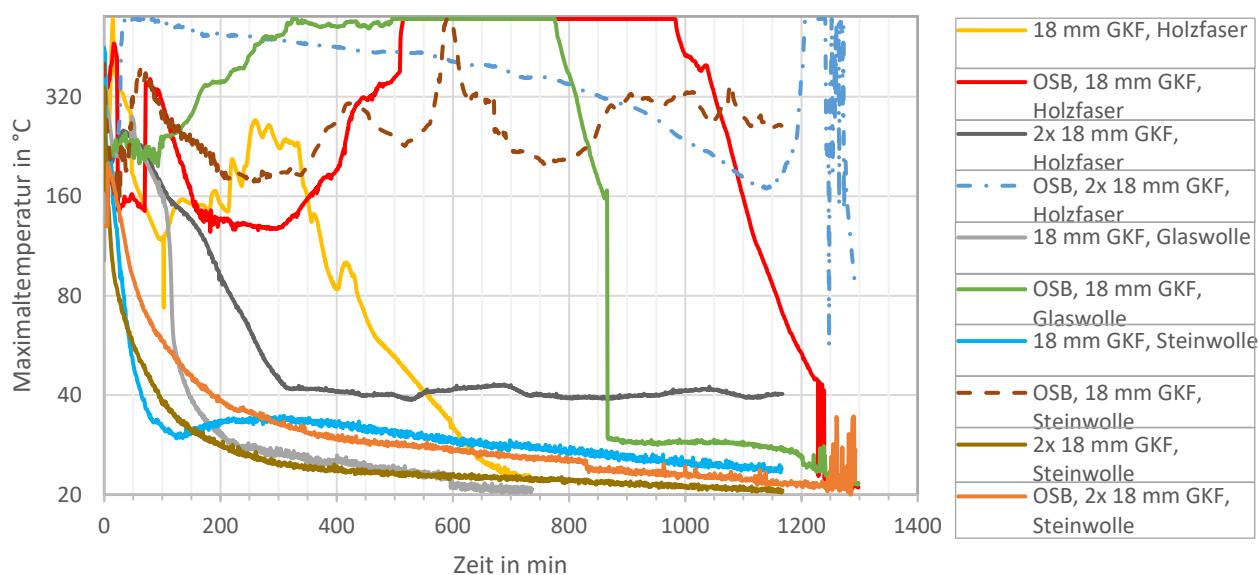


Abbildung 4: Maximaltemperaturverläufe der Bauteile nach der Ofenentnahme.

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, sind 10 min nach der Entnahme aus dem Ofen schemenhaft die Bereiche, zu erkennen, die mit der Kübelspritze benetzt wurden. Dies erschwert die Detektion mit der Wärmebildkamera,

bildet aber die realitätsnahe Vorgehensweise der Einsatzkräfte ab. Bei den Bauteilen mit brennbarem Dämmstoff oder OSB-Platte ist eine Temperaturerhöhung im Bereich der Fehlstelle deutlich zu erkennen. In einiger Entfernung von der Fehlstelle kühlt sich das Bauteil ab, sodass nach 90 min großflächig Temperaturen unterhalb 40 °C erreicht werden. Als Ausnahme ist hier das Bauteil mit 18 mm GKF und Holzfaserdämmstoff zu sehen. Hier treten auch nach 150 min großflächig Temperaturen oberhalb 80 °C auf. Der Hohlraumbrand wurde also durch die brandschutztechnische Bekleidung hindurch im gesamten Bauteil hervorgerufen. Bei der Detektion müssen also zunächst Fehlstellen wie Lichtschalter und Steckdosen abgesucht werden. An diesen Stellen können Hohlraumbrände bereits bei geringen Brandbeanspruchungen auftreten. Anschließend muss überprüft werden, ob die Wandtemperaturen großflächig unter 40 °C gesunken sind, um eine Entzündung des Dämmstoffs durch die brandschutztechnische Bekleidung hindurch auszuschließen. Die Verwendung brennbarer Dämmstoffe ist nach Musterholzbaurichtlinie [14] in der Gebäudeklasse 4 für Bauteile mit konstruktiven Anforderungen nicht zulässig. Dennoch kann dieser Wandaufbau bei Wänden ohne konstruktive Anforderung, wie Innenwänden, verwendet werden.

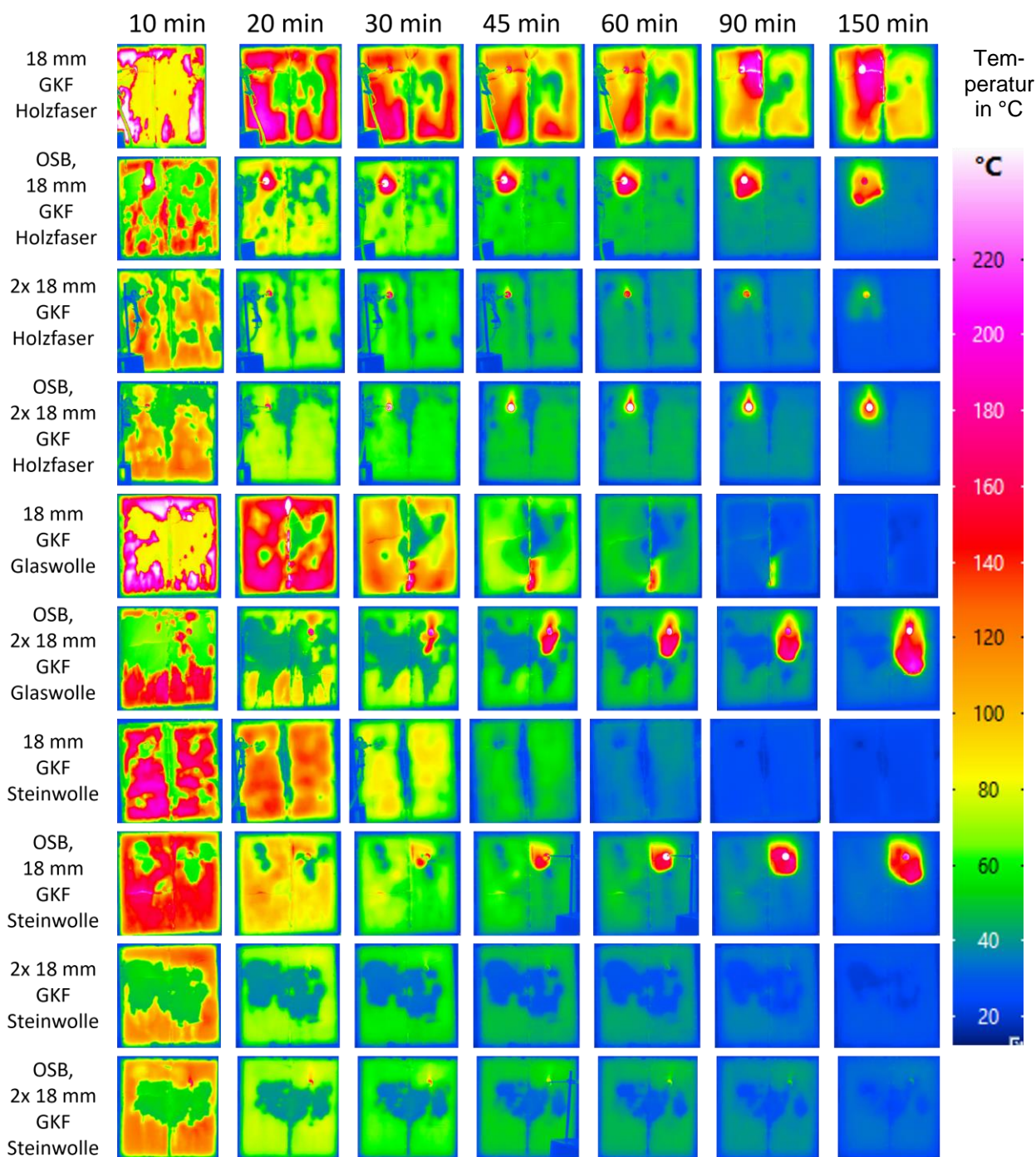


Abbildung 5: Temperaturverteilung auf der Bauteiloberfläche zu definierten Zeitpunkten nach der Ofenentnahme.

Da die Detektion von Hohlraumbränden mit handgehaltenen Wärmebildkameras in der Literatur als schwierig bis nicht möglich beschrieben wird, wurden neben der Temperaturmessung mittels Wärmebildkameras auch Gasmessungen durchgeführt.

Für die Gasmessung während der Versuche am Normbrandofen wurde CO-Warner und Mehrgasmessgeräte von Rae Systems verwendet. Das Messgerät wurde mittig vor der Fehlstelle positioniert. Abbildung 6 zeigt die an der Fehlstelle der Probekörper gemessene CO-Konzentration nach der Entnahme aus dem Normbrandofen. Die logarithmische Darstellung ermöglicht einen besseren Überblick über den groben Verlauf der Graphen, da die Messwerte einer hohen Streuung unterliegen. Bei jedem Versuch wurden zwei Probekörper untersucht, aber nur ein Messgerät für die Analyse der Brandgase verwendet. Aus diesem Grund sind die CO-Konzentrationen nicht für alle Versuche verfügbar. Am Bauteil mit 18 mm GKF und Steinwolle wurde die geringste CO-Konzentration gemessen. Bereits kurz nach der Ofenentnahme konnte kein CO festgestellt werden. Auch das Außenwandbauteil mit Holzfaserdämmstoff im Hauptfach und einer Installationsebene mit Steinwolle weist keine nennenswerten CO-Konzentrationen auf. Überraschend geringe Konzentrationen sind bei dem Probekörper mit 2 x 18 mm GKF, OSB-Platte und Steinwolle zu sehen. Bei diesem Bauteil gab es einen Einbrand im Bereich der Fehlstelle. Wie in Abbildung 5 ersichtlich verlöschte der Hohlraumbrand selbstständig. Bei den übrigen Probekörpern verlöschte der Hohlraumbrand nicht von selbst. Eine Ausnahme ist der Probekörper mit OSB, 18 mm GKF und Holzfaserdämmstoff, bei dem die Konzentration um 100 ppm schwankte und lediglich zeitweise bis auf über 200 ppm anstieg. Bei allen anderen Messungen lag die CO-Konzentration immer über 200 ppm. Es ist gut zu sehen, dass bei den Probekörpern mit Hohlraumbrand große Mengen CO freigesetzt werden. Es ist davon auszugehen, dass diese Konzentrationen auch im Inneren des Bauteils, zumindest im Bereich des Hohlraumbrands auftreten und dementsprechend für die Detektion genutzt werden können. Mit Gasmessungen an Fehlstellen wie Steckdosen und Rissen kann CO im Inneren nachgewiesen werden, was ein eindeutiges Zeichen für eine unvollständige Verbrennung und damit für einen Hohlraumbrand ist.

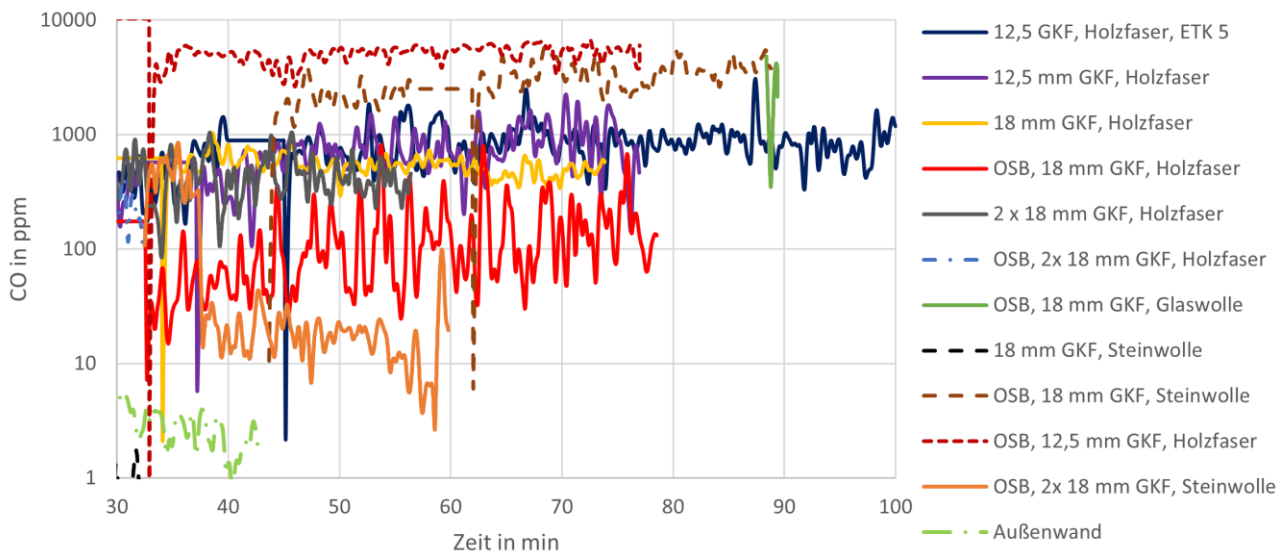


Abbildung 6: Bei dem Normbrandofenversuchen gemessene CO-Konzentration an der Fehlstelle der Probekörper.

CO ist in der Lage, Baustoffe, insbesondere Gips, welches für die brandschutztechnische Bekleidung genutzt wird, zu durchdringen [5]. Dies konnte auch bei den Ofenversuchen bestätigt werden. Bei Bauteilen mit Hohlraumbrand und Gipsbekleidung wurde CO bereits in der Ofenphase auf der nicht brandbeanspruchten Seite des Probekörpers durch die GKF-Platten gemessen. Dafür reichten CO-Warner, die direkt auf die Gipsplatten aufgelegt wurden. Die Detektion des Hohlraumbrandes mittels CO wird im weiteren Verlauf des Berichts wieder aufgegriffen.

Tabelle 4 bewertet die Möglichkeiten zur Detektion von Hohlraumbränden mit den erarbeiteten Kriterien. Sowohl Wärmebildkamera als auch Gasmessgerät besitzen Stärken und Schwächen. Während es die Wärmebildkamera ermöglicht, schnell große Bereiche abzusuchen, sind mit dem Gasmessgerät nur lokale Messungen möglich. Da die Hohlraumbrände mit dem Gasmessgerät besser bestätigt werden können, ist eine Kombination beider Messgeräte sinnvoll.

Tabelle 4: Bewertung von Detektionsmöglichkeiten von Hohlraumbränden.

	Wärmebildkamera (handgehalten)	Gasmessgerät	Sinneswahrnehmung
Erkennbarkeit	+ Schnell große Bereiche Langsame Durchwärmung der Bauteile	+ Punktueller Messung Gas breitet sich schneller aus als Wärme Messung teilweise durch Bauteile hindurch möglich	-- Öffnung erforderlich Schlecht sichtbar
Zeitaufwand	- Hoch, Temperaturentwicklung muss beobachtet werden	- Hoch, große Anzahl an Messpunkten notwendig	- Hoch
Praktikabilität	++ Technik ist vorhanden	+ Technik ist vorhanden	++
Schäden am Gebäude	++ keine	+ Geringe Schäden durch Bohrung	+ Geringe Schäden am durch Bohrung
Anfachung durch Öffnung	++ keine	+ Gering durch Bohrung	+ Gering durch Bohrung
Kosten für Geräte	++ keine	++ keine	++ keine

Versuchsauswertung hinsichtlich der Brandbekämpfung von Hohlraumbränden

Neben der Detektion wurde die Möglichkeiten die Brandbekämpfung von Hohlraumbränden untersucht. Das Öffnen der Struktur mit verschiedenen Werkzeugen wurde von der Feuerwehr Hamburg erprobt und wird im entsprechenden Abschlussbericht vorgestellt. Pulver und Schaum werden nicht weiter untersucht, da sie nach der Literaturrecherche als nicht geeignet angesehen werden. Während der Ofenversuche wurde das Einbringen von Löschwasser in die Struktur bei minimalinvasiver Öffnung untersucht. Dazu wurden Löschnägel genutzt. Das Eintreiben der Löschnägel ist problemlos möglich. Bei einlagigen brandbeanspruchten Gipsplatten konnten diese händisch eingetrieben werden. Ansonsten erwies sich eine Bohrmaschine als sinnvoll. Außerdem konnten die Löschnägel mit einem Hammer in die Holzrahmenbauteile eingeschlagen werden. Auch Bohrlöschsysteme und Schneidlöschsysteme können für direkte Einbringung von Wasser in die Struktur genutzt werden. Diese eignen sich besonders für dicke Wandaufbauten wie Außenwandbauteile mit Installationsebene. Bei Massivholzbauteilen erwiesen sich die Bohrlöschsysteme gegenüber den Schneidlöschsystemen als vorteilhaft.

