

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben TIMpuls

Thema:

**Verbundvorhaben (FSP-Brandschutz):
Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur
Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen in
Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus**

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Technische Universität München

Teilvorhaben 2: Technische Universität Braunschweig

Teilvorhaben 3: Hochschule Magdeburg-Stendal

**Teilvorhaben 4: Institut für Brand- und Katastrophenschutz
Heyrothsberge**

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22011516

Teilvorhaben 2: 22006917

Teilvorhaben 3: 22006717

Teilvorhaben 4: 22007017

Laufzeit:

01.08.2017 bis 31.03.2021

Monat der Erstellung:

01/2022

Datum der Veröffentlichung:

10.06.2022

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

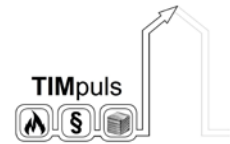
1	Projektbeteiligte	6
2	Ziele	7
2.1	Aufgabenstellung	7
2.2	Bauordnungsrechtliche Grundlagen	7
2.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
3	Ergebnisse	13
3.1	Erzielte Ergebnisse	13
3.1.1	Arbeitspaket 1 Theoretische Grundlagenermittlung - Stand der Wissenschaft und Technik	13
3.1.1.1	Marktanalyse	13
3.1.1.2	Durchgeführte Raumbrandversuche an Holzbaukonstruktionen aus der internationalen Literatur	15
3.1.1.3	Aufbereitung, Analyse, Gegenüberstellung der präskriptiven Anforderungen für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise	17
3.1.1.4	Beurteilungskonzepte für Brandeinwirkungen	18
3.1.1.5	Festlegung repräsentativer Naturbrandkurven	22
3.1.1.6	Löschverhalten von Holzbauteilen	24
3.1.1.7	Selbstverlöschen von Holzbauteilen	26
3.1.1.8	Brandverhalten von Holzbauteilen und deren Rauchdichtigkeit	27
3.1.1.9	Temperaturabhängiges Materialverhalten von Holz	27
3.1.1.10	Thermomechanisches Verhalten der Holzdruckfestigkeit	29
3.1.1.11	Thermomechanisches Verhalten der Holzzugfestigkeit	34
3.1.1.12	Thermomechanische Verhalten der Holzbiegefestigkeit	37
3.1.1.13	Erkenntnisse zum thermomechanischen Verhalten von Holz	40
3.1.1.14	Haustechnische Installationen im Holzbau	41
3.1.1.15	Schutzzieldefinition und Sicherheitskonzept	48
3.1.1.16	Grundlagen zu Bewertung der Brandausbreitung über Außenwandbekleidungen aus Holz	50
3.1.2	Arbeitspaket 2 Brandversuche und numerische Untersuchungen	52
3.1.2.1	Raumbrandversuche im Room Corner	52
3.1.2.2	Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung und parametrischer Brandbeanspruchung	69
3.1.2.3	Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung	86
3.1.2.4	Brandversuche zum Nachbrandverhalten und Selbstverlöschen	101
3.1.2.5	Experimentelle Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens von Holz	105
3.1.2.6	Brandgefahr durch elektrische Leitungsanlagen in Holzbau-elementen	110
3.1.2.7	Nachbrandverhalten und Selbstverlöschen von Holz-Beton- Verbunddecken im Naturbrand	120
3.1.2.8	Großbrandversuche im Brandofen	123
3.1.2.9	Grundlagenuntersuchungen numerischer Beurteilungen	147



3.1.2.10 Weiterführende Beurteilungen zum Feuerwiderstand auf Basis numerischer Betrachtungen.....	151
3.1.2.11 Betrachtung der Schutzwirkung von Gipsfaser- und Gipskartonplatten im Naturbrandszenario	155
3.1.2.12 Abschließende Realbrandversuche im Forschungsvorhaben TIMpuls	159
3.1.3 Arbeitspaket 3 Nachbrand und Löschverhalten.....	212
3.1.3.1 Recherche zum Selbstverlöschen internationaler Großbrandversuche mit Holzbauweisen.....	212
3.1.3.2 Nachbrandverhalten von ungeschützten Holzbauteilen	216
3.1.3.3 Nachbrandverhalten von anfänglich geschützten Holzbauteilen.....	218
3.1.3.4 Nachbrandverhalten und Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken im Naturbrand	219
3.1.4 Arbeitspaket 4 Abwehrender Brandschutz	225
3.1.4.1 Ergebnis aus der Recherche zum Einfluss des Holzbaus anderer Länder auf die Einsatztaktiken der Feuerwehren	225
3.1.4.2 Ergebnis der Onlineumfrage.....	228
3.1.4.3 Evaluierung der abwehrenden Brandschutzmaßnahmen in Bezug auf die erarbeiteten Forschungsergebnisse	233
3.1.5 Arbeitspaket 5 Anlagentechnische Schutzmaßnahmen	234
3.1.5.1 Löschanlagen	234
3.1.5.2 Recherche zu anlagentechnischen Schutzmaßnahmen in internationalen Großbrandversuche mit Holzbauweisen.....	239
3.1.5.3 Hydraulische Bemessung von Wohnraumsprinkler im mehrgeschossigen Holzbau	243
3.1.6 Arbeitspaket 6 Risikoanalyse und Bewertung	252
3.1.6.1 Brandrisiko.....	252
3.1.6.2 Bauordnungsrechtliche Anforderungen an mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise.....	254
3.1.6.3 Brandverhalten von Holzbauteilen.....	256
3.1.6.4 Erarbeitung von Vorschlägen zur Fortschreibung der Muster-Holzbaurichtlinie	261
3.1.6.5 Semi-quantitative Risikoanalyse.....	267
3.1.6.6 Ausführliche Parameterbewertung der erarbeiteten Vorschläge.....	275
3.1.6.7 Resultierende Risikobewertung der Vorschläge zur Fortschreibung der Muster-Holzbaurichtlinie	278
3.1.6.8 Erweiterung Naturbrandmodell nach EC1-1-2/NA Anhang AA	284
3.1.6.9 Durchführung von vollprobabilistischen Analysen	291
3.1.7 Arbeitspaket 7 Lösungsansätze hinsichtlich Nachhaltigkeit, Sanierungsmöglichkeit, Wirtschaftlichkeit.....	293
3.1.7.1 Grundlagen der ökologischen Bewertung	293
3.1.7.2 Ökologische Bewertung von Wänden in Holzbauweisen	295
3.1.7.3 Vergleich Holz-Beton-Verbunddecken und Stahlbetondecken	300
3.1.8 Arbeitspaket 8 Leitlinie für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise bis zur Hochhausgrenze	302
3.1.9 Arbeitspaket Wissenstransfer / Dissemination	303