Wie im vorangegangenen Abschnitt „Brandversuche am Bauteilofen“ beschrieben, gibt es zwei Bauteilebenen, bei denen Schwelbrände auftreten. Zum einen können Schwelbrände bei Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen auftreten, zum anderen bei der Verwendung von OSB-Platten. Da sich, wie bereits beschrieben, die Entstehungsorte und die Ausbreitung unterscheiden, wurden separate Lösversuche dieser beiden Varianten durchgeführt. Tabelle 5 zeigt die untersuchten Wandaufbauten. Während dieser Lösversuche wurden für die Auswahl der Löspositionen nur handgehaltene Wärmebildkameras der Feuerwehr genutzt. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass erst dann eingegriffen wird, wenn ein Hohlraumbrand mit gängiger Einsatztechnik detektiert werden kann. Auch der Löscherfolg bzw. die Entscheidung für Nachlöscharbeiten wurde mittels handgehaltener Wärmebildkamera getroffen. Um keine unnötigen Wasserschäden zu verursachen, wurden die Wasserzufuhr der Löschnägel nur für wenige Sekunden geöffnet. Der zeitliche Verlauf von Lösversuch 5 (LV5) mit 18 GKF, Holzfaserdämmstoff und ohne Fehlstelle ist in Abbildung 7 dargestellt.

Tabelle 5: Aufbau der Probekörper für Löschversuche mit einem Löschnagel

Name	Bauteilaufbau	Hohlwanddose
LV1	18 mm GKF, Holzfaserdämmstoff	Ja
LV2	15 mm OSB, 18 mm GKF, Steinwolle	Ja
LV3	15 mm OSB, 18 mm GKF, Steinwolle	ja
LV4	18 mm GKF, Holzfaserdämmstoff	nein
LV5	18 mm GKF, Holzfaserdämmstoff	nein

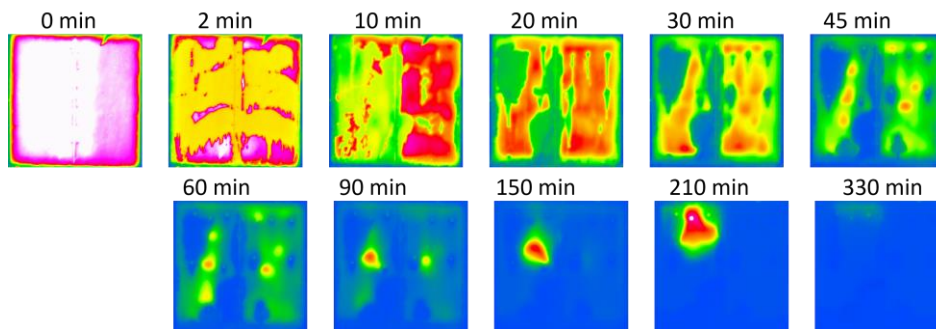


Abbildung 7: Wärmebildaufnahmen der Brandzugewand Seite von Löschversuch 5.

Direkt nach der Entnahme aus dem Ofen (0 min) ist die Oberflächentemperatur des Bauteils sehr gleichmäßig. Nach der Beaufschlagung mit Löschwasser (2 min) ist die Oberflächentemperatur deutlich ungleichmäßiger. Hohlraumbrände können zu diesem Zeitpunkt nicht mit der Wärmebildkamera identifiziert werden. 5 Minuten nach der Entnahme wurde die linke Seite nochmals mit Wasser beaufschlagt, was die tieferen Temperaturen bei 10 min in Abbildung 7 erklärt. Es ist deutlich zu sehen, dass dies kurzzeitig die Bauteiloberfläche kühlt. Bereits 20 min nach der Ofenentnahme sind beide Bauteilhälften wieder miteinander vergleichbar. Die Intensität und der Zeitpunkt der Kühlungen verändern die Oberflächentemperatur nur wenige Minuten, wodurch eine ungleichmäßige Kühlung die Detektierbarkeit nicht negativ beeinflusst. Ein Vergleich mit dem gleichen Bauteil aus Abbildung 5 zeigt nach 10 min ähnliche Temperaturen wie die Bauteile mit 18 mm GKF und Holzfaser und Glaswolle als Dämmstoff. Ein Hohlraumbrand kann also noch nicht bestätigt oder ausgeschlossen werden. 15 Minuten nach der Ofenentnahme wurden großflächig kaum sinkende Temperaturen festgestellt, woraufhin der Löschangriff eingeleitet wurde. Dafür kamen die Löschnägel an fünf Stellen je Gefach zum Einsatz. Drei Stellen gleichmäßig über die Breite im oberen Bereich und zwei Stellen im mittleren Bereich. Die Anwendung des Löschnagels dauerte nur eine Minute. 30 Minuten nach der Ofenentnahme sind Hotspots im unteren Bereich der Probekörper erkennbar, weshalb nach 35 min in diesen Bereichen erneut gelöscht wurde. 45 und 60 Minuten nach Beobachtungsbeginn sind mehrere Hotspots zu erkennen. Um zu überprüfen, ob diese verlöschen oder an Intensität gewinnen, wurde nicht erneut gelöscht. Es ist zu sehen, dass einer der Hotspots an Intensität gewinnt. Dennoch ist eine vollständige Entzündung nicht mehr möglich. Abbildung 8 zeigt die Bauteilschichten nach Versuchsende.

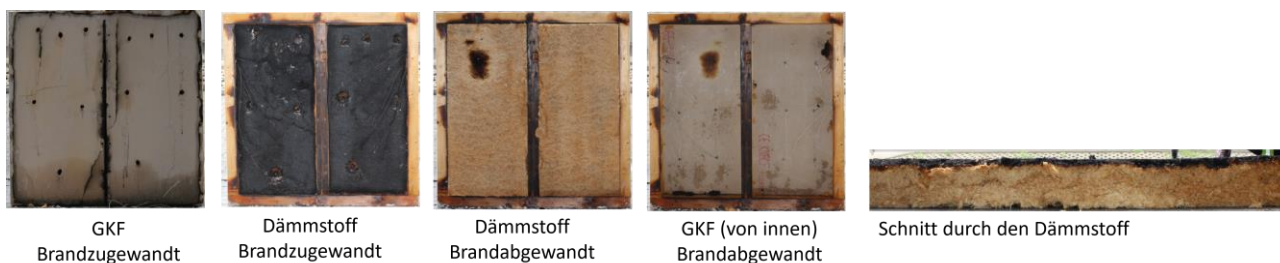


Abbildung 8: Probekörper von Löschversuch 5 nach Versuchsende

Insbesondere der Schnitt durch den Dämmstoff zeigt, dass dieser nur oberflächlich verbrannt ist. Demgegenüber war der Dämmstoff bei dem Versuch ohne Löschangriff vollständig umgesetzt. Dies verdeutlicht, dass die Einbringung des Löschwassers die Gefahr der Brandausbreitung deutlich reduziert hat, aber die Kontrolle des Löscherfolgs sehr aufwendig ist. Anders als in diesem Versuch würde die Feuerwehr einen noch aktiven und bekannten Hohlraumbrand nicht ignorieren, sondern nochmals löschen und erneut kontrollieren. Die übrigen Löschversuche sollen in diesem Rahmen nicht dezidiert analysiert werden. Die wichtigsten Erkenntnisse sind, dass der Löschnagel

- möglichst oberhalb des Hohlraumbrands angesetzt werden sollte, da das Löschwasser vor allem nach unten fließt und
- nach dem Löschen des Bauteils, dieses nach mindestens 20 min kontrolliert werden muss, um sicherzustellen, dass der Hohlraumbrand tatsächlich verloschen ist.

Zusammenfassend besteht durch den Einsatz von Löschnägeln die Gefahr des Wasserschadens für angrenzende Gefache. Außerdem ist die Bewertung des Löscherfolgs zeitintensiv. Da das Gefach durch den Hohlraumbrand sowieso geschädigt wurde und dementsprechend ausgebessert werden muss, kann das Gefach auch mit Kettensäge geöffnet werden, ohne zusätzliche Schäden zu verursachen. Der Löschnagel kann eingesetzt werden, um die Intensität oder Ausbreitungsgeschwindigkeit des Hohlraumbrands zu verringern. Dies kann bspw. notwendig sein, wenn das Öffnen des Bauteils aufgrund von anderen Einsatzziele nicht möglich ist oder wenn so viele Gefache betroffen sind, dass das Öffnen erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt möglich ist. Es ist zu bemerken, dass bei Schwelbränden der OSB-Platte die Löschnägel auch nur in dem Bereich des Hohlraumbrandes, eingesetzt werden müssen. Dieser befindet sich, wie bereits beschrieben, im Bereich von Fehlstellen. Auch hier zeigte sich, dass der Löschnagel im oberen Bereich des Hohlraumbrandes eingesetzt werden muss.

1.2.1.4 Versuchszusammenfassung

Die folgenden Erkenntnisse konnten aus den Ofenversuchen gewonnen werden.

1. Hohlraumbrände können bei der Verwendung brennbarer Dämmstoffe oder der Verwendung von OSB-Platten auftreten, wobei die Einleitung und Branddynamik dieser Brände bei beiden Varianten unterschiedlich ist.
2. An Schwachstellen, insbesondere Lichtschaltern und Steckdosen werden Brände besonders schnell in die Bauteile eingeleitet.
3. Deckenelemente sind deutlich unkritischer in Bezug auf Hohlraumbrände.
4. Die Detektion mittels Wärmebildkamera ist sehr zeitintensiv, weil allein Absoluttemperaturen keine Aussagen zulassen. Vielmehr müssen an den selben Stellen mehrfach Temperaturmessungen durchgeführt werden, um Temperaturdifferenzen zu bestimmen
5. CO eignet sich als Leitgas zur Identifikation von Hohlraumbränden.
6. Löschen mit Löschnägeln ist sehr zeitintensiv, auch weil der Löscherfolg bzw. Misserfolg mit der Wärmebildkamera erst nach mehreren Minuten sichtbar wird. Stattdessen sollte der Hohlraumbrand unter Verwendung von Gasmesstechnik lokalisiert und durch gezielte Öffnungen mit der Kettensäge entfernt werden.

Zu 1. Baustoffe in denen Hohlraumbrände auftreten

Die Experimente zeigten, dass sich sowohl die Initiierung als auch die Ausbreitung des Hohlraumbrands bei der Verwendung von brennbaren Dämmstoffen und OSB-Platten unterschieden. Bei der Verwendung von brennbaren Dämmstoffen ist eine Entzündung durch die Wand möglich. Dies tritt beispielsweise bei einer Bekleidung des Gefachs mit einer 18 mm GKF Platte nach ca. 30 min auf. An Schwachstellen wie Steckdosen und Lichtschaltern genügt bereits eine kurze Brandbeanspruchung von 5 min aus, um einen Hohlraumbrand zu induzieren. Demgegenüber schützt die OSB-Platte den dahinterliegenden Dämmstoff. Eine Entzündung durch 18 mm GKF und 15 mm OSB ist in 30 min nicht möglich. Allerdings können Hohlraumbrände an Schwachstellen wie Steckdosen oder Lichtschaltern in die Konstruktion gelangen. Daraus ist ersichtlich, dass eine effektive Brandbekämpfung mit der Erkundung des Wandaufbaus beginnt. Ist der Wandaufbau bekannt, können Hohlraumbrände oder Möglichkeiten, wo diese in die Konstruktion gelangten, unter Umständen ausgeschlossen werden.

Zu 2. Schwachstellen sind entscheidend bei der Hohlraumbrandeinleitung

An Fehlstellen wie Steckdosen und Lichtschaltern konnten Hohlraumbrände besonders gut in die Konstruktion gelangen. Bei der Verwendung von brennbarem Dämmstoff trat dies bereits nach 5 min auf. Bei der Verwendung von OSB-Platten konnte der Hohlraumbrand ausschließlich an diesen Schwachstellen eingeleitet werden. Die Erkundung von lokalen Schwächungen in der brandschutztechnischen Bekleidung ist damit essenziell.

Zu 3. Deckenbauteile sind in Bezug auf Hohlraumbrände weniger kritisch.

Bei den Deckenelementen konnten im Bauteilofen keine anhaltenden Hohlraumbrände festgestellt werden. Auch bei einfacher (1 x 18 mm GKF) brandschutztechnischer Bekleidung und Fehlstellen verloschen die Bauteile. Gasmessungen zeigten, dass der Sauerstoff im Bauteil nahezu vollständig in CO₂ und CO umgesetzt wurde. Nur mit Öffnungen im oberen Bereich des Bauteils, welche in der Realität nicht vorkommen, kam es zu langanhaltenden Hohlraumbränden. Wurden die Öffnungen wieder verschlossen, verloschen diese Brände. Eine Detektion und die Vorgehensweise von Löschmaßnahmen konnten daher nicht untersucht werden. Die Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass die hier untersuchten Deckenelemente hinsichtlich der Gefahr eines Schwelbrands unkritischer als Wandelemente sind.

Zu 4. Detektion mittels Wärmebildkamera ist sehr zeitaufwendig

Die Detektion von Hohlraumbränden mit Wärmebildkamera ist möglich, allerdings sehr zeitintensiv. Die Bauteiloberflächen durch den initialen Brand müssen erst abkühlen, bis der Hohlraumbrand sichtbar wird. Dies ist besonders schwierig, wenn der Dämmstoff durch die Brandschutzbekleidung hindurch entzündet wird. Anders als bei der Entzündung an Fehlstellen, bei der lokale Hotspots entstehen, wird der Hohlraumbrand großflächig erzeugt. Deshalb ist es notwendig, den Temperaturverlauf über einen längeren Zeitraum zu beobachten, was sich mit den handgehaltenen Wärmebildkameras der Feuerwehr bereits im Labormaßstab als schwierig herausstellte. Mit den wissenschaftlichen Wärmebildkameras, die als Vergleich zu den Einsatzmitteln der Feuerwehren verwendet wurden, war die Überwachung und Detektion einfacher möglich, allerdings stehen diese den Einsatzkräften nicht zur Verfügung.

Zu 5. CO kann zur Detektion von Hohlraumbränden genutzt werden

Bei einem Schmelbrand werden große Mengen an Atemgiften freigesetzt. Hierbei muss speziell auf CO hingewiesen werden, dass sehr giftig ist und durch Wände diffundieren kann, wodurch es eine Gefahr für Personen in angrenzenden Wohnungen darstellt [5]. Gleichzeitig sorgen diese Eigenschaften dafür, dass CO sich sehr gut dazu eignet, Hohlraumbrände im Inneren der Bauteile zu detektieren. Dadurch kann bei einfachen Wandaufbauten ein Hohlraumbrand durch die Messung auf der Wandoberfläche festgestellt werden, ohne diese zu beschädigen. Bei mehrschichtigen Wandaufbauten ist eine Lokalisierung eines Hohlraumbrandes mittels gezielter Bohrungen und der Konzentrationsmessung im Inneren eines Gefaches möglich. Bei den Ofenversuchen konnte CO bereits in der Ofenphase durch die Bekleidung der abgewandten Seite detektiert werden.

Zu 6. Löschen mit Löschnagel

Das Löschen der Hohlraumbrände wurde mit Löschnägeln untersucht. Hier zeigte sich, dass der Löscherfolg bzw. Misserfolg erst nach einiger Zeit anhand von Wärmebildkameras sichtbar wird. Die Untersuchungen zu diesem Thema haben gezeigt, dass der Einsatz eines Löschnagels oberhalb des Glutnestes erfolgen muss. Andernfalls setzt sich der Hohlraumbrand im oberen Bereich des Glutnestes fort.

Fazit

Mit den durchgeführten Versuchen konnte das Brandverhalten typischer Wände im Holzbau untersucht werden. Dabei sind Bauteilschichten, in denen sich ein Hohlraum- bzw. Schmelbrand entwickeln kann, identifiziert worden. Weiterhin konnten die Grenzen und Möglichkeiten bei der Detektion von Hohlraumbränden mittels Wärmebildkameras identifiziert werden. Als Alternative bzw. Ergänzung für die Lokalisierung von Hohlraumbränden konnte das Potenzial von CO-Messungen mit vorhandener Einsatzrüstung der Feuerwehr evaluiert werden. Das Löschen von Hohlraumbränden durch Löschnägel konnte untersucht und eine Vorgehensweise für Einsatzkräfte erarbeitet werden.