3.2	Verwertung.....	304
3.3	Erkenntnisse von Dritten.....	307
3.4	Veröffentlichungen und Vorträge	308
	Literatur	310
	Abbildungsverzeichnis	324
	Tabellenverzeichnis	338
4	ANHANG	341
4.1	Teilvorhaben 1 „Integrale Systementwicklung brandschutztechnisch sicherer Holzgebäude“	341
4.1.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	341
4.1.2	Bearbeitete Arbeitspakete	341
4.1.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	342
4.2	Teilvorhaben 2 „Beurteilung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Bauteilen und Systemen“	345
4.2.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	345
4.2.2	Bearbeitete Arbeitspakete	345
4.2.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	346
4.3	Teilvorhaben 3 „Anlagentechnischer Brandschutz und Nachbrandverhalten“	355
4.3.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	355
4.3.2	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	356
4.4	Teilvorhaben 4 „Durchführung großmaßstäblicher Brandversuche.....	360
4.4.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	360
4.4.2	Bearbeitete Arbeitspakete	360
4.4.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens.....	364
4.5	Anhang: Versuchsbericht Nr. 01-08-19 „Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung (ETK) und parametrischer Brandbeanspruchung“	365
4.6	Anhang: Planung der abschließenden Realbrandversuche	466
4.7	Anhang: Stellungnahme zum Entwurf der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile in Holzbauweise für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 – M-HolzBauRL	495
4.8	Anhang: Übersicht zur Parameterbewertung der FRIM-MAB-D für GK 5	525



1 Projektbeteiligte

Technische Universität München

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

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

Thomas Engel M.Sc. (Projektleitung)

Christoph Kurzer M.Eng.

Dr.-Ing. Norman Werther

Technische Universität Braunschweig

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Fachgebiet Brandschutz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß

Sven Brunkhorst M.Sc.

Hochschule Magdeburg-Stendal

Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

Fachgebiet Brandschutz und Baukonstruktion

Prof. Dr.-Ing. Björn Kampmeier

Felix Steeger M.Eng.

Institut für Brand- und Katastrophenschutz

Abteilung Forschung – Institut der Feuerwehr –

Dr.-Ing. Michael Neske

Daniel Butscher M.Sc.

*Die Autoren haben gleichermaßen zu dieser Arbeit beigetragen.

Zitiervorschlag:

Engel, T.; Brunkhorst, S.; Steeger, F.; Butscher, D.; Kurzer, C.; Werther, N.; Winter, S.; Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Neske, M. (2022) Schlussbericht zum Verbundvorhaben TIMpuls - Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen im Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe; Gülzow-Prüzen.

Unterstützung durch studentische Hilfskräfte und Abschlussarbeiten

- Franziska Heumann B.Ed.
- Phillip Passeyer
- Chiara Herbster, B.Sc.
- Dominik Schulze, B.Eng.
- Katharina Moosmüller M.Sc.
- Carola Niemann, M.Eng
- Johannes Studier, M.Sc.

2 Ziele

2.1 Aufgabenstellung

Das Bauen mit Holz erfreut sich steigender Beliebtheit. Holz ist einer der wichtigsten nachwachsenden Rohstoffe der Zukunft und kann für die notwendige Dekarbonisierung der Erde einen wesentlichen Beitrag leisten. Holz ist der einzige, weltweit verfügbare Rohstoff, der durch das Wachstum in unseren Wäldern in so großen Mengen nachhaltig erzeugt werden kann, dass er als Massenbaustoff gleichwertig zu den anderen Baustoffen wie Stahl, Beton und Mauerwerk verwendet werden kann. Mit der Entwicklung und stetigen Optimierung von modernen Holzbausystemen in Verbindung mit den gesellschaftlichen und politischen Initiativen zum ressourcenbewussten Planen und Bauen wurde in den letzten Jahren ein wesentlicher Grundstein für die Anwendung von biogenen Baustoffen, vertreten durch den Leitbaustoff Holz, gelegt.

Stellvertretend hierfür kann die Verwendung von Holz für mehrgeschossige Gebäude gesehen werden, die in den europäischen und außereuropäischen Ländern in den letzten Jahren rasant anwächst. Dieser Prozess wird aktuell in Deutschland von den limitierenden Regelwerken und bauordnungsrechtlichen Einschränkungen für den Baustoff Holz behindert.

Als natürlich gewachsener Rohstoff weist Holz zwei Eigenschaften auf, die bei Planung und Bau von Gebäuden besonderer Aufmerksamkeit bedürfen: Die Brennbarkeit und die Zersetzbarkeit.

Das Forschungsvorhaben TIMpuls beschäftigt sich insbesondere mit den Auswirkungen der Brennbarkeit des Baustoffes Holz auf die Erfüllung des bauordnungsrechtlichen Schutzniveaus. Es soll gezeigt werden, dass bei geeigneter Ausführung und Dimensionierung sowie Anordnung konstruktiver und ggf. anlagentechnischer Maßnahmen eine Gleichwertigkeit in Bezug auf das Schutzniveau für Holzbauwerke im Vergleich zu Bauwerken aus nichtbrennbaren Baustoffen (Mauerwerk, Stahlbeton oder Stahlleichtbau) erreicht werden kann. Das in den Bauordnungen definierte Schutzziel des Brandschutzes soll dabei ohne eine wesentliche Veränderung des Sicherheitsniveaus sichergestellt bleiben.

Ziel des Vorhabens ist die Bereitstellung einer vollständigen, wissenschaftlich begründeten Systematik, um die Verwendbarkeit tragender und raumbildender Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze zu ermöglichen. Durch das Vorhaben ist nachzuweisen, dass durch die Verwendung der im Vorhaben beschriebenen Konstruktionen brandschutztechnisch gleichwertige Lösungen im Vergleich zu den heute üblichen Konstruktionen aus Mauerwerk und Stahlbeton oder Stahlleichtbau erreicht werden können.

2.2 Bauordnungsrechtliche Grundlagen

Das Planen und Bauen ist unabhängig von der Art des Baustoffs neben den technischen Aspekten auch von bauordnungsrechtlichen Vorgaben geprägt. Das Bauordnungsrecht stellt einen Teilbereich des öffentlichen Baurechts dar. In Deutschland liegt das Bauordnungsrecht in der Gesetzgebungskompetenz der Bundesländer. Alle Länder haben dementsprechend eigene Bauordnungen erlassen. Maßgebend für die Planung von Bauwerken sind die Anforderungen aus dem Bauordnungsrecht. Es regelt in erster Linie die Abwehr von Gefahren, die durch die Errichtung, den Bestand und die Nutzung von baulichen Anlagen ausgehen können. Dazu definiert das Bauordnungsrecht die bautechnischen Anforderungen an Bauvorhaben. Weiter beschreibt es den Genehmigungsprozess einer baulichen Anlage und stellt die Gewährleistung sozialer Mindeststandards (z. B. Anforderungen an die Barrierefreiheit etc.) sicher [27].

Für die Bauherren bzw. die Projektentwickler stehen gestalterische und funktionale Leistungsanforderungen im Vordergrund. Sie wollen ein Bauwerk nach den von ihnen vorgegebenen Leistungsanforderungen.

Aus Sicht des Gesetzgebers ist es jedoch notwendig, einen sicherheitsrelevanten Mindeststandard für bauliche Anlagen zu definieren, da der marktwirtschaftliche Wettbewerb von Planungs- und Bauleistung nicht auf Kosten der Sicherheit geführt werden darf.

Die Mindeststandards, die in der Bauordnung in Form von materiellen Anforderungen definiert sind, zielen größtenteils auf Vorgaben in Bezug auf den Brandschutz und die Standsicherheit (Tragwerk) ab. Darüber hinaus muss die Verkehrssicherheit (Zugangsmöglichkeiten, Erschließung etc.) gegeben sein. Zusätzlich werden auch gesellschaftliche Forderungen, wie bspw. die Barrierefreiheit, geregelt [27].

Um die bauordnungsrechtlichen Vorgaben an ein Bauteil korrekt nachweisen zu können, stehen verschiedene Wege der Nachweisführung, in Abhängigkeit von der Einstufung als Bauprodukt bzw. Bauart, zur Verfügung. Bauteile können über nationale Verwendbarkeitsnachweise in Form von allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen (abP), allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ), allgemeinen Bauartgenehmigungen (aBG), Nachweis der Verwendbarkeit von Bauprodukten im Einzelfall (ZiE) oder einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG) erfolgen. Einen weiteren Weg der Verwendbarkeit stellt die Leistungserklärung (DoP) für europäische Bauprodukte mit CE Kennzeichnung dar. Diese Leistungserklärung kann auf Grundlage einer harmonisierten Produktnorm (hEN) oder einer europäischen technischen Zulassung (ETA) erfolgen [27]. Die CE-gekennzeichneten Bauprodukte müssen beim Einbau und Zusammenfügung in eine Bauart die materiellen Anforderungen der Bauordnungen erfüllen.

Ein Verwendbarkeitsnachweis ist somit ein Zeugnis, das aussagt, welche Leistungseigenschaften ein Bauteil erfüllt (z. B. Feuerwiderstand). Hierfür muss das Bauteil eine Prüfung durchlaufen.

Eine weitere Nachweismöglichkeit stellen die in der jeweiligen landesspezifischen „Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen“ eingeführten technischen Regeln für Bauprodukte bzw. die eingeführten technischen Baubestimmungen dar [56]. Eingeführte technische Baubestimmungen und Regeln sind vorrangig DIN-Normen sowie Richtlinien, die durch das jeweilige Bundesland vorab benannt und als maßgebend erachtet und somit als technische Regeln „eingeführt“ wurden. Wendet man diese Regeln an und führt das Bauteil entsprechend aus, kann man sich auf die in den Regeln aufgeführten Leistungseigenschaften berufen.

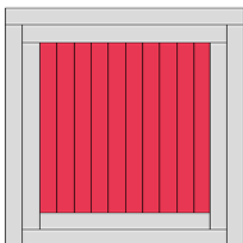
In den Bauordnungen wird neben den Anforderungen an den Feuerwiderstand, u. A. geregelt aus welchen Baustoffen (Brandverhalten der Baustoffe) Bauteile mit einer Feuerwiderstandsfähigkeit bestehen dürfen.

Feuerhemmende Bauteile können sowohl aus brennbaren als auch aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Die Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen ist daher uneingeschränkt möglich [27].