1.2.2 Konzeption eines Brandcontainers

Die Containerversuche sollten zeigen, dass die Ergebnisse der Ofenversuche auf reale Brände übertragen werden können. Zum einen wurden im Container, im Gegensatz zum gasbefeuerten ETK-Ofen, Holzkrippenfeuer verwendet, zum anderen war die Größe der Gefache mit realen Holzrahmenwänden vergleichbar.

1.2.2.1 Versuchsaufbau Brandcontainer

Der Aufbau des Brandcontainers ist in Abbildung 9 dargestellt. Es ist ein 12 Fuß Überseecontainer, der mit einer 5 cm dicken Isolierschicht (Schmelzpunkt des Dämmmaterials > 1700 °C) ausgestattet ist und eine Wandöffnung für den Einbau von Probekörpern mit einer Breite von 1935 mm und einer Höhe von 2000 mm besitzt. Außerdem ist eine Deckenöffnung von 2020 mm x 1776 mm vorhanden, um Deckenelemente zu untersuchen. Um einen realistischen Raumbrand zu ermöglichen, hat der Container eine Türöffnung von 820 mm Breite und 2000 mm Höhe. Das ermöglicht eine realistische Temperatur- und Rauchgasschichtung.

Als Brandlast wurde bei jedem Versuch eine Holzkrippe aus 40 x 40 x 1000 mm großen Fichtenstäben verwendet. Zwölf Stäbe wurden gleichmäßig auf einer Breite von einem Meter verteilt und bildeten eine Lage. Die Holzkrippe bestanden aus 14 dieser Lagen, wobei jede Lage um 90° zur vorherigen Lage gedreht war. Die Krippen hatten eine Gesamtmasse von 150 kg. Die Feuchtigkeit der Stäbe wurde an 3 Stäben ermittelt und betrug zwischen 10,6 % und 13,3 %. Mit Hilfe von einem Liter n-Heptan, das in eine Brandwanne unterhalb der Krippe positioniert war, erfolgte die Zündung.

Zur Messung der Temperaturen im Container wurden Thermoelemente an den in Abbildung 9 dargestellten vertikalen Messachsen „Ecke“, „Tür“, „Probekörper“ und „Brandstelle“ in verschiedenen Höhen verwendet. Diese hatten einen vertikalen Abstand von 43 cm zueinander, wobei das unterste Thermoelement 10 cm vom Boden entfernt war. Die Höhen werden nachfolgend mit H1 bis H6 bezeichnet, wobei H1 das unterste und H6 das höchste Thermoelement ist. Wie in Abbildung 9 angedeutet, wurden nicht an allen vertikalen Messachsen sechs Thermoelemente verwendet. An der Achse „Tür“ wurde auf H6 verzichtet, weil sich diese Messstelle

oberhalb der Tür befindet. An der Messachse „Brandstelle“ wurde auf die Messstellen H1 und H2 verzichtet, da sich diese sonst im Inneren der Krippe befinden würden.

Zur Bestimmung der Ventilationsbedingungen im Container wurden Differenzdruckaufnehmer mit bidirektionalen Sonden mit einem Innendurchmesser von 18 mm verwendet. Sie wurden vor der Türöffnung in Höhe der Thermoelemente positioniert. Die Messung der Druckdifferenz und der Temperatur erlaubt die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten der durch die Tür zugeführten bzw. abgeführten Gase. Die detaillierte theoretische Grundlage für das Messprinzip der Sonden ist in [14] zu finden. Die Thermoelemente und bidirektionalen Sonden im Türbereich wurden bei Durchführung der Löschmaßnahmen entfernt, um einen besseren Zugang zum Inneren des Containers zu ermöglichen. Weiterhin wurden die verbrauchte Löschwassermenge und der Druck der Löschwasserversorgung messtechnisch erfasst.

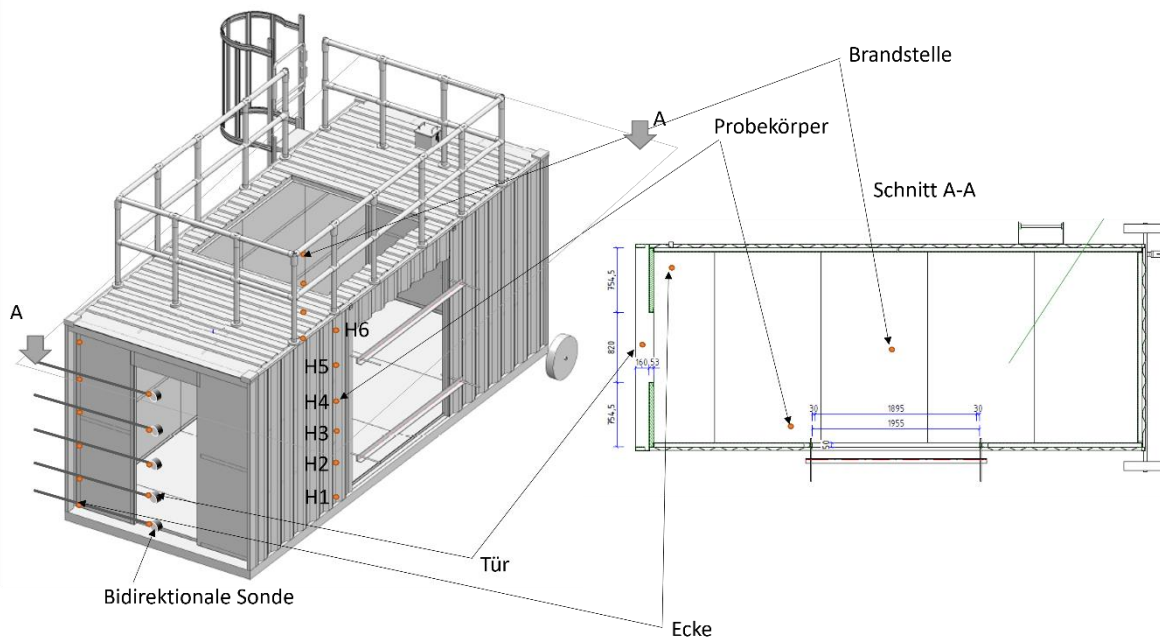


Abbildung 9: Umgebauter 6 Fuß Brandcontainer, mit Öffnungen für Probekörper, Geländer im Deckenbereich, Türöffnung, Abluftklappe, Thermoelementen (orange) und bidirektionalen Sonden.

Die Versuche im Container wurden außerdem mit Video- und Wärmebildkameras dokumentiert. Abbildung 10 visualisiert den Versuchsaufbau und zeigt die Position der Kameras (Wärmebild und visuelles Bild). Die Kameras, die durch die Tür den Probekörper von innen aufnahmen, standen in einem spitzen Winkel zum Probekörper, wodurch die Bilder verzerrt sind.

Tabelle 6 zeigt die Messgeräte, die bei den Containerversuchen verwendet wurden.

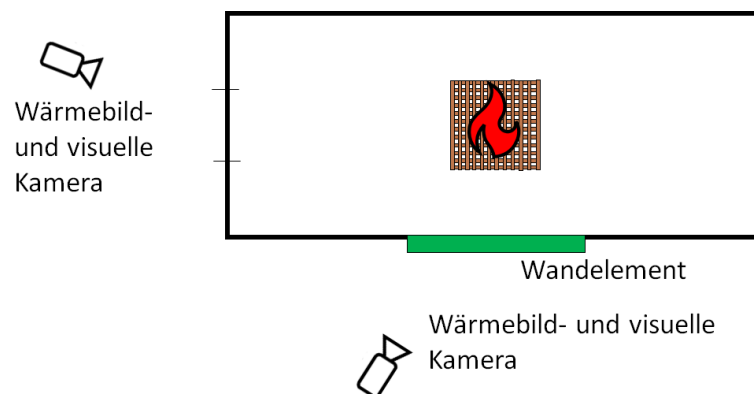


Abbildung 10: Versuchsaufbau der Containerversuche, mit dem Krippenfeuer, dem eingebauten Wandelement und den Kameras.

Tabelle 6: Verwendete Messgeräte

Gerät	Ziel
Videokamera	Visuelle Dokumentation des Brandverlaufs
GoPro	Visuelle Dokumentation des Brandverlaufs
Fotoapparat	Visuelle Dokumentation des Versuchs
Wärmebildkamera	Dokumentation der Temperaturen auf der Bauteiloberfläche
Handgehaltene WBK	Dokumentation der Temperaturen auf der Bauteiloberfläche
Thermoelemente	Temperaturen im Container und im Inneren der Bauteile
CO-Warner	Gerät für die Detektion von Hohlraumbränden
Durchflusssensor	Wassermenge beim Löschen des Containerbrands
Differenzdruckaufnehmer	Bestimmung der Luftgeschwindigkeit der Ventilationsöffnung

1.3 Arbeitspaket 3: Experimentelle Untersuchung und Optimierung geeigneter Löschtechnik und –taktik unter Zuhilfenahme von Einsatzmitteln, wie Wärmebildkameras

Seitens des IBK wurde im AP 3 federführend das Teilarbeitspaket 3.3 „Bewerten der Anwendung von Löschtechniken und Löschmitteln bezüglich des Löscherfolges von Konstruktions- und Hohlraumbränden sowie deren Auswirkung auf die Daten einer Wärmebildkamera“ bearbeitet.

Ziele:

- Validierung der Nutzung von Wärmebildkameras über alle Phasen der Brandbekämpfung sowie anderer Gerätschaften
- Validierung der Handhabung von Einsatztechnik und Löschmittel in Kombination mit den Daten einer Wärmebildkamera
- Zusammenstellung der optimal wirkenden Löschtechnik und Löschmittel
- Ausarbeiten der optimalen Vorgehensweise für die Versuche im Realmaßstab im AP 4

1.3.1 Brandversuche im Brandcontainer

Für die Validierung der Erkenntnisse der Ofen- und Öffnungsversuche wurden gemeinsam mit den Projektpartnern Brandversuche in dem o.g. feststoffbefeuereten Brandcontainer durchgeführt.

1.3.1.1 Versuchsdurchführung im Brandcontainer

In diesem Arbeitspaket wurden vier Versuche in dem in Abbildung 11 dargestellten Brandcontainer durchgeführt. Tabelle 7 zeigt die Untersuchungsmatrix. Zwei der Versuche waren Langzeitversuche, bei denen die Übertragbarkeit des Brandverhaltens der Ofenversuche auf größere Maßstäbe nachgewiesen werden sollte. Die anderen beiden Versuche wurden gemeinsam mit Einsatzkräften der Feuerwehr Hamburg durchgeführt. Der Fokus dieser Versuche lag auf der Detektion und Öffnung der Probekörper. Im Anhang sind Bilder und Temperaturkurven am Probekörper abgebildet.

Tabelle 7: Durchgeführte Containerversuche

Versuch	Wand/ Decke	Bekleidung	Dämmstoff	Dauer- (D), Lösch- versuch (L)	Brand- dauer in min
1	Wand	18 mm GKF	Holzfaser	D	36
1	Decke	Sparschalung 18 mm GKF	Holzfaser	D	36
2	Wand	Außenwand	Holzfaser und Steinwolle	L	32
2	Decke	OSB + 2 x 18 mm GKF	Holzfaser	L	32
3	Wand	Außenwand	Holzfaser und Steinwolle	L	32
3	Decke	OSB + 2 x 18 mm GKF + Deckenaufbau	Holzfaser	L	32
4	Wand	OSB + 18 GKF	Steinwolle	D	39
4	Decke	OSB + 2 x 18 mm GKF + Deckenaufbau	Steinwolle	D	39



Abbildung 11: Fotos des Brandcontainers während des Versuchs

1.3.1.2 Versuchsauswertung Brandcontainer

Bei den Langzeitversuchen zeigte sich, dass der Brandverlauf mit dem der Ofenversuche vergleichbar ist. Beim ersten Versuch wurde ein Wandelement mit 18 mm GKF, Holzfaserdämmstoff und ohne Fehlstelle untersucht. Wie im Ofen kam es in den Bauteilen zu einem Schwelbrand. Mit Hilfe einer Wärmebildkamera und eines CO-Messgeräts, welche auch bei Feuerwehren zur Verfügung stehen, war die Detektion möglich. Bei diesem Versuch traten in zwei der drei Gefache Schwelbrände auf. Anders als in den Ofenversuchen blieben die Mittelständer intakt und der Schwelbrand breitete sich nicht auf das benachbarte Gefach aus. Das kann wahrscheinlich darauf zurückgeführt werden, dass der Containerversuch im Winter (Minusgrade) und der Ofenversuch im Sommer und Herbst durchgeführt wurden, wodurch andere Randbedingungen vorlagen. Anders als bei den Ofenversuchen wurden die Bauteile nicht gleichmäßig mit Wärme beaufschlagt, sondern durch die Thermik im oberen Bereich deutlich stärker als im unteren Bereich. Dadurch traten Hohlraumbrände im oberen Bereich der Wandelemente auf.

Bei den Öffnungs- und Löschversuchen mit der Feuerwehr Hamburg wurde zusätzlich zur Holzkrippe an mehreren Stellen im Gefach Schwelbrände mittels Heizpatronen initial erzeugt. Es zeigte sich, dass eine Detektion mit Wärmebildkameras aufgrund der Wanddicke und der Vielzahl an Schichten kaum möglich war. Demgegenüber konnte die Lage des Hohlraumbrandes mit dem CO-Sensor sehr genau bestimmt werden. Durch die initiale Zündung mittels Heizpatrone wurde auch im Deckenelement ein Hohlraumbrand erzeugt und mit dem Gasmessgerät detektiert. Es zeigte sich, dass es für eine erfolgreiche Detektion von Hohlraumbränden mittels CO-Messgerät notwendig ist, den Brandraum vor der Messung intensiv zu lüften. Andernfalls sammeln sich die Brandgase im Deckenbereich, wodurch die Detektion mittels Gasmessgeräten nicht möglich ist. Die mit den Ofenversuchen erarbeitete Vorgehensweise der Einsatzkräfte konnte durch die gemeinsamen Versuche mit der Feuerwehr Hamburg validiert und präzisiert werden. Es bestätigte sich, dass Hohlraumbrände auch bei komplexen Bauteilen gefunden werden können, wenn die Einsatzkräfte mit geeigneten Messgeräten vorgehen.

1.3.1.3 Versuchszusammenfassung Brandcontainer

Die wesentlichen Erkenntnisse der Containerversuche sind:

1. Das Brandverhalten der Bauteile bei den Containerversuchen ist mit dem der kleineren gasbeflammten Bauteile bei den Ofenversuchen vergleichbar.
2. Allerdings sind durch die Thermik des Innenbrandes besonders die oberen Bereiche der Wandbauteile hinsichtlich einer Hohlraumbrandeinleitung gefährdet.
3. Wird ein Hohlraumbrand nicht an der brandbeanspruchten Seite in die Konstruktion geleitet, sondern gelangt bspw. durch die Elektrik oder eine seitliche Weiterleitung in das Bauteil, ist die Wärmebildkamera für die Detektion nicht ausreichend.
4. CO-Messungen sind für die Lokalisierung von Hohlraumbränden geeignet.
5. Brandräume müssen vor der Anwendung von Gasmesstechnik ausreichend gelüftet werden.

1.3.2 Untersuchung zur Wurfhöhe unterschiedlicher Strahlrohre

In Vorbereitung auf die Großversuche des Arbeitspaketes 4 wurde die Wurfhöhe von Strahlrohren ermittelt. Da die Versuchshöhe bei den Großversuchen auf 12 m (Oberkante des Versuchsaufbaus) begrenzt war, musste dabei die abgegebene Wassermenge reduziert werden, um das Löschen von Fassaden in einer Höhe von 25 m zu simulieren.

Um zu ermitteln, wie viel Wasser mit den untersuchten Strahlrohren löschwirksam wird, wurde ein Auffangbehälter mit einer Öffnung von 800 x 800 mm mit der Drehleiter in verschiedene Höhen gezogen. Das aufgefangene Wasser wurde mit Schläuchen in einen zweiten Behälter transportiert und dort gewogen. Auf diese Weise konnte die Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit der Höhe ermittelt werden. Abbildung 12 verdeutlicht den Versuchsaufbau. Die ermittelten Wurfhöhen und die Beaufschlagungsdichten sind in Tabelle 8 aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass die Beaufschlagungsdichte aus dem aufgefangenen Volumenstrom und der verwendeten Öffnung von 0,64 m² bestimmt wird. Da die Öffnung kleiner als 1 m² ist, können sich Massenbeaufschlagungen ergeben, die Größer sind als der abgegebene Volumenstrom sind. Diese Beaufschlagungsdichte bezieht sich auf die untersuchte Öffnungsgröße. Bei einer Öffnung von 1 m² kann maximal der abgebende Volumenstrom erreicht werden.