Hochfeuerhemmende Bauteile können aus nichtbrennbaren Baustoffen oder aus brennbaren Baustoffen mit allseitig brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und nichtbrennbaren Dämmstoffen bestehen. Letztere sind national nach DIN 4102-2 nicht klassifizierbar. Sie würden in die Klasse F-60 B fallen und wären daher denen aus brennbaren Baustoffen ohne Brandschutzbekleidung gleichgesetzt. Hochfeuerhemmende Bauteile können daher nur europäisch klassifiziert werden, und es muss das Brandschutzfunktion der Brandschutzbekleidung zusätzlich zur Feuerwiderstandsfähigkeit nach DIN EN 13501-2 mit K₂60 nachgewiesen werden, vgl. Abbildung 1. Durch die Brandschutzbekleidung K₂60 wird die brennbare Konstruktion für eine geprüfte Zeit von 60 min (nach Einheits-Temperaturzeitkurve) durch die Bekleidung vor der Entzündung geschützt. Das heißt, die brennbaren Bauteile beteiligen sich über 60 min nicht am Brandereignis. Durch Einführung des Begriffes „hochfeuerhemmend“ wurden dadurch zu mineralischen Bauteilen (z. B. Mauerwerk oder Stahlbeton) vergleichbare Konstruktionen geschaffen [27].

60 MIN FEUERWIDERSTAND

HOCHFEUERHEMMEND

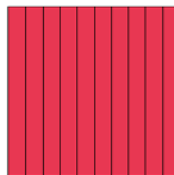


Bekleidung soll die Entzündung von brennbaren Baustoffen für 60 min verhindern + nichtbrennbare Dämmung

F 60 B (DE)
REI 60 K₂60 (EU)

60 MIN FEUERWIDERSTAND

≠ HOCHFEUERHEMMEND



F 60 B (DE)
REI 60 (EU)

Abbildung 1: Unterschied zwischen hochfeuerhemmend und F 60 B [57]

Feuerbeständige Bauteile bestehen, sofern sie tragend oder aussteifend sind, in den tragenden und aussteifenden Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen. Bei raumabschließenden Bauteilen muss eine durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen vorhanden sein. Durchgängige (reine) Holzkonstruktionen waren daher bis vor Kurzem ohne eine materielle Abweichung vom Bauordnungsrecht in vielen Bundesländern für Gebäude der Gebäudeklasse 5 nicht möglich [27].

Geregelter Holzbau bis zur Hochhausgrenze ist aktuell (11/2021) in allen Bundesländern bis auf Sachsen und dem Saarland möglich. Hier sind teilweise unter der Voraussetzung zusätzlicher Anforderungen und Maßnahmen Bauteile aus brennbaren Baustoffen **abweichend** zu hochfeuerhemmenden und feuerbeständigen Bauteilen zulässig. Die Betonung liegt hier auf dem entscheidenden Wort **abweichend**, folglich werden auch in diesen Landesbauordnungen die Worte hochfeuerhemmend und feuerbeständig nicht anderslautend definiert. Wichtig zu beachten ist, dass teilweise weitergehende landesspezifische Anforderungen für die Verwendung von brennbaren Baustoffen gefordert werden (z. B. kleinere Brandabschnitts- und Nutzungseinheitengröße etc.).

Die bauordnungsrechtliche Zulässigkeit von Holzbau in Gebäudeklasse 4 und 5 wird in Abbildung 2 dargestellt.