Tabelle 8: Ermittelte Wurfhöhe von Strahlrohren.

Einsatzmittel	Höhe in m	Druck in bar	Volumenstrom am Strahlrohr in l/min	Beaufschlagungsdichte in l/(min*m ²)
B-Hohlstrahlrohr	8	7,5	511,5	719,7
	16	7,3	535,9	329,4
	25	9,5	1239,4	157,2
	25	11,2	1338,0	426,6
B-Mehrzweckstrahlrohr	8	6,6	414,1	661,6
	16	Sensor defekt	407,1	328,1
	25	9,6	498,6	54,0
C-Hohlstrahlrohr	8	4,9	191,3	268,9
	16	6,4	423,6	339,6

Es konnte gezeigt werden, dass mit einem B-Mehrzweckstrahlrohr in eine Höhe von 25 m eine Wassermenge von 54 l/min*m² bei einem Abstand von 9,6 m aufgebracht werden kann. Für eine erfolgreiche Brandbekämpfung ist die Energieabsorptionsgeschwindigkeit von großer Bedeutung, aus der der zum Löschen benötigte Wasservolumenstrom resultiert. In [15] wurde untersucht, welche Wassermenge notwendig ist, um einen Normholzstapel zu löschen. Es wurde gezeigt, dass 14 l/min m² notwendig sind. Die Fläche bezieht sich auf die Bodenfläche des Stapels. Von [16] wurde experimentell eine optimale Beaufschlagungsdichte von 6,5 l/min*m² Bodenfläche einer Wohnung ermittelt. Der Fall Fassade ist deutlich unkritischer als der untersuchte Holzstapel, da geringere Wärmefreisetzungen auf Grund der geringeren Oberfläche und geringeren Brandlast zu erwarten sind. Dennoch ist die aufgebrachte Wassermenge größer als die ermittelte erforderliche Menge. Damit ist die Wassermenge ausreichend, um einen Fassadenbrand zu löschen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass eine Wurfhöhe von 25 m nur erreicht wurde, wenn keine Windböe auftrat. Die Höhe ist dementsprechend nur unter der Einschränkung geringer Windstärken erreichbar. Da diese Untersuchung durchgeführt wurde, um zu untersuchen, ob ein Fassadenbrand in für die Drehleiter unzugänglichen Bereichen gelöscht werden kann, ist die Anwendung vor allem an Positionen, an denen geringen Windgeschwindigkeiten herrschen, geeignet.

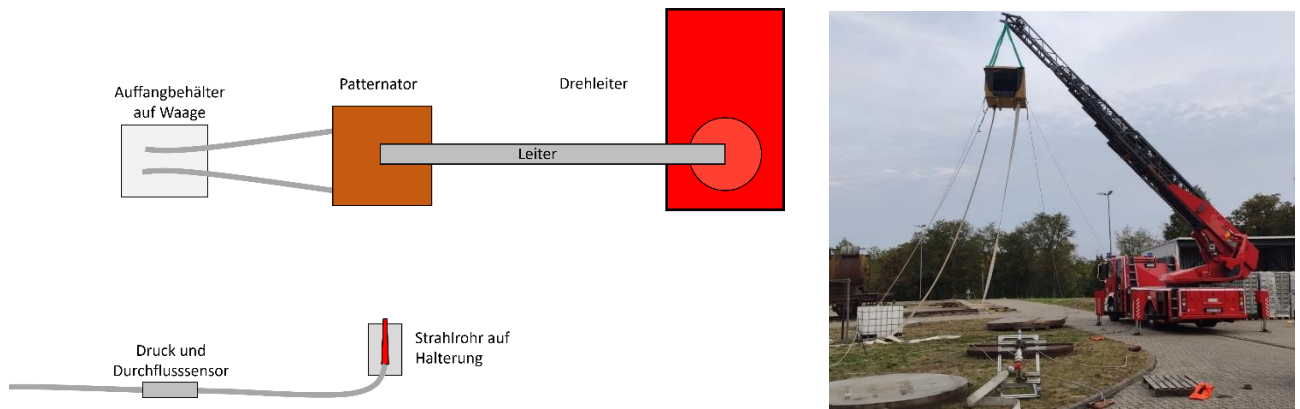


Abbildung 12: links, Skizze des Versuchsaufbaus, rechts Foto des Versuchsaufbaus

1.3.3 CO-Permeation durch Dampfsperren

Die Permeation durch Wände und Baustoffe wie Gips wurde in [6] und [5] untersucht. Die bei Außenwandbauteilen verwendeten Dampfsperren wurden in den Projekten nicht untersucht. Daher wurde die Permeation von CO durch Dampfsperren mit dem gleichen Versuchsaufbau wie in [5] untersucht. Abbildung 13 zeigt, dass die Permeation von CO durch Dampfsperren um Größenordnungen kleiner als durch Gips. Das Messen von im Inneren eines Gefachs vorliegendem CO und damit die Detektion von Hohlraumbränden ist bei der Verwendung von Dampfsperren von außen nicht möglich. Um Hohlraumbrände in Auswandbauteilen mit CO-Messungen nachzuweisen, müssen die Dampfsperren dementsprechend zerstört werden. Dies kann beispielsweise mittels Bohrmaschine erfolgen. Die CO-Konzentration kann dann an dem Loch gemessen werden.

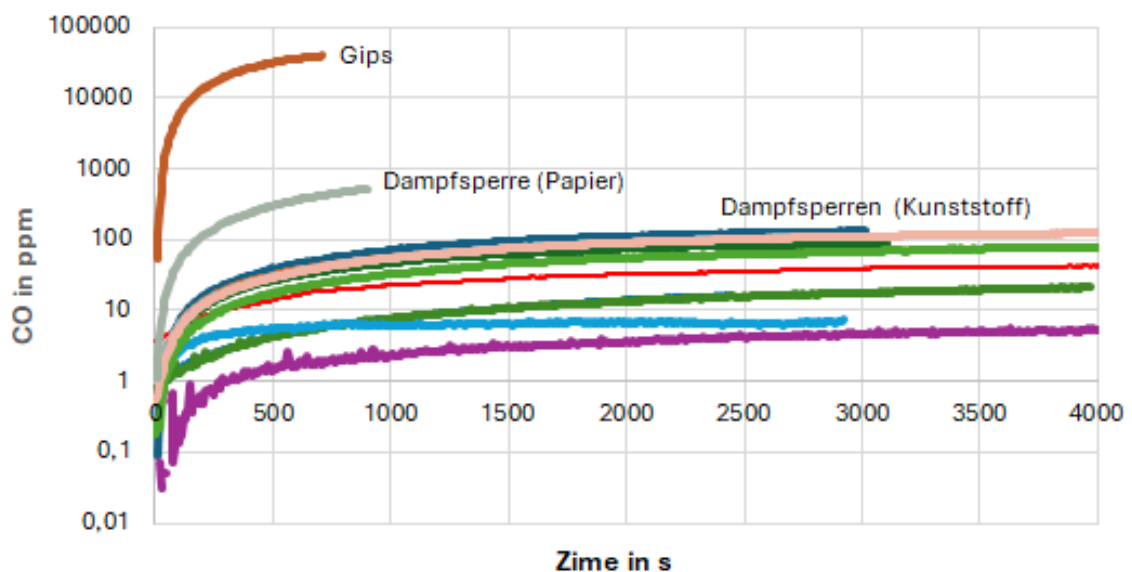


Abbildung 13: CO-Permeation durch Gips und verschiedene Dampfsperren.

1.3.4 CO-Ausbreitung in Holzrahmenbauteilen

Wie bereits dargestellt wird bei verdeckten Hohlraumbränden CO freigesetzt. Für die Detektion dieser Brände durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr mittels Gasmesstechnik ist es entscheidend, die Ausbreitungsgeschwindigkeiten innerhalb eines Gefachs und gefachübergreifend zu kennen. Umso schneller sich CO innerhalb eines Gefachs ausbreitet, desto weniger Messpunkte und Zeit für Wiederholungsmessungen werden benötigt, um das Gas nachzuweisen bzw. auszuschließen. Die Ausbreitung in Nachbargefache kann wiederum dazu führen, dass Hohlraumbrände fälschlich angenommen werden. Aus diesem Grund wurde die Ausbreitung von CO innerhalb eines Gefachs und auf Nachbargefache mittels Mehrgasmessgeräten untersucht. Dafür wurde ein Hohlraumbrand mittels Heizpatrone (23 min 46 V 0,26 A) mittig im Gefach erzeugt. Abbildung 14 zeigt beispielhaft die Ausbreitung von CO bei einem Bauteil mit Holzfaserdämmung. Neben dem hier dargestellten Experiment wurde die Ausbreitung bei zwei weiteren Dämmstoffen untersucht. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass bei der Verwendung von Dampfsperren, ohne Bohrungen keine CO-Detektion möglich ist. Bei den Versuchen verwendeten die Einsatzkräfte Kupferrohre und Verschlusskappen, um den Hohlraumbrand durch die Bohrungen nicht zu beeinflussen. Die

Kupferrohre erwiesen sich als sehr effektiv, weil die CO-Konzentration gezielt im Hauptgefach gemessen werden konnten. Auf diese Weise wurde eine davor befindliche Installationsebene überbrückt werden.

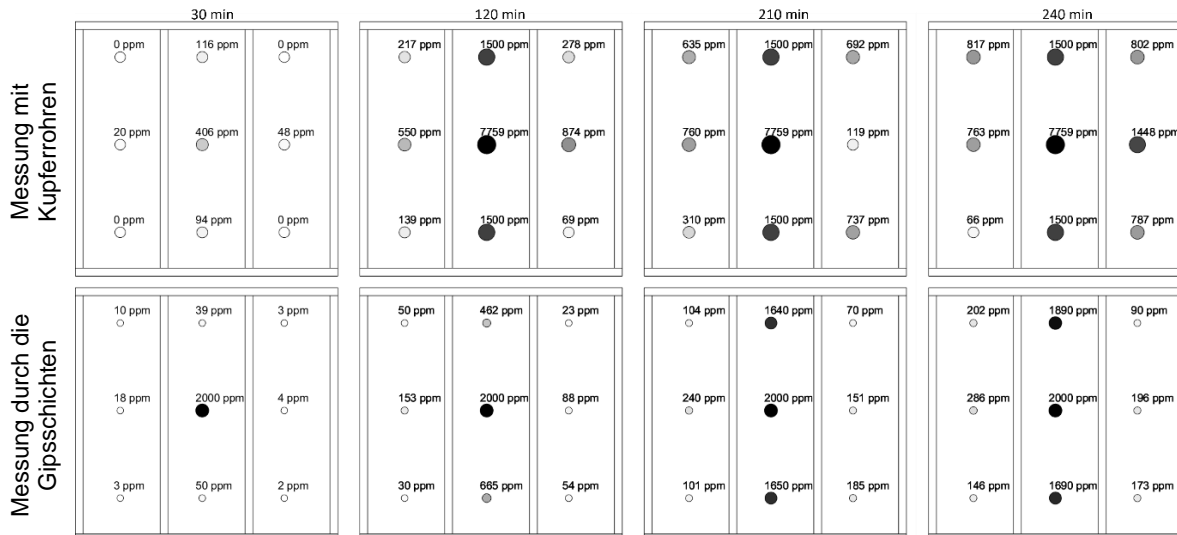


Abbildung 14: Ausbreitung von CO innerhalb des Gefachs und gefachübergreifend. Die obere Darstellung zeigt die Messung mit Kupferrohren, die eine Installationsebene überbrücken, die untere Darstellung zeigt die Messung durch eine 18 mm dicke Gipsplatte.

1.4 Arbeitspaket 4: Ermittlung von charakteristischen Kenngrößen bei der Anwendung geeigneter Löschmittel und -techniken im Realmaßstab

Seitens des IBK wurde im Arbeitspaket 4 federführend das Teilarbeitspaket 4.3 bearbeitet.

Arbeitspaket 4.3: Wissenschaftliche Begleitung der Versuche im Realmaßstab mit Fokus auf die Kenngrößen der Brandbekämpfung und weiterer einsatzspezifischer Kenngrößen

Ziele:

- Bestätigung der erarbeiteten Handhabung der Wärmebildkameras über alle Phasen des Brandeinsatzes (Detektion, Öffnungsmaßnahmen, Löschmitteleinsatz) aus den AP 2-3.
- Erfassung der erforderlichen einsatzspezifischen Rahmenbedingungen als Richtwerte für die Brandbekämpfung von Hohlraum- und Konstruktionsbränden.
- Erarbeiten von Video- und Bildmaterial für die Erstellung von Ausbildungs- und Übungsszenarien im AP 5

1.4.1 Versuche im Realmaßstab

Bei Großversuchen am Zentrum für Brandschutzforschung (ZeBra) wurden die oben vorgestellten Projektergebnisse validiert. Die Schwerpunkte waren die Anwendung der erarbeiteten Brandbekämpfungsstrategie für Hohlraumbrände und die Brandbekämpfung von Fassadenbränden ohne Drehleiterzugang. Der Umfang dieser Versuche ist so groß, dass eine ausführliche Darstellung im Rahmen dieses Berichts aufgrund der limitierten Seitenanzahl nicht möglich ist. Die Versuche sollen in zukünftigen Veröffentlichungen dezidiert beschrieben werden. Im Anhang können jedoch Bilder zur Veranschaulichung eingesehen werden.

1.4.1.1 Angewendete Einsatztaktik

Die erarbeitete Einsatztaktik, die bei den Großversuchen eingesetzt wurde, ist in Abbildung 15 dargestellt. Bei dieser Vorgehensweise wird zunächst der Brandraum erkundet. Kann ein Hohlraumbrand nicht ausgeschlossen werden, weil brennbare Baustoffe wie brennbare Dämmstoffe oder OSB-Platten vorhanden sind, wird eine Sichtprüfung durchgeführt. Bei der Sichtprüfung werden Fehlstellen wie Lichtschalter, Steckdosen und Risse lokalisiert. Außerdem werden die Wände und Decken nach austretendem Rauch und sichtbaren Flammen abgesucht. Werden diese festgestellt, wird das Bauteil geöffnet und der Brand bekämpft. Ein besonderes Augenmerk muss hier auf die besonders stark beanspruchten Bereiche, also in der Nähe der Brandstelle und im oberen Bereich des Raums (wegen der Temperaturschichtung), gelegt werden. Das Beachten des Weißbrands kann dabei hilfreich sein. Durch den sich anschließenden Einsatz der Wärmebildkamera wird der Brandraum nach Hotspots abgesucht. Dabei wird ein wesentlicher Fokus auf die bereits lokalisierten Fehlstellen gelegt. Eine Brandeinleitung an diesen Bereichen ist deutlich wahrscheinlicher als in Bereichen ohne Fehlstellen. Die Wärmebildkamera muss soweit möglich auf niedrige Temperaturbereiche eingestellt werden. Die Temperaturen und Zeitpunkte müssen notiert werden, um den

Temperaturverlauf zu ermitteln. Dies kann beispielsweise direkt an der Wand passieren. Während die Wärmebildkamera in der Lage ist, schnell große Bereiche abzusuchen, kann das Mehrgasmessgerät nur punktuell eingesetzt werden. Aus diesem Grund liegt der Fokus der Gasmessung auf verdächtigen Stellen wie den ermittelten Hotspots und Fehlstellen. Es ist zu beachten, dass bei Außenwandbauteilen Dampfsperren verwendet werden, welche zerstört werden müssen, um die CO-Konzentration im Bauteil zu ermitteln. Bei allen anderen Bauteilen kann die CO-Messung entweder direkt durch die Bekleidung oder ebenfalls durch Bohrungen erfolgen. Es ist zu beachten, dass Mehrgasmessgeräte der Feuerwehren nicht für die hohen CO-Konzentrationen in den Bauteilen (Prozentbereich) ausgelegt sind. Der Einsatz muss demzufolge stets vorsichtig erfolgen, um die Messgeräte nicht zu beschädigen. Beim anschließenden Einsatz der Wärmebildkamera wird überprüft, ob sich die Bauteile auf unter 40 °C abgekühlt haben. Wenn die Temperaturen um mindestens 30 K gefallen sind, müssen die Bauteile weiter beobachtet, andernfalls ist ein Hohlraumbrand wahrscheinlich und eine Intervention notwendig. Diese Wert wurden aus den ermittelten Temperaturverläufen der Ofenversuche abgeschätzt.

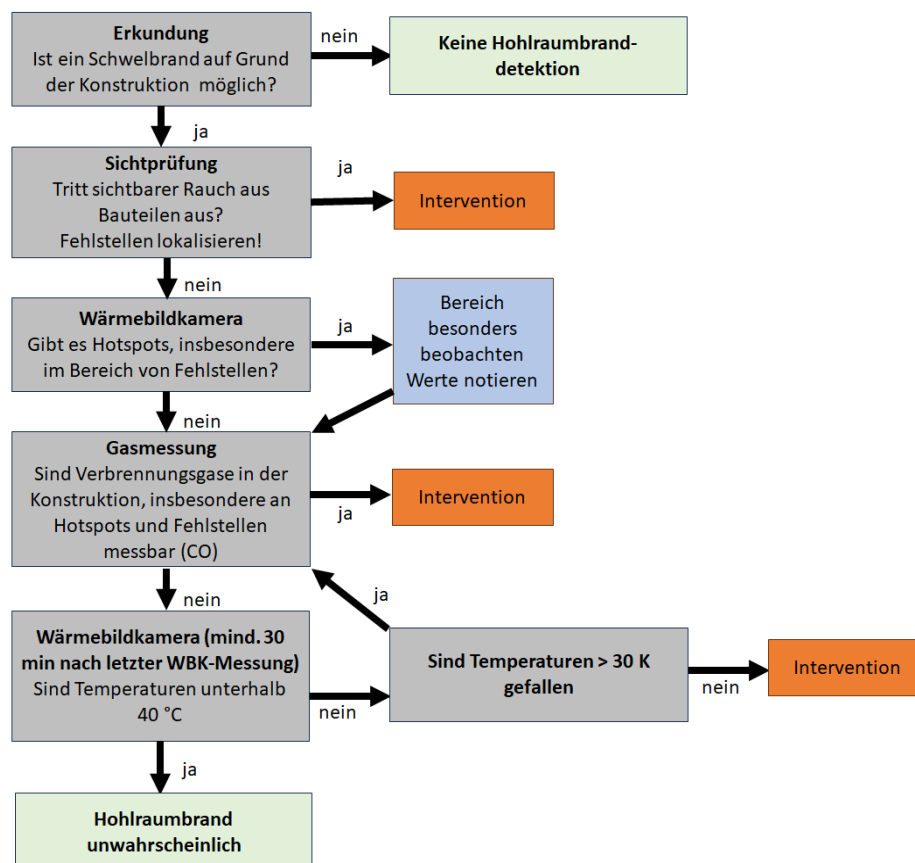


Abbildung 15: Einsatztaktik zur Detektion von Hohlraumbränden bei Brandbeanspruchten Wänden.

Sollen Schmelbrände ausgeschlossen werden, die nicht durch eine brandbeanspruchte Bauteiloberfläche eingeleitet wurden, sondern beispielsweise durch Kurzschluss oder andere Brandweiterleitungen in das Bauteil gelangten, dann sollte die in Abbildung 16 dargestellte Einsatztaktik angewendet werden. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass in allen Gefachen, in denen ein Hohlraumbrand ausgeschlossen werden soll, mindestens zwei Gasmessungen durchgeführt werden. Die Ausbreitung von CO innerhalb eines Gefachs von 240 mm Tiefe, 625 mm Breite und 2000 mm Höhe bei einem Hohlraumbrand der mit einer Heizpatrone (23 min bei 46 V und 0,23 A) erzeugt wurde, ist beispielhaft in Abbildung 17 dargestellt. Negative Distanzen zeigen Messpunkte oberhalb, positive Werte zeigen Messpunkte unterhalb des Hohlraumbrandes. Es wird deutlich, dass der zeitliche Abstand zwischen den Messungen so gewählt werden muss, dass sich das freigesetzte CO im Gefach bis zum Messpunkt ausbreiten konnte. Neben dem in Abbildung 17 dargestellten Versuch wurde ein weiterer Versuch mit anderer Position der Heizpatrone durchgeführt. Abbildung 18 fasst die Versuche zusammen und erlaubt eine Abschätzung, zu welchen Zeiten definierte Konzentrationen bei welchen Abständen von Messpunkt und Hohlraumbrand zu erwarten sind. Die Zeit t in Minuten bis zum Erreichen einer CO-Konzentration von 100 ppm in Abhängigkeit des Abstands zum Hohlraumbrand ergab sich in den durchgeführten Versuchen mit Holzfaserdämmplatten zu

$$t = 0,00006 \frac{\text{min}}{\text{mm}^2} * \text{dist}^2 + 0,0068 \frac{\text{min}}{\text{mm}} \cdot \text{dist} + 12,2 \text{ min.}$$

Die hierfür herangezogenen Messpunkte hatten einen vertikalen Abstand von -1130 mm bis 1130 mm. Eine Abschätzung der Konzentration außerhalb dieses Bereichs kann zu Fehlern führen. Abbildung 18 zeigt diesen Zusammenhang für weitere Konzentrationen.

Der mit einer Heizpatrone initiierte Brand hatte nach 120 min einen Durchmesser von ca. 20 cm. Die CO-Freisetzung und damit auch die Ausbreitung im Gefach ist von der Brandintensität abhängig. Bei kleineren Hohlraumbränden können die Zeiten dementsprechend größer sein. Dennoch dient die Formel einer ersten Abschätzung. Der Messpunkt sollte in der Mitte des Gefachs gewählt werden. Bei einer Gefachhöhe von 2 m ergibt sich der größtmögliche Abstand von Messpunkt zum Hohlraumbrand *dist* zu 1000 mm. Eine Konzentration von 100 ppm CO kann schätzungsweise nach 85 min gemessen werden. Werden zwei Messpunkte gleichmäßig über die Höhe verteilt, verringert sich dieser Abstand auf 666 mm, wodurch sich die Zeit auf 65 min verringert.

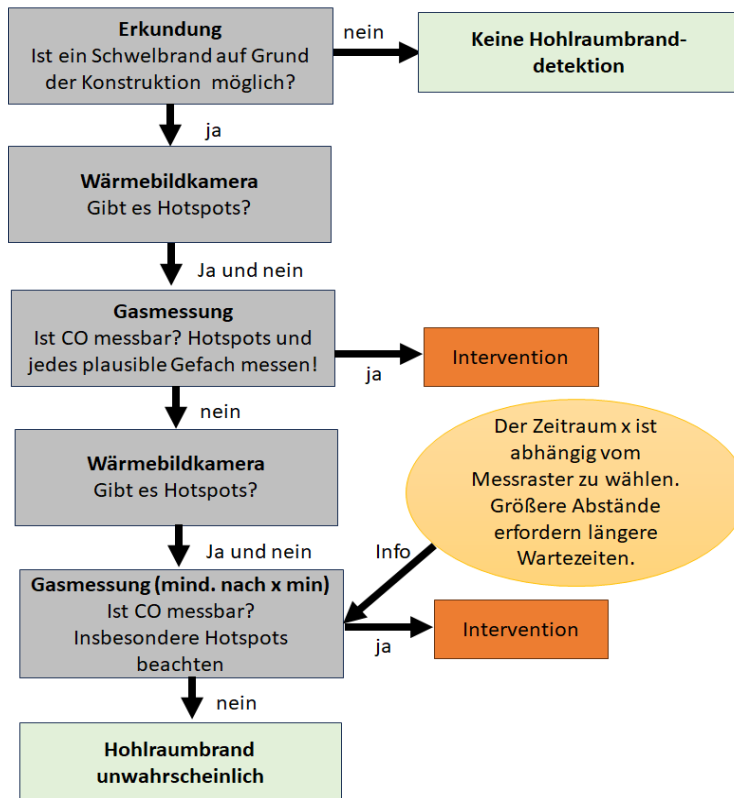


Abbildung 16: Einsatztaktik zur Detektion von Hohlraumbränden durch Brandweiterleitung oder Kurzschlüsse.

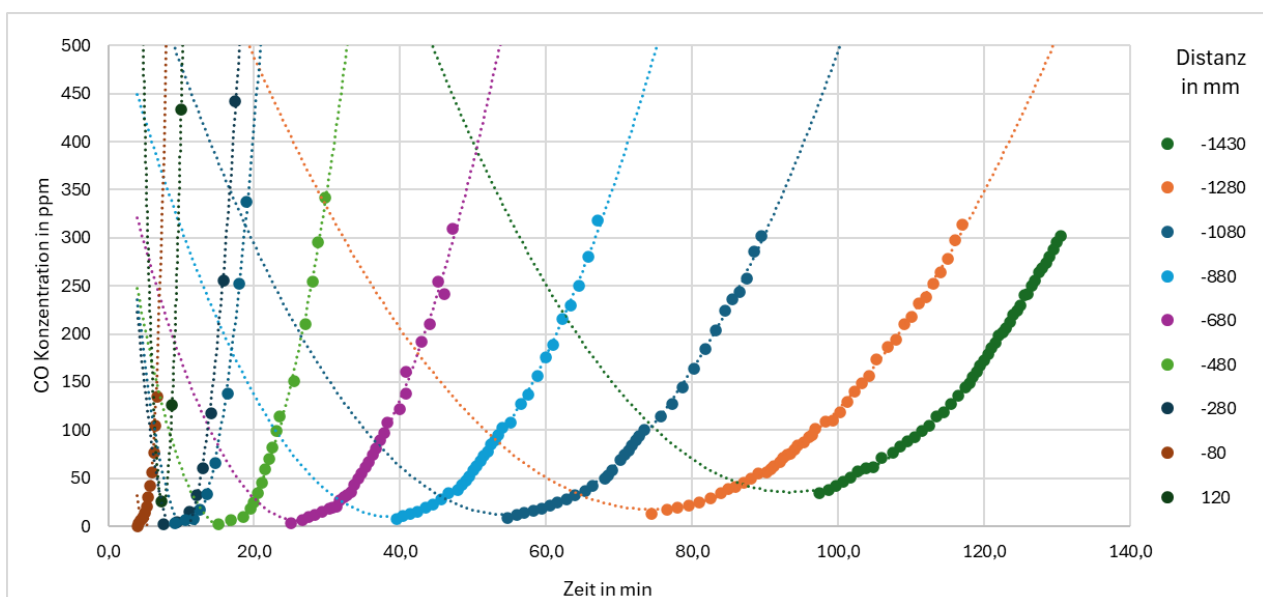


Abbildung 17: CO-Ausbreitung innerhalb eines Gefachs. Negative Abstände zeigen Messpunkte oberhalb der Brandquelle, positive Messpunkte unterhalb der Brandquelle an.

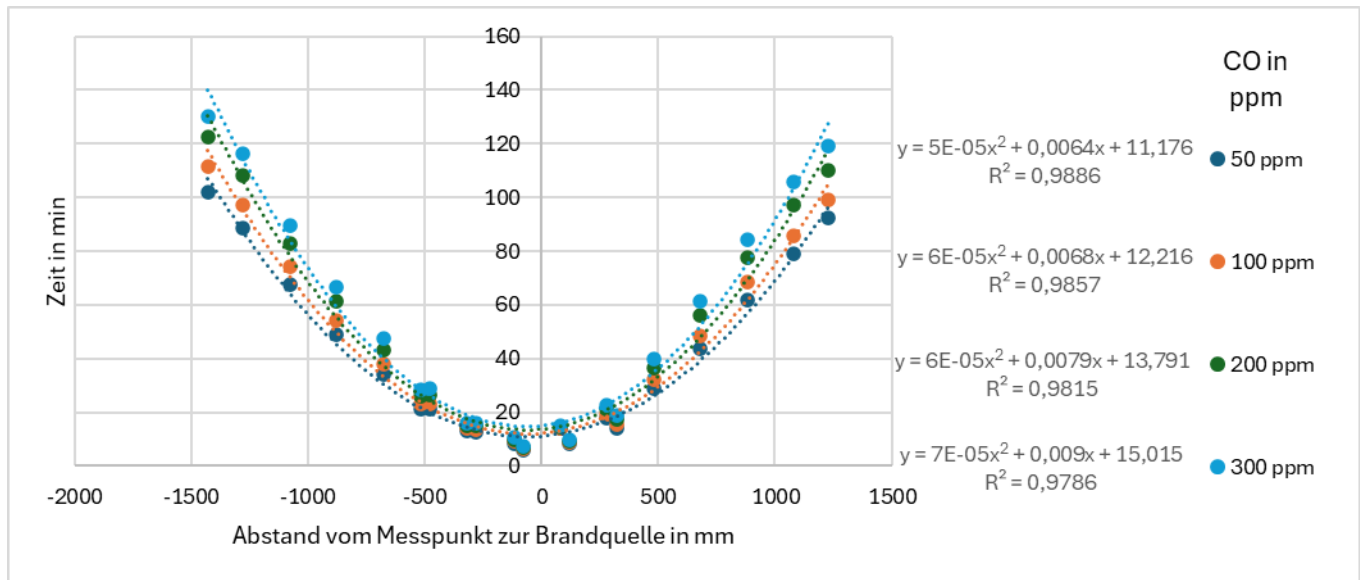


Abbildung 18: Ermittelte Zeiten, bis definierte Konzentrationen in Abhängigkeit des Abstands von Messpunkt und Hohlraumbrand erreicht werden. Negative Abstände zeigen Messpunkte oberhalb der Brandquelle, positive Messpunkte unterhalb der Brandquelle an.

1.4.1.2 Versuchsaufbau Großversuche

Abbildung 19 zeigt den Versuchsaufbau der Großversuche, wobei dieser Aufbau zwei Mal mit leichter Variation der Bauteile untersucht wurde. Der Versuchsaufbau reicht vom 1. Obergeschoss (OG) bis zum 3. OG mit einer vertikal durchgängigen Fassade. Horizontal ist die Fassade in drei Bereiche mit unterschiedlichen Fassadenbauteilen aufgeteilt, wobei Brandsperrn zwischen den unterschiedlichen Bauteilen und an den Geschossgrenzen verwendet wurden. Für den ersten Versuchstag wurde im 1. OG ein gemauerter Raum mit 3 Holzkrippen vor den Fenstern errichtet. Im 3. OG wurde für den zweiten Versuchstag ein Raum im Holzrahmenbau mit unterschiedlichen Bauteilkonstruktionen errichtet. Auch hier wurden Holzkrippen verwendet. Die Ventilation des Raums erfolgte über eine Tür und ein Fenster (Fenster befand sich auf der Wand, die der Tür gegenüber lag).

Während der Versuche wurden die in Tabelle 9 angegebene Messtechnik eingesetzt. Die gewonnenen Erkenntnisse und Videoaufnahmen sollen für spätere Aus- und Fortbildungsmaßnahmen verwendet werden.

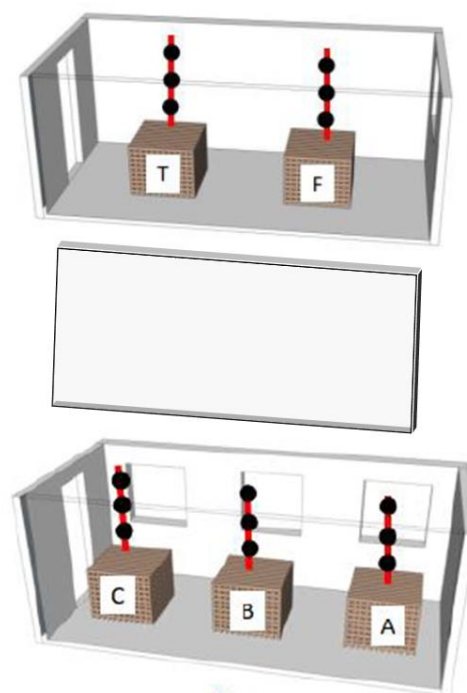


Abbildung 19: Versuchsaufbau der Großversuche am Zentrum für Brandschutzforschung. Links: Foto mit Blickrichtung auf die Fassade, rechts ein Modell mit Holzkippen und Blickrichtung auf die Außenwandbauteile, von Innen; im Bild oben rechts ist das Fenster schemenhaft zu erkennen) .

Tabelle 9: Verwendete Messgeräte bei den Großversuchen.