Bauordnungsrechtliche Verwendbarkeit von brennbaren Baustoffen in Deutschland

	Musterbauordnung	Baden-Württemberg	Bayern	Berlin	Brandenburg	Bremen	Hamburg	Hessen	Mecklenburg-Vorpommern	Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Saarland	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Schleswig-Holstein	Thüringen
Aufkündigung Bauordnung	MBO	LEBO	BayBO	BauO Bm	BauBO	BremLBO	HBauO	HEBO	LEBO MVV	NEBO	BauO NRW	LEBO	LEBO	SBauBO	BauOLA	LEBO	ThürBO
Letzte Änderung Bauordnung	27.09.2019	18.07.19	23.12.20	09.04.18	09.02.2021	22.09.20	23.01.18	07.07.18	26.06.21	10.11.20	06.01.19	03.02.21	19.06.19	11.12.18	18.11.20	01.10.19	23.11.20
Zusatzverordnung		LEBAVO								DiVO-HBauO				DiVO-SachsBO			
Letzte Änderung Zusatzverordnung		23.02.17						13.11.12						05.03.18			
M-HF-Holzwerk eingestuft mit Stand		08.05	07.04	07.04	07.04	07.04	11.05	07.04	08.05	07.04	07.04		07.04	07.04	07.04	07.04	07.04
M-HolzbaufL eingestuft mit Stand	(10/2020)	12)				06.06/2019			06.06/2019			05/21	06.06/2019				
GEBÄUDEKLASSE 4																	
Tragende Bauteile	R 60 3)	R 60 49)	R 60 716)	R 60 49)	R 60 716(1)	R 60 716)	R 60 799)	R 60 716)	R 60 716)	R 60 29)	R 60 29)	R 60 3)	R 60 + K ₂ 60 ¹⁾	R 60 + K ₂ 60 ¹⁾	R 60 + K ₂ 60 ¹⁾	R 60 716)	R 60 716)
Trennwände	Ei 60 3)	Ei 60 49)	Ei 60 716)	Ei 60 49)	Ei 60 716(1)	Ei 60 716)	Ei 60 799)	Ei 60 716)	Ei 60 716)	Ei 60 29)	Ei 60 29)	Ei 60 3)	Ei 60 + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60 + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60 + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60 716)	Ei 60 716)
Nichttragende Außenwände	E 30 (I--O) Ei 30-e ¹⁾																
Brandwände	Ei 60-M 3)	Ei 60-M 49)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 49)	Ei 60-M 716(1)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 799)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 29)	Ei 60-M 29)	Ei 60-M 3)	Ei 60-M + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60-M + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60-M + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 716)
Decken	REI 60 3)	REI 60 49)	REI 60 716)	REI 60 49)	REI 60 716(1)	REI 60 716)	REI 60 799)	REI 60 716)	REI 60 716)	REI 60 29)	REI 60 29)	REI 60 3)	REI 60 + K ₂ 60 ¹⁾	REI 60 + K ₂ 60 ¹⁾	REI 60 + K ₂ 60 ¹⁾	REI 60 716)	REI 60 716)
Tragende Teile notw. Treppen	[nb]																
Wände notw. Treppenträume	Ei 60-M 3)	Ei 60-M 49)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 49)	Ei 60-M 716(1)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 799)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 29)	Ei 60-M 29)	Ei 60-M 3)	Ei 60-M + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60-M + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60-M + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60-M 716)	Ei 60-M 716)
Wände notw. Flure	Ei 30						Ei 30									Ei 30	
Aufzugschachtwände	Ei 60 3)	Ei 60 49)	Ei 60 716)	Ei 60 49)	Ei 60 716(1)	Ei 60 716)	Ei 60 799)	Ei 60 716)	Ei 60 716)	Ei 60 29)	Ei 60 29)	Ei 60 3)	Ei 60 + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60 + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60 + K ₂ 60 ¹⁾	Ei 60 716)	Ei 60 716)
GEBÄUDEKLASSE 5																	
Tragende Bauteile	R 90 3)	R 90 6)	R 90 10)	R 90 6)	R 90 10(1)	R 90 10)	R 90 89)	R 90 10)	R 90 10)	R 90 2)	R 90 2)	R 90 3)	R 90 3)	R 90 3)	R 90 3)	R 90 10)	R 90 10)
Trennwände	Ei 90 3)	Ei 90 6)	Ei 90 10)	Ei 90 6)	Ei 90 10(1)	Ei 90 10)	Ei 90 89)	Ei 90 10)	Ei 90 10)	Ei 90 2)	Ei 90 2)	Ei 90 3)	Ei 90 3)	Ei 90 3)	Ei 90 3)	Ei 90 10)	Ei 90 10)
Nichttragende Außenwände	E 30 (I--O) Ei 30-e ¹⁾ REI 90-M [nb]																
Brandwände	REI 90 3)	REI 90 6)	REI 90 10)	REI 90 6)	REI 90 10(1)	REI 90 10)	REI 90 89)	REI 90 10)	REI 90 10)	REI 90 2)	REI 90 2)	REI 90 3)	REI 90 3)	REI 90 3)	REI 90 3)	REI 90 10)	REI 90 10)
Decken	REI 90 3)	REI 90 6)	REI 90 10)	REI 90 6)	REI 90 10(1)	REI 90 10)	REI 90 89)	REI 90 10)	REI 90 10)	REI 90 2)	REI 90 2)	REI 90 3)	REI 90 3)	REI 90 3)	REI 90 3)	REI 90 10)	REI 90 10)
Tragende Teile notw. Treppen	R 30 [nb]																
Wände notw. Treppenträume	Ei 90-M [nb]																
Wände notw. Flure	Ei 30						Ei 30									Ei 30	
Aufzugschachtwände	Ei 90 [nb]															Ei 30	