Gerät	Ziel
Videokamera	Visuelle Dokumentation des Brandverlaufs
GoPro	Visuelle Dokumentation des Brandverlaufs
Fotoapparat	Visuelle Dokumentation des Versuchs
Wärmebildkamera	Dokumentation der Temperaturen auf der Bauteiloberfläche
Handgehaltene WBK	Dokumentation der Temperaturen auf der Bauteiloberfläche
Thermoelemente	Temperaturen in den Brandräumen und im Inneren der Bauteile
CO-warner und Mehrgasmessgeräte	Gerät für die Detektion von Hohlraumbränden
Durchflusssensor	Wassermenge beim Löschen des Brandes
Differenzdruckaufnehmer	Bestimmung der Luftgeschwindigkeit der Ventilationsöffnungen
Waage	Bestimmung der Abbrandrate

1.4.1.3 Versuchsdurchführung Großversuche

Am jeweils ersten Versuchstag der beiden Messkampagnen wurde ein Raumbrand im 1. OG mittels Holzkippen initiiert, welcher über die geöffneten Fenster auf die Fassaden übergriff. Die Fassadenbrandbekämpfung erfolgte dann von unten mittels eines Strahlrohrs, wobei die Wassermenge reduziert wurde, um eine Höhe von 25 m abzubilden. Zudem erfolgte die Brandbekämpfung von innen unter Verwendung von Löschnägeln und Bohrlöschsystemen.

Am zweiten Versuchstag wurden die Holzkippen im 3. OG gezündet. Nachdem der Raumbrand von den Einsatzkräften der Feuerwehr Hamburg bekämpft wurde, wurde die in Abbildung 15 dargestellte Einsatztaktik angewendet, um die Hohlraumbrände zu detektieren und zu bekämpfen.

Versuchsauswertung Großversuche

Die Fassadenbrandbekämpfung war sowohl von innen mit Löschnägeln und Bohrlöschsystemen als auch mittels Hohlstrahlrohr von außen möglich. Hier wird noch einmal darauf hingewiesen, dass die ermittelten Wurfhöhen bei nahezu Windstille durchgeführt wurden. Leichte Böen hatten bereits negativen Einfluss auf die Wurfhöhe (siehe Kapitel 1.3.2).

Die Einsatzkräfte der Feuerwehr gelang es unter Verwendung der erarbeiteten Einsatztaktik alle Hohlraumbrände zu detektieren und zu bekämpfen. Die Anwendbarkeit der erarbeiteten Detektions- und Brandbekämpfungsstrategie konnte somit auch bei Realbrandversuchen validiert werden.

1.5 Arbeitspaket 5: Entwicklung von Übungsszenarien/ -konzepten für Feuerwehren und Landesfeuerweherschulen

Seitens des IBK wurde im Arbeitspaket 5 federführend das Teilarbeitspaket 5.3 „Erarbeitung von Ausbildungsmaterialien für Feuerweherschulen und praktische Ausbildungsinhalte sowie Einsatzhilfsmittel“ bearbeitet.

Ziele:

- Ausbildungskonzept (Theorie/ Praxis) für Feuerweherschulen in Deutschland mit Fokus auf die Führungskräfte als Multiplikator für die Standortausbildung der jeweiligen Feuerwehren.
- Aufbau eines Einsatzsimulators für das Training von Einsatzkräften zur Brandbekämpfung von Hohlraumbränden. Definieren aller erforderlichen Materialien zum Aufbau der Probekörper mit technischen Zeichnungen und Materiallisten.
- Erstellung von Anschauungsmaterial für Ausstellung zu Konstruktionen und Dämmungen im Holzbau
- Zusammenstellung der wichtigsten Einsatzhinweise in Form eines Einsatzmerkblattes/ Handout.

Das Übungskonzept "Brandbekämpfung von Hohlraumbränden im modernen Holzbau" wurde entwickelt, um Führungskräfte der Feuerwehr gezielt auf die spezifischen Herausforderungen bei der Brandbekämpfung in modernen Holzkonstruktionen vorzubereiten. Ziel ist es, den Teilnehmern fundierte Kenntnisse in Bezug auf Hohlraumbranddetektion, Hohlraumbrandbekämpfung, Öffnungsstrategien und die Bekämpfung von Fassadenbränden zu vermitteln und diese praktisch zu beüben. Dieses muss nach Durchführung der ersten Lehrgänge ggf. inhaltlich angepasst werden.

Tabelle 10: Stundenplan des Übungskonzepts

	Tag 1	Tag 2	Tag 3
7:30 - 9:00		Bestimmen des Wandaufbaus (Endoskop) und ableiten der Einsatztaktik; Detektion: finden von Schwelbränden mit Gasmessgerät und WBK, Zündung der Hohlraumbrände mit Heizpatrone	Übung im Einsatzsimulator, Brandbekämpfung unter realistischen Bedingungen, Anzahl der Probekörper (2x2) = 1
9:25 - 10:55	Motivation, Holzbau gewinnt an Bedeutung (Beispiele, Ursachen), neue Herausforderungen für Feuerwehren, Brandverhalten -> Ergebnisse TIMpuls + Fassadenbrände, Probleme der Hohlraumbrände	Probekörper im Kleinmaßstab werden mit Heizpatrone gezündet; Öffnen von Wandbauteilen, Probekörper aus vorherigem Detektionsversuch werden mit verschiedenen Werkzeugen geöffnet, ausheben des Hohlraumbrands Anzahl der Probekörper (1 m x 1 m) = 8	
11:00 - 12:30	Wandaufbau im modernen Holzbau, Dämmstoffe, Brandverhalten verschiedener Wände	erneute Detektion, anschließend Brandbekämpfung der Hohlraumbrände, Bauteile besitzen zusätzliche Bauteilebene und Dampfsperre, um auf Schwierigkeit der Detektion zu	Zusammenfassung des erarbeiteten Wissens, Fragen und Anregungen, Lehrgangsauswertung

		verweisen, Anzahl der Probekörper (1 m x 1 m) = 6	
13:30-15:00	Eigenschaften von Schwelbränden, Vorstellung von Detektions- und Löschmethoden	Versuch mit dem ETK-Ofen, Vergleich der Detektion bei Temperaturbeanspruchten Teilen, Anzahl der Probekörper (1 m x 1 m)= 2	
15:10-15:55	Erkenntnisse aus Forschungsprojekt + Öffnungstechnik, Lehrvideos zu Versuchen, Einsatztaktik	Nachbesprechung, Auswertung des angewendeten Wissens, nochmaliges Ansprechen der Schwierigkeiten und Sensibilisierung der Taktik	

Theorie	8
Praxis	12
Auswertung	2
insgesamt	22 Stunden

Vorläufige Kostenabschätzung am Beispiel der aktuellen Nutzungsentgeltordnung des IBK Heyrothsberge

Der Lehrgang wird für 16 Teilnehmer ausgelegt.

Tabelle 11: Kostenabschätzung des Übungskonzepts nach Nutzungsentgeltordnung

Position	Preis je Einheit in €	Einheiten	Gesamt- preis
<u>Räume</u>			
Brandraum groß	60	12	720
Brandraum klein	30		0
Übernachtung	24	32	768
Räume mit bis zu 30 Plätzen	18	12	216
Rauchgasreinigung + Diesel	480	2	960
<u>Lehrkräfte</u>			0
bis E3	34		0
bis E8	46	10	460
bis E12	57	24	1368
ab E13	71		0
			0
			0
			0
	Preis je Einheit in €	Einheiten	Gesamt- preis

Geräte			
Atenschutzgeräte	15	16	240
Wechselflasche	5	48	240
Material			
Probekörper			
1 m x 1 m	650	18	11700
2 m x 2 m	2000	1	2000
Holzkrippe	320	1	320
Nutzung des ETK-Ofens			
Versuche	1000	1	1000
Kosten des Lehrgangs			19992
Anzahl der Teilnehmer			16
Lehrgangsgebühr			1249,5

Theoretische Schulung:

In der theoretischen Schulung erhalten die Teilnehmer eine umfassende Einführung in die Grundlagen des Baurechts, um ein Verständnis für die rechtlichen Rahmenbedingungen des modernen Holzbaus zu entwickeln. Es werden detaillierte Kenntnisse über verschiedene Aspekte des modernen Holzbaus vermittelt, einschließlich der Eigenschaften verschiedener Dämmstoffe, insbesondere solche aus nachwachsenden Rohstoffen. Darüber hinaus werden die Teilnehmer über das Verhalten von Hohlraumbränden bei verschiedenen Wandaufbauten informiert und es werden Detektions- und Öffnungsstrategien bei Hohlraumbränden im Holzrahmenbau besprochen. Es werden aktuelle Forschungsergebnisse zum Thema Holzbau präsentiert, um den Teilnehmern einen praxisnahen Einblick in die Thematik zu ermöglichen. Gemeinsam wird eine geeignete Einsatztaktik erarbeitet, die den besonderen Anforderungen der Brandbekämpfung im modernen Holzbau gerecht wird.

Praktische Übungen:

Im praktischen Teil des Übungskonzeptes werden ETK-Ofenversuche durchgeführt, um in den Konstruktionen praxisnah Schwelbrände zu initialisieren. Die Teilnehmer haben die Möglichkeit, die zuvor erarbeiteten Vorgehensweisen zur Detektion, Öffnung und Bekämpfung von Hohlraumbränden praktisch anzuwenden und zu validieren. Durch das praktische Training werden die Fähigkeiten der Teilnehmer im Umgang mit realistischen Szenarien gestärkt und ihre Handlungssicherheit verbessert. Zusätzlich wird ein Containerversuch durchgeführt, um das Vorgehen im realen Maßstab zu demonstrieren und den Teilnehmern die praktische Anwendung der erlernten Strategien zu veranschaulichen. Dies ermöglicht es den Teilnehmern, ihr Wissen und ihre Fähigkeiten unter realistischen Bedingungen weiter zu vertiefen.

Abschluss und Nachbesprechung:

Nach Abschluss der praktischen Übungen findet eine umfassende Nachbesprechung statt. Hier haben die Teilnehmer die Möglichkeit, ihre Erfahrungen zu reflektieren und individuelles Feedback zu erhalten. Es werden die erreichten Ziele der Schulung besprochen und Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert. Zudem besteht Raum für Fragen und weiterführende Diskussionen, um sicherzustellen, dass das erworbene Wissen nachhaltig verankert wird. Die Abschlussphase dient auch dazu, den Teilnehmern einen Überblick über die gesamte Schulung zu geben und die Bedeutung der erlernten Fähigkeiten für ihre zukünftige Einsatzpraxis zu verdeutlichen.

Zusammenfassung:

Das Übungskonzept "Bekämpfung von Hohlraumbränden im modernen Holzbau" bietet den Führungskräften der Feuerwehr eine fundierte theoretische Schulung und praxisorientierte Übungen, um den spezifischen Anforderungen bei Bränden in modernen Holzkonstruktionen erfolgreich begegnen zu können. Durch die Kombination von theoretischem Wissen und praktischer Anwendung werden die Teilnehmer optimal auf reale Einsatzszenarien vorbereitet.

Entwicklung eines mobilen Ausbildungssimulators

Der Brandcontainer aus AP 3 soll zukünftig als Ausbildungscontainer genutzt werden. Da die Untersuchungen zeigen, dass Wandbauteile deutlich anfälliger für Schwelbrände sind als Deckenelemente, wird die

Deckenöffnung als Abluftöffnung umfunktioniert. Der Container ist weiterhin transportfähig. Er kann also genutzt werden, um Anschauungsobjekte, Probekörper und Messtechnik zu transportieren. Außerdem wird bei der Ausbildung im Container eine abschließende Übung mit einem Holzkrippenbrand und einem Wandbauteil durchgeführt.

1.6 Arbeitspaket 6: Publikation und Praxistransfer

Seitens des IBK wurde im Arbeitspaket 6 federführend das Teilpaket 6.3 „Publikation in feuerwehrspezifischen und wissenschaftlichen Fachzeitschriften und Informationsweitergabe an Feuerwehrschulen und Einsatzkräften“ bearbeitet:

Ziele:

- Beiträge in Fachzeitschriften und auf Fachtagungen zu den Möglichkeiten der Detektion von Hohlraumbränden, Löschmitteleinsatz und Brandbekämpfungsstrategien in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern
- Verbreitung der Ergebnisse, des Ausbildungskonzeptes sowie der Einsatzhinweise in den Feuerweherschulen Deutschlands und unter den ausbildenden Einsatzkräften am Standort IBK

Die Veröffentlichungen sind im Kapitel 5 zusammengefasst. Darüber hinaus wurde Ausbildungsmaterial wie Videos, Folien und Anschauungsmaterial erarbeitet.

1.7 Literaturverzeichnis

- [1] P. Bachmeier, „Löschmaßnahmen bei Bränden von Holzfaserdämmung,“ AGBF bund im Deutschen Städtetag: Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiterinnen und Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes, 2024.
- [2] „Schlussbericht Verbundvorhaben: Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo-Dämmstoffe),“ 2021.
- [3] G. Rein, „Smoldering combustion,“ in *SFPE handbook of fire protection engineering*, S. 581-603, 2016.
- [4] D. Madsen, C. Wanke, R. F. Mikalsen, I. Haraldseid, E. Villacorta, H. Bjarne, U. Krause, G. Kleppe, V. Frette und B. Husted, Emerging risks in smoldering fires: initial results from the EMRIS project, 14th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering. Interflam, Windsor, UK, 2016.
- [5] S. Wegner, J. Kaufmann und D. Butscher, „Untersuchung der Permeation von Kohlenstoffmonoxid durch komplette Wandaufbauten,“ IMK Brandschutzforschung der Bundesländer, Heyrothsberge, 2020.
- [6] U. Seliger, S. Wegner und J. Voigt-Jungton, „Untersuchung der Diffusion von Kohlenstoffmonoxid durch Baustoffe,“ IMK Brandschutzforschung der Bundesländer, Heyrothsberge, 2019.
- [7] K. Hox und A. Sæter Bøe, „Slokkemetoder med lite vann,“ SP Fire Research AS, 2017.
- [8] J. Kunkelmann, „Bewertung der Löschmittel Wasser und Wasser mit Zusätzen für den Feuerwehreinsatz, bei besonderer Berücksichtigung von Bränden in ausgebauten Dachgeschossen,“ Brandschutzforschung der Bundesländer, Karlsruhe, 2014.
- [9] „Fognail,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.fognail.de/sfgn-fognail-gmbh.php>.
- [10] L. Vylund und K. Palmkvist, „Taktik och metodik för släckning av höga trähus,“ Brandforsk, BF15-0012, Schweden, 2017.
- [11] J. Alar und D. Brandon, „Fire Stops in Buildings,“ SP Wood Building Technology, Borås, Sweden, 2017.
- [12] P. Symanowski und W. Symanowski, Die roten Hefte, 14, Deutschland: W. Kohlhammer, 2000.
- [13] J. Kunkelmann, „BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG DER BUNDESLÄNDER BERICHTE Bewertung der Löschmittel Wasser und Wasser mit Zusätzen für den Feuerwehreinsatz, bei besonderer Berücksichtigung von Bränden in ausgebauten Dachgeschossen,“ BRANDSCHUTZ-FORSCHUNG DER BUNDESLÄNDER BERICHTE, 2014.
- [14] H. Starke, „Kalibrierung von bidirektionalen Sonden,“ Heyrothsberge , 2008.
- [15] K.-J. Kohl, E. Jahn, M. Kutz und F. Wienecke, „Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser durch die Feuerwehr,“ Brandschutzforschung der Bundesländer, Heyrothsberge, 2016.
- [16] M. Kutz und K.-J. Kohl, „Entwicklung von Grundlagen für ingenieurtechnische Methoden zur Berechnung der erforderlichen Löschintensitäten für das Löschen von Bränden mit Wasser. Teil II - Aufbau und Test einer Löschapparatur,“ IMK Brandschutzforschung der Bundesländer, Heyrothsberge, 2010.
- [17] D. I. f. Bautechnik, *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise*, Mitteilung der Bauministerkonferenz, 2020.