¹⁾ Ausführung nach M-HF-Holzwerk zusätzlich weiterhin möglich
²⁾ Nur in Massholzbauteilen und nur wenn Aufzugsanlagen mit jeweils nicht mehr als 200 m² und Brandabschnittsflächen von nicht mehr als 100 m² pro Geschoss
³⁾ Aus der in der jeweiligen Verwaltungsverordnung benannten technischen Baubestimmungen entsprechenden, Abweichungen von dieser müssen von der Baubehörde genehmigt werden. **ACHTUNG: diese technische Baubestimmung existiert aktuell nicht.**
⁴⁾ Artikel 2 des Gesetzes vom 18. Dezember 2020 (GVBl. I Nr. 44 S. 3) tritt am dem Tag in Kraft, an dem die Musterbauordnung in der Verwaltungsverordnung Technische Baubestimmungen im Amtsblatt für Brandenburg bekannt gemacht wird.
⁵⁾ Richtlinie ist über einen Vollzugsheft vom 21. 07. 2021 als Grundlage für Planer und Behörden definiert
⁶⁾ Dynamischer Verweis auf die aktuelle von DIB vernetzte M-V 78
⁷⁾ In Holzbauteile möglich
⁸⁾ Nicht in Holzbauteile möglich
⁹⁾ Wenn die erforderliche Feuerwiderstandsdauer gewährleistet ist
¹⁰⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁾ E 30 (I--O)
¹²⁾ E 30 (I--O)
¹³⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁾ E 30 (I--O)
²¹⁾ E 30 (I--O)
²²⁾ E 30 (I--O)
²³⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁾ E 30 (I--O)
³¹⁾ E 30 (I--O)
³²⁾ E 30 (I--O)
³³⁾ E 30 (I--O)
³⁴⁾ E 30 (I--O)
³⁵⁾ E 30 (I--O)
³⁶⁾ E 30 (I--O)
³⁷⁾ E 30 (I--O)
³⁸⁾ E 30 (I--O)
³⁹⁾ E 30 (I--O)
⁴⁰⁾ E 30 (I--O)
⁴¹⁾ E 30 (I--O)
⁴²⁾ E 30 (I--O)
⁴³⁾ E 30 (I--O)
⁴⁴⁾ E 30 (I--O)
⁴⁵⁾ E 30 (I--O)
⁴⁶⁾ E 30 (I--O)
⁴⁷⁾ E 30 (I--O)
⁴⁸⁾ E 30 (I--O)
⁴⁹⁾ E 30 (I--O)
⁵⁰⁾ E 30 (I--O)
⁵¹⁾ E 30 (I--O)
⁵²⁾ E 30 (I--O)
⁵³⁾ E 30 (I--O)
⁵⁴⁾ E 30 (I--O)
⁵⁵⁾ E 30 (I--O)
⁵⁶⁾ E 30 (I--O)
⁵⁷⁾ E 30 (I--O)
⁵⁸⁾ E 30 (I--O)
⁵⁹⁾ E 30 (I--O)
⁶⁰⁾ E 30 (I--O)
⁶¹⁾ E 30 (I--O)
⁶²⁾ E 30 (I--O)
⁶³⁾ E 30 (I--O)
⁶⁴⁾ E 30 (I--O)
⁶⁵⁾ E 30 (I--O)
⁶⁶⁾ E 30 (I--O)
⁶⁷⁾ E 30 (I--O)
⁶⁸⁾ E 30 (I--O)
⁶⁹⁾ E 30 (I--O)
⁷⁰⁾ E 30 (I--O)
⁷¹⁾ E 30 (I--O)
⁷²⁾ E 30 (I--O)
⁷³⁾ E 30 (I--O)
⁷⁴⁾ E 30 (I--O)
⁷⁵⁾ E 30 (I--O)
⁷⁶⁾ E 30 (I--O)
⁷⁷⁾ E 30 (I--O)
⁷⁸⁾ E 30 (I--O)
⁷⁹⁾ E 30 (I--O)
⁸⁰⁾ E 30 (I--O)
⁸¹⁾ E 30 (I--O)
⁸²⁾ E 30 (I--O)
⁸³⁾ E 30 (I--O)
⁸⁴⁾ E 30 (I--O)
⁸⁵⁾ E 30 (I--O)
⁸⁶⁾ E 30 (I--O)
⁸⁷⁾ E 30 (I--O)
⁸⁸⁾ E 30 (I--O)
⁸⁹⁾ E 30 (I--O)
⁹⁰⁾ E 30 (I--O)
⁹¹⁾ E 30 (I--O)
⁹²⁾ E 30 (I--O)
⁹³⁾ E 30 (I--O)
⁹⁴⁾ E 30 (I--O)
⁹⁵⁾ E 30 (I--O)
⁹⁶⁾ E 30 (I--O)
⁹⁷⁾ E 30 (I--O)
⁹⁸⁾ E 30 (I--O)
⁹⁹⁾ E 30 (I--O)
¹⁰⁰⁾ E 30 (I--O)
¹⁰¹⁾ E 30 (I--O)
¹⁰²⁾ E 30 (I--O)
¹⁰³⁾ E 30 (I--O)
¹⁰⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁰⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁰⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁰⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁰⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁰⁹⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁰⁾ E 30 (I--O)
¹¹¹⁾ E 30 (I--O)
¹¹²⁾ E 30 (I--O)
¹¹³⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁴⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁵⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁶⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁷⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁸⁾ E 30 (I--O)
¹¹⁹⁾ E 30 (I--O)
¹²⁰⁾ E 30 (I--O)
¹²¹⁾ E 30 (I--O)
¹²²⁾ E 30 (I--O)
¹²³⁾ E 30 (I--O)
¹²⁴⁾ E 30 (I--O)
¹²⁵⁾ E 30 (I--O)
¹²⁶⁾ E 30 (I--O)
¹²⁷⁾ E 30 (I--O)
¹²⁸⁾ E 30 (I--O)
¹²⁹⁾ E 30 (I--O)
¹³⁰⁾ E 30 (I--O)
¹³¹⁾ E 30 (I--O)
¹³²⁾ E 30 (I--O)
¹³³⁾ E 30 (I--O)
¹³⁴⁾ E 30 (I--O)
¹³⁵⁾ E 30 (I--O)
¹³⁶⁾ E 30 (I--O)
¹³⁷⁾ E 30 (I--O)
¹³⁸⁾ E 30 (I--O)
¹³⁹⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁰⁾ E 30 (I--O)
¹⁴¹⁾ E 30 (I--O)
¹⁴²⁾ E 30 (I--O)
¹⁴³⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁴⁹⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁰⁾ E 30 (I--O)
¹⁵¹⁾ E 30 (I--O)
¹⁵²⁾ E 30 (I--O)
¹⁵³⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁵⁹⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁰⁾ E 30 (I--O)
¹⁶¹⁾ E 30 (I--O)
¹⁶²⁾ E 30 (I--O)
¹⁶³⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁶⁹⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁰⁾ E 30 (I--O)
¹⁷¹⁾ E 30 (I--O)
¹⁷²⁾ E 30 (I--O)
¹⁷³⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁷⁹⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁰⁾ E 30 (I--O)
¹⁸¹⁾ E 30 (I--O)
¹⁸²⁾ E 30 (I--O)
¹⁸³⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁸⁹⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁰⁾ E 30 (I--O)
¹⁹¹⁾ E 30 (I--O)
¹⁹²⁾ E 30 (I--O)
¹⁹³⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁴⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁵⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁶⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁷⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁸⁾ E 30 (I--O)
¹⁹⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁰⁾ E 30 (I--O)
²⁰¹⁾ E 30 (I--O)
²⁰²⁾ E 30 (I--O)
²⁰³⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁰⁹⁾ E 30 (I--O)
²¹⁰⁾ E 30 (I--O)
²¹¹⁾ E 30 (I--O)
²¹²⁾ E 30 (I--O)
²¹³⁾ E 30 (I--O)
²¹⁴⁾ E 30 (I--O)
²¹⁵⁾ E 30 (I--O)
²¹⁶⁾ E 30 (I--O)
²¹⁷⁾ E 30 (I--O)
²¹⁸⁾ E 30 (I--O)
²¹⁹⁾ E 30 (I--O)
²²⁰⁾ E 30 (I--O)
²²¹⁾ E 30 (I--O)
²²²⁾ E 30 (I--O)
²²³⁾ E 30 (I--O)
²²⁴⁾ E 30 (I--O)
²²⁵⁾ E 30 (I--O)
²²⁶⁾ E 30 (I--O)
²²⁷⁾ E 30 (I--O)
²²⁸⁾ E 30 (I--O)
²²⁹⁾ E 30 (I--O)
²³⁰⁾ E 30 (I--O)
²³¹⁾ E 30 (I--O)
²³²⁾ E 30 (I--O)
²³³⁾ E 30 (I--O)
²³⁴⁾ E 30 (I--O)
²³⁵⁾ E 30 (I--O)
²³⁶⁾ E 30 (I--O)
²³⁷⁾ E 30 (I--O)
²³⁸⁾ E 30 (I--O)
²³⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁰⁾ E 30 (I--O)
²⁴¹⁾ E 30 (I--O)
²⁴²⁾ E 30 (I--O)
²⁴³⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁴⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁰⁾ E 30 (I--O)
²⁵¹⁾ E 30 (I--O)
²⁵²⁾ E 30 (I--O)
²⁵³⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁵⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁰⁾ E 30 (I--O)
²⁶¹⁾ E 30 (I--O)
²⁶²⁾ E 30 (I--O)
²⁶³⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁶⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁰⁾ E 30 (I--O)
²⁷¹⁾ E 30 (I--O)
²⁷²⁾ E 30 (I--O)
²⁷³⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁷⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁰⁾ E 30 (I--O)
²⁸¹⁾ E 30 (I--O)
²⁸²⁾ E 30 (I--O)
²⁸³⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁸⁹⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁰⁾ E 30 (I--O)
²⁹¹⁾ E 30 (I--O)
²⁹²⁾ E 30 (I--O)
²⁹³⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁴⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁵⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁶⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁷⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁸⁾ E 30 (I--O)
²⁹⁹⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁰⁾ E 30 (I--O)
³⁰¹⁾ E 30 (I--O)
³⁰²⁾ E 30 (I--O)
³⁰³⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁴⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁵⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁶⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁷⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁸⁾ E 30 (I--O)
³⁰⁹⁾ E 30 (I--O)
³¹⁰⁾ E 30 (I--O)
³¹¹⁾ E 30 (I--O)
³¹²⁾ E 30 (I--O)
³¹³⁾ E 30 (I--O)
³¹⁴⁾ E 30 (I--O)
³¹⁵⁾ E 30 (I--O)
³¹⁶⁾ E 30 (I--O)
³¹⁷⁾ E 30 (I--O)
³¹⁸⁾ E 30 (I--O)
³¹⁹⁾ E 30 (I--O)
³²⁰⁾ E 30 (I--O)
³²¹⁾ E 30 (I--O)
³²²⁾ E 30 (I--O)
³²³⁾ E 30 (I--O)
³²⁴⁾ E 30 (I--O)
³²⁵⁾ E 30 (I--O)
³²⁶⁾ E 30 (I--O)
³²⁷⁾ E 30 (I--O)
³²⁸⁾ E 30 (I--O)
³²⁹⁾ E 30 (I--O)
³³⁰⁾ E 30 (I--O)
³³¹⁾ E 30 (I--O)
³³²⁾ E 30 (I--O)
³³³⁾ E 30 (I--O)
³³⁴⁾ E 30 (I--O)
³³⁵⁾ E 30 (I--O)
³³⁶⁾ E 30 (I--O)
³³⁷⁾ E 30 (I--O)
³³⁸⁾ E 30 (I--O)
³³⁹⁾ E 30 (I--O)
³⁴⁰⁾ E 30 (I--O)