1.8 Abkürzungsverzeichnis

CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
ETK	Einheitstemperaturkurve
GKB	Gipskarton-Bauplatte
GKF	Gipskarton-Feuerschutzplatte
LV	Löschversuch
ZeBra	Zentrum für Brandschutzforschung

1.9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links, Foto des gasbefeueren Bauteilofens für die Untersuchung von 1 m x 1 m Probekörpern mit einseitiger ETK-Beanspruchung und rechts, schematische Darstellung des Versuchsaufbaus der Ofenversuche.	6
Abbildung 2: Entwicklung eines 1 x 1 m Probekörpers mit Glaswolle, OSB-Platte und 18 mm GKF-Platte über einen Zeitraum von 15 h.	8
Abbildung 3: Überblick über optisch wahrnehmbares Brandverhalten verschiedener Konstruktion hinsichtlich sichtbarer Flammen, austretendem Rauch und Einsturz des Bauteils.	9
Abbildung 4: Maximaltemperaturverläufe der Bauteile nach der Ofenentnahme.	10
Abbildung 5: Temperaturverteilung auf der Bauteiloberfläche zu definierten Zeitpunkten nach der Ofenentnahme.	11
Abbildung 6: Bei dem Normbrandofenversuchen gemessene CO-Konzentration an der Fehlstelle der Probekörper.	12
Abbildung 7: Wärmebildaufnahmen der Brandzugewandten Seite von Löschversuch 5.	14
Abbildung 8: Probekörper von Löschversuch 5 nach Versuchsende.	14
Abbildung 9: Umgebauter 6 Fuß Brandcontainer, mit Öffnungen für Probekörper, Geländer im Deckenbereich, Türöffnung, Abluftklappe, Thermoelementen (orange) und bidirektionalen Sonden.	17
Abbildung 10: Versuchsaufbau der Containerversuche, mit dem Krippenfeuer, dem eingebauten Wandelement und den Kameras.	17
Abbildung 11: Fotos des Brandcontainers während des Versuchs.	19
Abbildung 12: links, Skizze des Versuchsaufbaus, rechts Foto des Versuchsaufbaus.	21
Abbildung 13: CO-Permeation durch Gips und verschiedene Dampfsperren.	21
Abbildung 14: Ausbreitung von CO innerhalb des Gefachs und gefachübergreifend. Die obere Darstellung zeigt die Messung mit Kupferrohren, die eine Installationsebene überbrücken, die untere Darstellung zeigt die Messung durch eine 18 mm dicke Gipsplatte.	22
Abbildung 15: Einsatztaktik zur Detektion von Hohlraumbränden bei Brandbeanspruchten Wänden.	23
Abbildung 16: Einsatztaktik zur Detektion von Hohlraumbränden durch Brandweiterleitung oder Kurzschlüsse.	24
Abbildung 17: CO-Ausbreitung innerhalb eines Gefachs. Negative Abstände zeigen Messpunkte oberhalb der Brandquelle, positive Messpunkte unterhalb der Brandquelle an.	24
Abbildung 18: Ermittelte Zeiten, bis definierte Konzentrationen in Abhängigkeit des Abstands von Messpunkt und Hohlraumbrand erreicht werden. Negative Abstände zeigen Messpunkte oberhalb der Brandquelle, positive Messpunkte unterhalb der Brandquelle an.	25
Abbildung 19: Versuchsaufbau der Großversuche am Zentrum für Brandschutzforschung. Links: Foto mit Blickrichtung auf die Fassade, rechts ein Modell mit Holzrippen und Blickrichtung auf die Außenwandbauteile, von Innen.	26

1.10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bewertungsmatrix auf Basis der durchgeführten Literaturrecherche der Einsatzmittel zur Brandbekämpfung von Hohlraumbränden.	4
Tabelle 2: Verwendete Messgeräte bei den durchgeführten Versuchen am Bauteilofen.	7
Tabelle 3: Untersuchungsmatrix der durchgeführten Ofenversuche.	7
Tabelle 4: Bewertung von Detektionsmöglichkeiten von Hohlraumbränden.	13
Tabelle 5: Aufbau der Probekörper für Löschversuche mit einem Löschnagel.	14
Tabelle 6: Verwendete Messgeräte.	18
Tabelle 7: Durchgeführte Containerversuche.	19
Tabelle 8: Ermittelte Wurfhöhe von Strahlrohren.	20
Tabelle 9: Verwendete Messgeräte bei den Großversuchen.	26
Tabelle 10: Stundenplan des Übungskonzepts.	27
Tabelle 11: Kostenabschätzung des Übungskonzepts nach Nutzungsentgeltordnung.	28
Tabelle 12: Haushaltsdaten des Projekts HoBraTec.	33

2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nachfolgend sind in Tabelle 12 die wesentlichen Haushaltsdaten nebst Begründung der Notwendigkeit aufgeführt.

Tabelle 12: Haushaltsdaten des Projekts HoBraTec

Position Gesamtfinanzierungsplan und Bezeichnung	Enstandene Ausgaben in €	Begründung
0812 Wissenschaftliche Mitarbeiter		Für die Bearbeitung des Projekts wurde der wissenschaftliche Mitarbeiter, Herr Sebastian Wegner, befristet eingestellt.
0822		Für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Projekts wurden die Hilfwissenschaftler Elizabeth Richter und Hendrik Ruhe befristet eingestellt
0831 Mantelthermoelemente	2.702,72 + 2.430,00	Die Mantelthermoelemente wurden für die Beschreibung der Temperaturverläufe in den Brandräumen (Container und Großversuche) genutzt. Sie ermöglichen eine Einordnung der Brandintensität und stellen die Reproduzierbarkeit sicher.
0835 Probekörper Gasausbreitungsversuche	8.252,52	Für die Bestimmung der Ausbreitung von Brandgasen in Holzrahmenbauteilen wurde die Fertigung von Probekörpern beauftragt. Durch diese Probekörper konnte die Ausbreitung innerhalb eines Gefachs und in benachbarte Gefache ermittelt werden.
0835 Erstellung von Videomaterial	12.299,54	Für die Dokumentation und die Erstellung von Videos wurden die Großversuche von einem Filmteam begleitet, um bspw. Schulungsvideos zu erstellen.
0835 Probekörper für Großversuche (ZeBra 1 u. 2)	35.919,56 + 35.919,56	Für die Großversuche wurde die Herstellung von Innen- und Außenwandelemente beauftragt. Für die Validierung der Einsatztaktiken und die damit verbundenen Versuche waren die Probekörper zwingend erforderlich.
0835 Umbau Überseecontainer zum Brandcontainer	40.788,44	Zur Validierung der Ofenversuche wurde ein Überseecontainer zum Brandcontainer umgebaut. Dies ermöglichte es die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse der Ofenversuche auf größere Bauteile und auf Feststoff befeuerte Brände sicherzustellen.
0850 Mehrgasmesssystem Dräger X-am 8000	3.821,92	Während des Projekts stellten sich Gasmessgeräte als ein vielversprechendes Einsatzmittel der Feuerwehren heraus, um Hohlraumbrände zu detektieren. Zur Erarbeitung einer geeigneten Einsatztaktik und zur Ermittlung vom Ausbreitungsverhalten von Gasen in Bauteilen wurde ein Mehrgasmessgerät beschafft.
0850 Doppelwandiges Kühlgehäuse	8.937,15	Für die Erstellung von Video- und Wärmebildaufnahmen in den Brandräumen wurden Schutzgehäuse beschafft.
0850 Spannungsmessmodule (Messtechnik National Instruments)	7.364,55 +3.950,80	Messtechnik für die Messung von Temperaturkurven über Thermoelemente, Differenzdrücke und Abbrandraten. Die damit ermittelten physikalischen Größen ermöglichen ein Verständnis und die Beschreibung der Verbrennungsprozesse während der Versuche.
0850 Wissenschaftliche Wärmebildkamera	20.292,48	Für die Dokumentation der Temperaturentwicklung an Oberflächen von Wand- und Deckenelementen wurde eine wissenschaftliche Wärmebildkamera beschafft. Diese erlaubt eine genaue, großflächige und kontinuierliche Dokumentation während der Brandversuche.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht den im Projektantrag dargestellten Vorhaben.

Der moderne Holzbau gewinnt aus Gründen der Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung. Allerdings entstehen durch die Verwendung brennbarer Baustoffe neue Herausforderungen für die Einsatzkräfte der Feuerwehr. Ein wesentliches Problem sind verdeckte Hohlraumbrände, die sich unentdeckt ausbreiten und dabei die tragende Struktur angreifen sowie schlagartig an Intensität gewinnen können. Im Forschungsprojekt wurde eine Einsatztaktik zur Detektion und Bekämpfung dieser Brände erarbeitet. Außerdem wurde Schulungsmaterial erstellt, das Einsatzkräften zur Verfügung gestellt wird. Des Weiteren wurden Experimente durchgeführt, um den Schwelprozess typischer Bauteile zu untersuchen und zu beschreiben.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Forschungsergebnisse werden in Fach- und Anwenderliteratur präsentiert und somit einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Das erarbeitete Ausbildungskonzept am IBK befindet sich in Planung und wird veröffentlicht, sodass auch andere Feuerweherschulen eine Ausbildung durchführen können. Die Ausbildungsunterlagen beinhalten auch Zeichnungen von Anschauungsmaterial sowie Videos und Präsentationsfolien.

5 Erkenntnisse von Dritten

Im Rahmen des Projekts stellten sich ein Bohrlöschsystem für die Brandbekämpfung insb. von Fassadenbränden als geeignet heraus. Dieses Werkzeug, welches für die Brandbekämpfung von Dachstuhlbränden konzipiert war, wurde während des Projekts für die Brandbekämpfung von Fassaden- und Hohlraumbränden erfolgreich getestet und angepasst.

6 Veröffentlichungen

Folgende Veröffentlichungen wurden im Rahmen des Verbundvorhabens angefertigt.

Schriftliche Publikationen:

Wegner et al. „CO - hazardous gas indicates hidden smoldering fires” *Journal of Physics Conference Series*. 2024 (angenommen, aber noch nicht veröffentlicht)

Lange J. et al. “Experimental Investigation on Firefighting Procedures for Multi- Storey Wooden Façades” *Proceedings of FSF 2024. The 4th International Symposium on Fire Safety of Facades 2024: 10-12 June 2024. Lund, Sweden 2024*

Lange J. et al. “Optimierung der Brandbekämpfungsmethoden und -techniken für Gebäude in moderner Holzbauweise: Ergebnisse aus dem Projekt HOBRATEC” *70. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. 2024, Magdeburg 2024*

Lange J., Wegner S. Neske M., „Branddynamik von unentdeckten Konstruktions- und Hohlraumbränden im Holzbau“ *Proceedings of Magdeburger-Köthener Brandschutz- und Sicherheitstagung, 2024*

Lange J., Wellisch A., Sudhoff P., HOBRATEC -Weiterentwicklung der Brandbekämpfungsmethoden für den mehrgeschossigen Holzbau, *5. Deutscher Holzbau Kongress Berlin DHK, 2024*

Wegner S. „Neues aus der Forschung: Das Forschungsprojekt HoBraTec, zur Optimierung der Brandbekämpfungsmethoden und -technik erfolgreich abgeschlossen“ *Feuerwehren in Sachsen-Anhalt, 2024*

Wegner S. „Neue Erkenntnisse für die Brandbekämpfung im Holzbau“ *vfd Zeitschrift 3/2024, 2024*

Klein et al. „Abwehrender Brandschutz im Holzbau - Techniken und Taktiken für Brände innerhalb von Konstruktionen“ *BrandSchutz, 2023*

Lange, J., and Kampmeier, B.. "Brandverhalten von Hohlraumkonstruktionen im modernen Holzbau." *NWK 2023 – Tagungsband der 23. Nachwuchswissenschaftler*innenkonferenz, 2023*

Wellisch A. et al. „Optimierung der Brandbekämpfungsmethoden und -techniken für Gebäude in moderner Holzbauweise: Das Projekt HOBRATEC“ *Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. 2022, Magdeburg 2022*

Wegner S. „Neues aus der Forschung: Das IBK Heyrothsberge untersucht im Verbundprojekt HoBraTec die Brandbekämpfung im modernen Holzbau“, *Feuerwehren in Sachsen-Anhalt*, 2022

Beiträge in Vorbereitung:

Wegner S., et al. „CO - hazardous gas indicates hidden smoldering fires“, *Journal of Physics Conference Series*, 2024

Weitere Veröffentlichung sind geplant. Hier war die Vereinbarung der Projektpartner, dass Veröffentlichungen in Fachzeitschriften erst angefertigt werden, nachdem die Großversuche durchgeführt wurden.

Vorträge:

Die folgenden Veröffentlichungen beinhalteten einen zugehörigen Fachvortrag:

Wegner et al. „CO - hazardous gas indicates hidden smoldering fires“ *Journal of Physics Conference Series*. 2024 (Posterpräsentation)

Lange J. et al. „Experimental Investigation on Firefighting Procedures for Multi- Storey Wooden Façades“ *Proceedings of FSF 2024. The 4th International Symposium on Fire Safety of Facades 2024: 10-12 June 2024. Lund, Sweden 2024*

Lange J. et al. „Optimierung der Brandbekämpfungsmethoden und -techniken für Gebäude in moderner Holzbauweise: Ergebnisse aus dem Projekt HOBRATEC“ *70. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. 2024, Magdeburg 2024*

Lange J., Wegner S. Neske M., „Branddynamik von unentdeckten Konstruktions- und Hohlraumbränden im Holzbau“ *Proceedings of Magdeburger-Köthener Brandschutz- und Sicherheitstagung, 2024*

Lange J., Wellisch A., Sudhoff P., HOBRATEC -Weiterentwicklung der Brandbekämpfungsmethoden für den mehrgeschossigen Holzbau, *5. Deutscher Holzbau Kongress Berlin DHK, 2024*

Lange, J., and Kampmeier, B.. "Brandverhalten von Hohlraumkonstruktionen im modernen Holzbau." *NWK 2023 – Tagungsband der 23. Nachwuchswissenschaftler*innenkonferenz, 2023*

Wellisch A. et al. „Optimierung der Brandbekämpfungsmethoden und -techniken für Gebäude in moderner Holzbauweise: Das Projekt HOBRATEC“ *Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. 2022, Magdeburg 2022*

Studienarbeiten:

keine

Bachelorarbeiten:

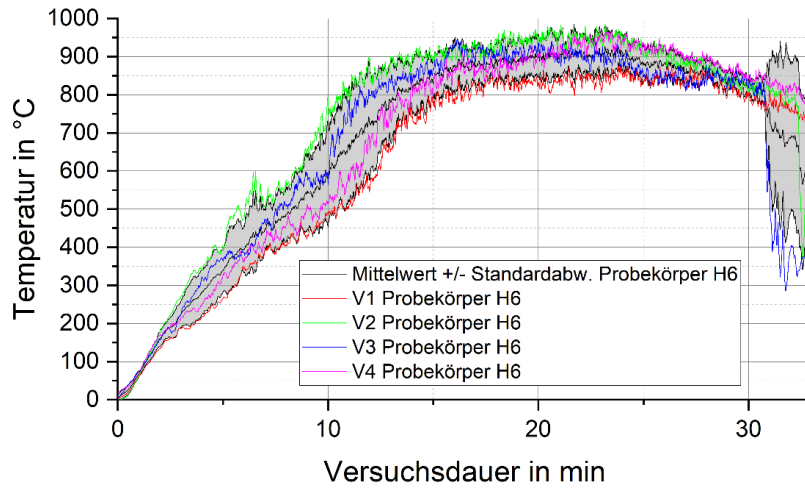
keine

Masterarbeiten:

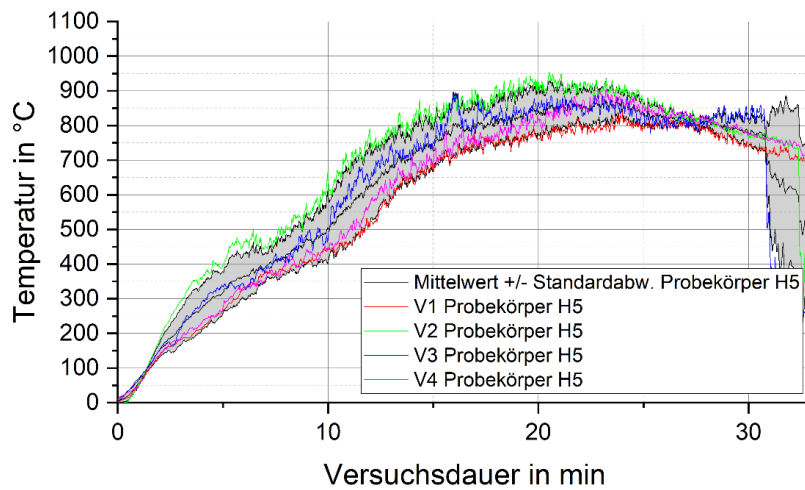
keine

Anhang

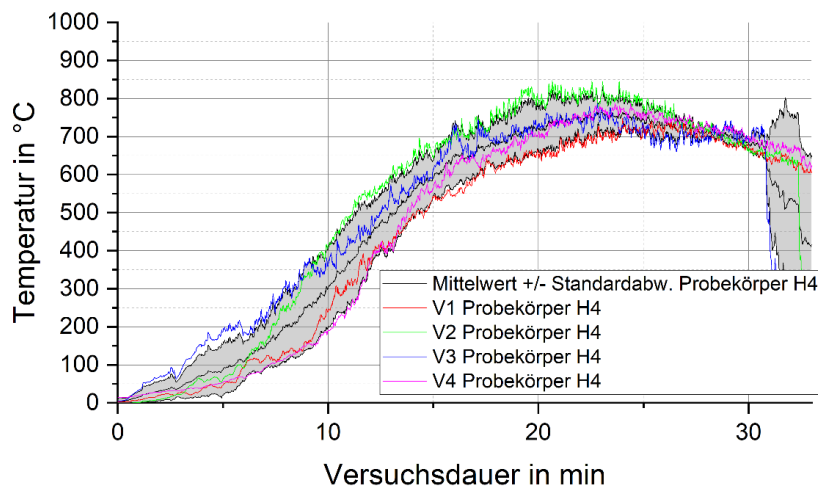
Containerversuche



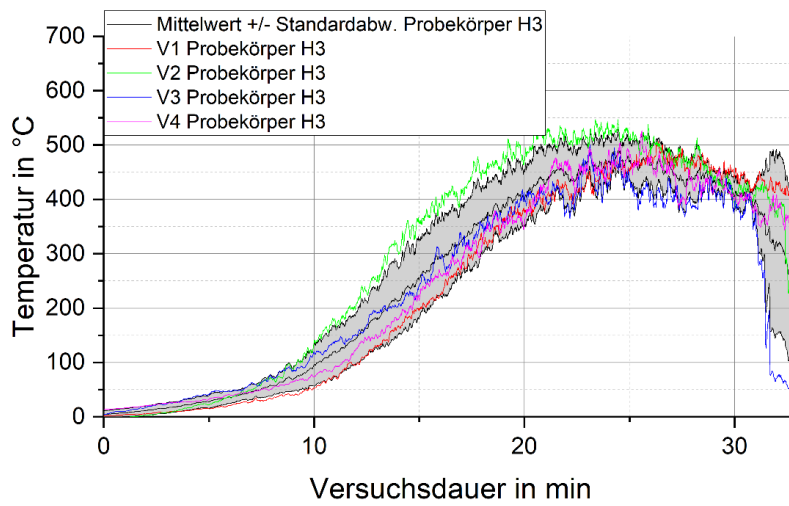
Temperaturkurven am Messpunkt 6 (oben) der Containerversuche



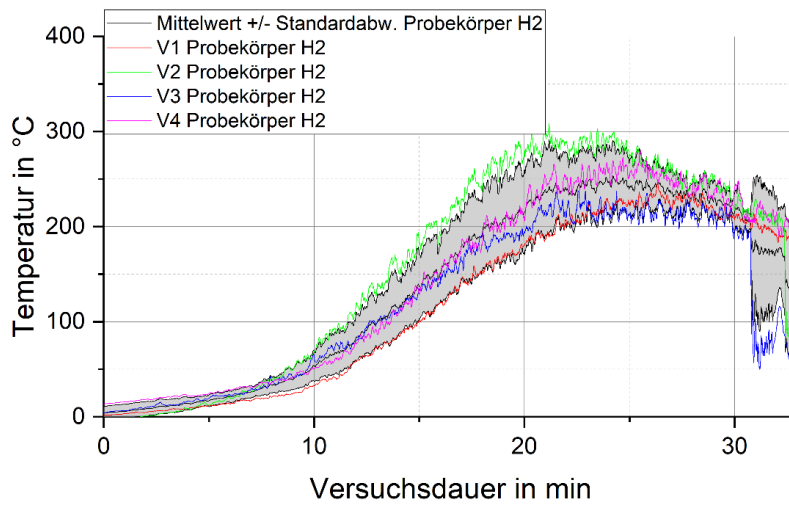
Temperaturkurven am Messpunkt 5 der Containerversuche



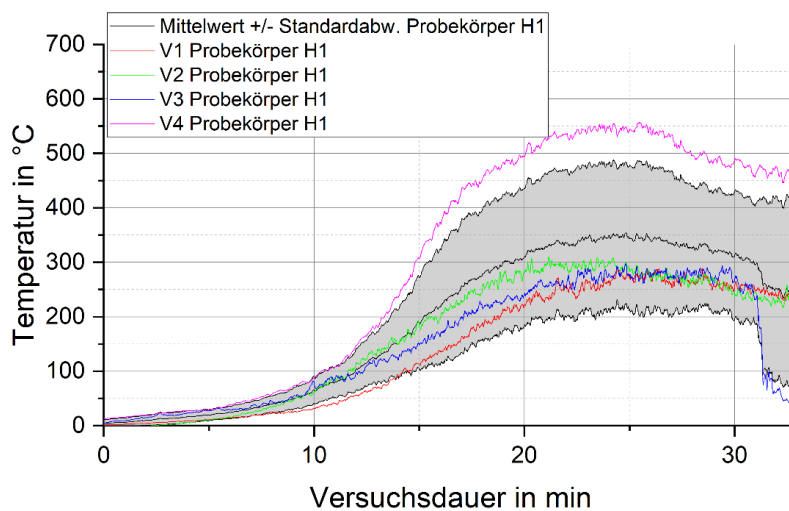
Temperaturkurven am Messpunkt 4 der Containerversuche



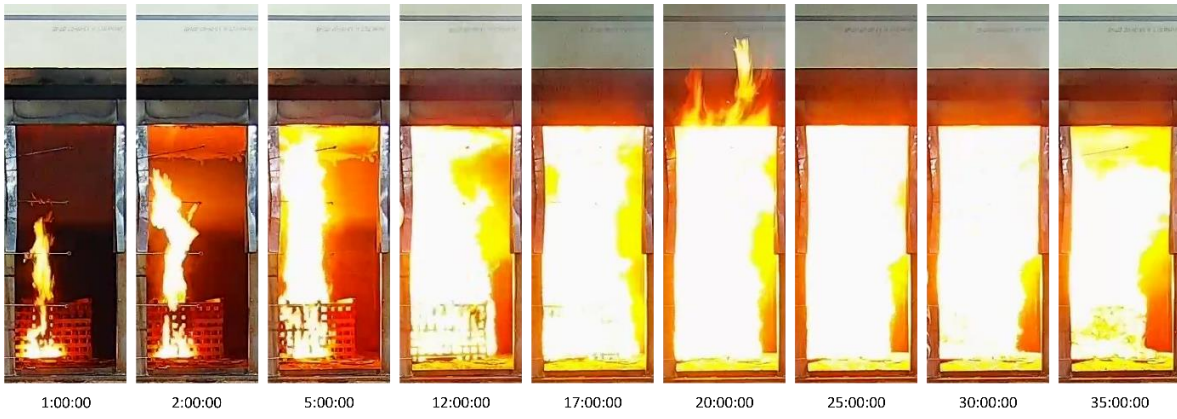
Temperaturkurven am Messpunkt 3 der Containerversuche



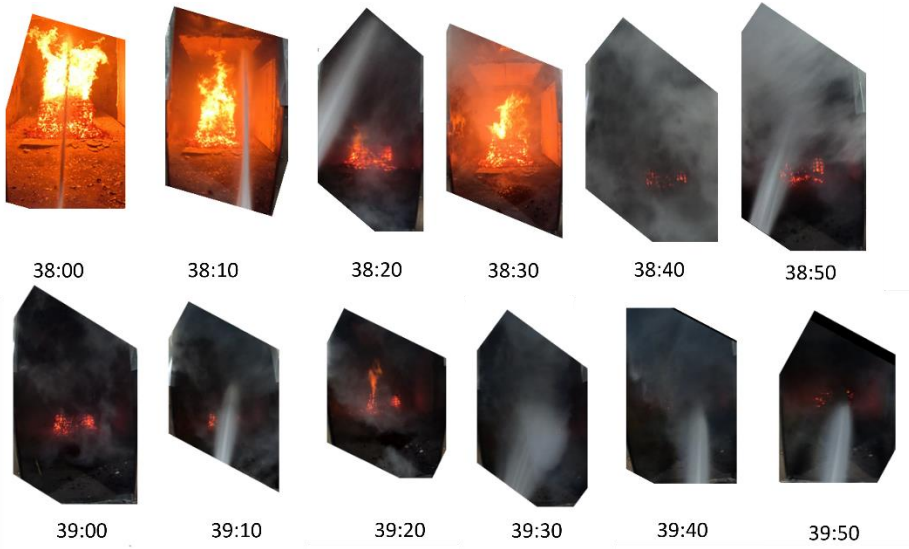
Temperaturkurven am Messpunkt 2 der Containerversuche



Temperaturkurven am Messpunkt 1 (unten) der Containerversuche



Holzkippenbrand bei Containerversuch



Löschphase bei Containerversuch 1

Bilder Großversuche

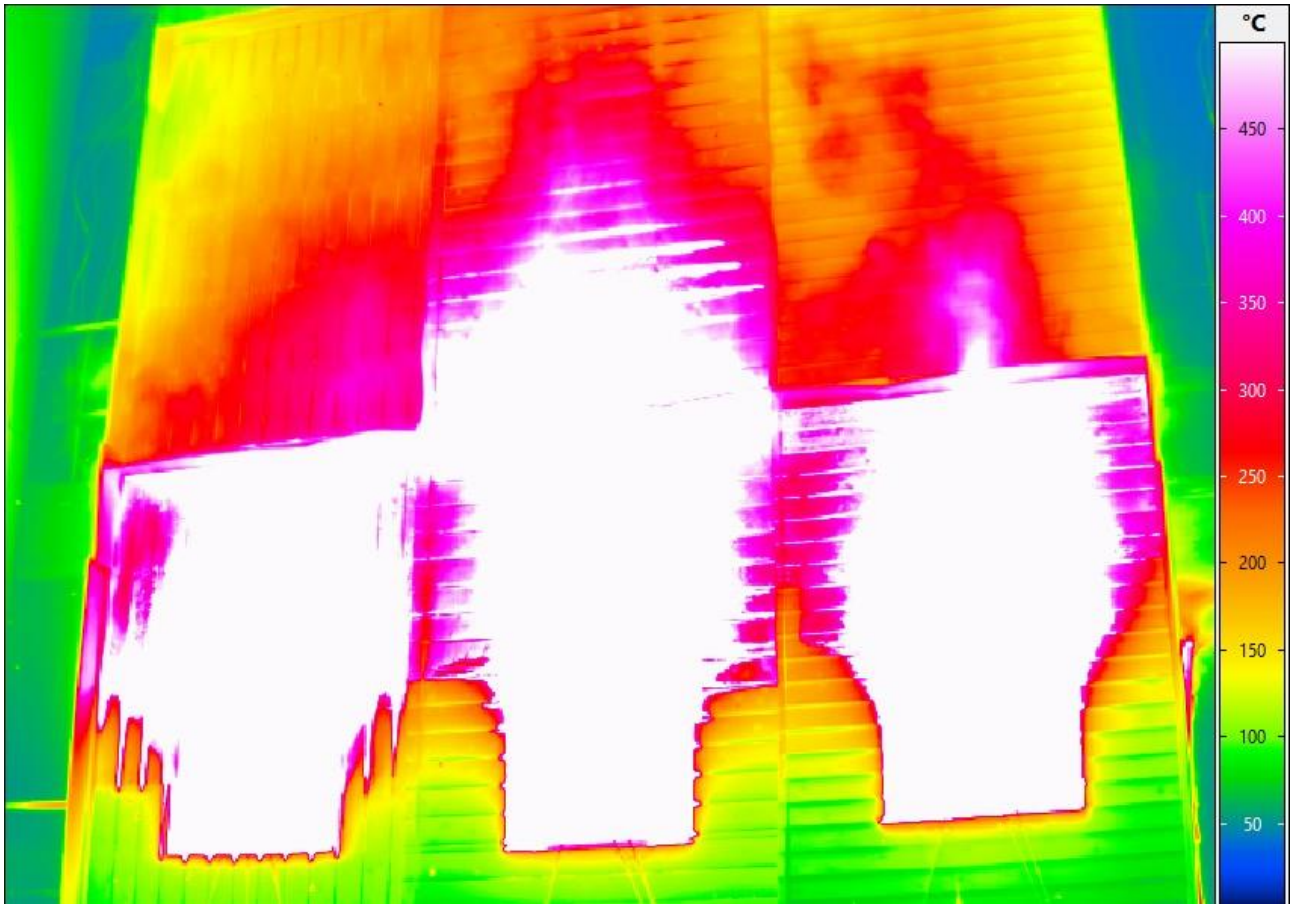
Versuch 1a



Fassadenbrand



Fassadenbrand



Wärmebild Fassadenbrand



Ende erster Versuchstag

Versuch 2a



Fassadenbrand



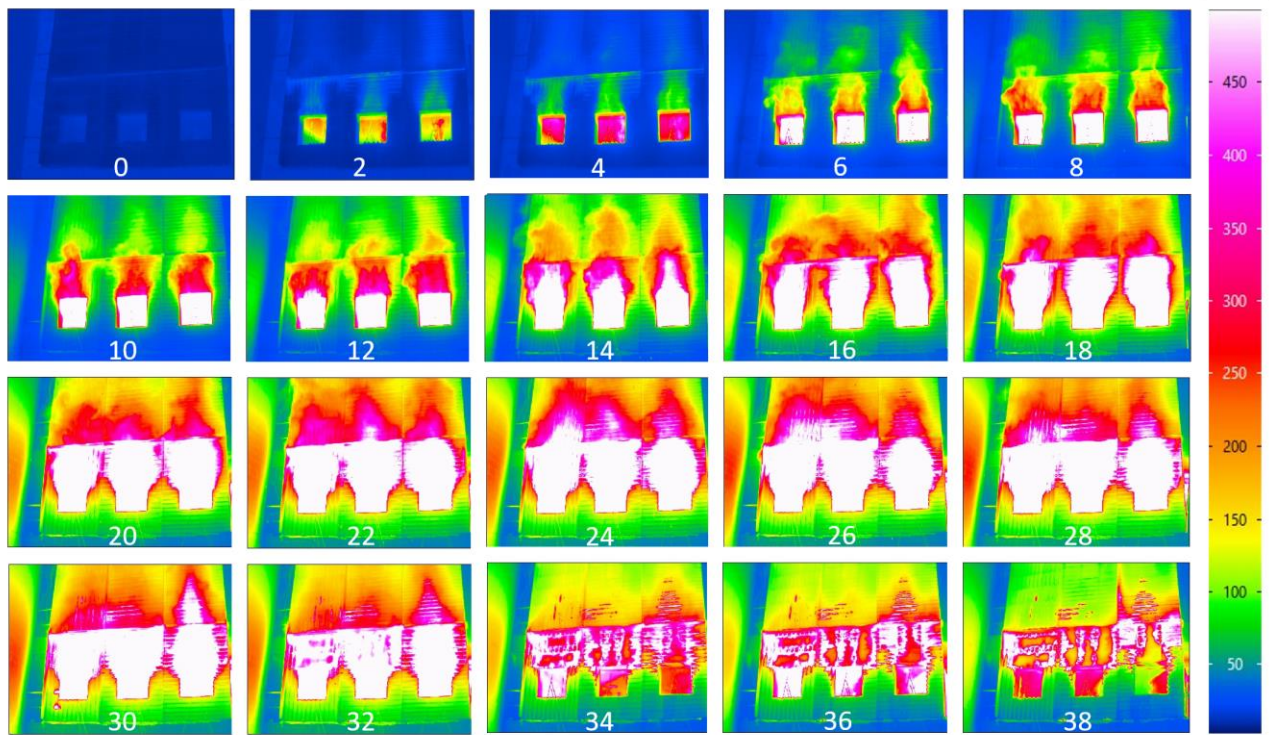
Löschangriff



Fassadenbrandbekämpfung



Fassadenbrand



Wärmebild Fassadenbrand

Versuch 2b



Innenbrand im 3. OG



Hohlraumbranddetektion



Gasmessung zur Detektion



Löschnagel für Fassadenbrandbekämpfung von innen



Fassadenbrand im 3. OG