2.3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Forschungsvorhaben TIMpuls wurde unter der Trägerschaft der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. als Verbundvorhaben von vier Forschungspartnern, im Zeitraum vom 01.08.2017 bis zum 31.07.2020 durchgeführt. Aufgrund verschiedener Faktoren wurde die Projektlaufzeit um weitere fünf Monate bis zum 31.12.2020 verlängert. Eine zusätzliche Laufzeitverlängerung von drei Monaten bis zum 31.03.2021 erfolgte durch die Eindämmungsmaßnahmen (Lockdown) infolge der Coronavirus SARS-CoV-2 Pandemie. Außerdem erfolgte eine Zusammenarbeit mit den Beteiligten des projektbegleitenden Ausschusses im Zuge der Sitzungen sowie bei den experimentellen Untersuchungen.

Ein zentraler Baustein des Forschungsvorhabens ist der „projektbegleitende Ausschuss“, der sich aus Vertretern von Bauaufsichtsbehörden, Brandschutzdienststellen bzw. Feuerwehren, Versicherungen, Brandschutzplanern, Holzbauplanern und Vertretern des Zimmerergewerbes zusammensetzt. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse werden den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses regelmäßig vorgestellt und gemeinschaftlich diskutiert. Die interdisziplinäre Zusammensetzung des Ausschusses garantiert eine konsequente Betrachtung aller fachspezifisch maßgebenden Anforderungen und soll eine partnerschaftlich fachliche Diskussion über die gewonnenen Ergebnisse ermöglichen. Der projektbegleitende Ausschuss hat sich wie folgt zusammengesetzt:

Tabelle 1: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses

Name	Institution	Kategorie
Ltd. BD Dipl.-Ing. (FH) Peter Bachmeier	Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz der deutschen Feuerwehren	Feuerwehr
Dipl.-Ing. (FH) Lutz Battran	Versicherungskammer Bayern	Versicherung
Walter Bauer	Holzbau Deutschland Institut e. V.	Wirtschaft
Dipl.-Ing. Andreas Bell	Projektgruppe Brandschutz der Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU	Bauaufsicht
Prof. Dipl.-Ing. Architekt Ludger Dederich	Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg	Wissenschaft
Dipl.-Ing. Alexander Gump	Landesinnungsverband des Bayerischen Zimmererhandwerks	Wirtschaft
Dipl.-Ing. Heike Hohmann	Freie und Hansestadt Hamburg Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen Amt für Bauordnung und Hochbau	Bauaufsicht
Prof. Dr.-Ing. Dirk Kruse	Dehne, Kruse Brandschutzingenieure GmbH & Co.	Ingenieurbüro
Dipl.-Ing. Georg Lange	Bundesverband Deutscher Fertigtbau e.V.	Wirtschaft
BD Dipl.-Phys. Björn Maiworm	Landeshauptstadt München, Kreisverwaltungsreferat Branddirektion, Einsatzvorbeugung	Feuerwehr
Johannes Niedermeyer	Holzbau Deutschland	Wirtschaft
Dipl.-Ing. Wolfgang Schäfer	DHV-Deutscher Holzfertigtbau-Verband e.V.	Wirtschaft
BAR Dipl.-Ing. (FH) Alexander Wellisch	Freie und Hansestadt Hamburg - Behörde für Inneres und Sport - Feuerwehr	Feuerwehr
Dipl.-Holzbau-Ing. HTL Reinhard Wiederkehr	Makiol Wiederkehr AG	Ingenieurbüro
Dr. Ing. Tobias Wiegand	Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.	Wissenschaft



Das Vorhaben wurde mit den Forschungspartnern Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Fachgebiet Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit, Fachgebiet Brandschutz und Baukonstruktion der Hochschule Magdeburg-Stendal und Abteilung Forschung – Institut der Feuerwehr des Instituts für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge gemeinsam bearbeitet.

Teilvorhaben 1

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen, abgesehen von beauftragten Firmen bei den experimentellen Untersuchungen, hat nicht stattgefunden.

Teilvorhaben 2

Eine Zusammenarbeit mit anderen Stellen, abgesehen von beauftragten Firmen bei den experimentellen Untersuchungen, hat nicht stattgefunden.

Teilvorhaben 3

Bereitstellung von Brettschichtholz-Versuchskörpern der Firma HASSLACHER NORICA TIMBER, Werk Magdeburg, Herr Georg Jeitler.

Entwurf und Bemessung einer Holz-Beton-Verbunddecke durch PIRMIN JUNG Deutschland GmbH, Herr Sebastian Dienst.

Herstellung einer Holz-Beton-Verbunddecke durch Baumgarten GmbH, Herr Holger Fröhlich und Elementbau Osthessen GmbH, Herr Christoph Wurst.

Teilvorhaben 4

Für einen leichteren Zugang und einer grundlegenden Akzeptanz für die durchgeführte Umfrage bei den Feuerwehren, erfolgte die Verteilung des Fragebogens über den Fachausschuss Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz (FA VB/G) der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland (AGBF Bund). Die Vorgehensweise der Verteilung wurde mit den Projektpartnern und den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses abgestimmt.

3 Ergebnisse

3.1 Erzielte Ergebnisse

3.1.1 Arbeitspaket 1 Theoretische Grundlagenermittlung - Stand der Wissenschaft und Technik

3.1.1.1 Marktanalyse

Mit einer Marktanalyse basierend auf Recherchearbeiten/ Fachliteratur/ direkte Anfragen bei Ingenieurbüros ist eine Zeitaufnahme von mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise in Deutschland erarbeitet worden. Betrachtet wurden hierbei lediglich Gebäude der Gebäudeklasse (GK) 4 und 5 nach MBO. Der erfasste Zeitraum reicht von 1996 bis 2017. Die zusammengetragenen Gebäude sind bereits errichtet, in Fertigstellung oder in Planung. Die Zuordnung der recherchierten Gebäude entsprechend der Standorte nach Bundesland zeigt deutlich, dass die südlichen Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg sowie die Stadtstaaten Berlin und Hamburg die meisten Gebäude im betrachteten Zeitraum aufwiesen. Die verbleibenden Bundesländer konnten nur vereinzelt mehrgeschossige Holzgebäude der GK 4 oder 5 aufweisen. Dies liegt zum einen an der regionalen baulichen Geschichte in den Bundesländern sowie dem ökologischen Bewusstsein der Bauherren, zum anderen bei den Stadtstaaten an der Herausforderung der Nachverdichtung.

Eine Auswertung der 110 Objekte erfolgte hinsichtlich der Gebäudeklasse, der primären Bauweise, der Bauweise der tragenden oder raumabschließenden Bauteile, den baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen, den Abweichungen und Kompensationsmaßnahmen und dem Standort (Bundesland). Zu beachten galt hierbei, dass die erhobenen Daten aus den Quellen Fachartikel/ Internetseiten zum Teil unvollständig bzw. hinsichtlich des Brandschutzes nicht ausreichend publiziert waren und daher die recherchierten Daten nicht in allen Parametern vollständig vorliegen. Des Weiteren repräsentiert die Liste der mehrgeschossigen Holzgebäude nicht die Gesamtheit aller Gebäude.

Die recherchierten Zahlen zeigen, dass 74 % der im Rahmen der Studie betrachteten Gebäude der Gebäudeklasse 4 zuzuordnen sind. Die restlichen 26 % nehmen Gebäude der GK 5 ein, wie Abbildung 3 darstellt. Hinsichtlich der angewendeten Bauweisen lässt sich eine gleichmäßige Verteilung feststellen, welche sich auch aus der Funktion ableiten lässt. Massivholzbau und Hybridbau (Verbund von Holzbauweise mit Stahlbetonbauweise) / Stahlbetonbau bilden meist die tragende Struktur während der Holztafelbau oftmals eine thermisch trennende Funktion (Außenwand) bzw. nichttragende Innenwände erfüllt. In Abhängigkeit der Funktion des Bauteils bestehen mehrgeschossige Holzgebäude zumeist aus allen drei aufgeführten Bauweisen.

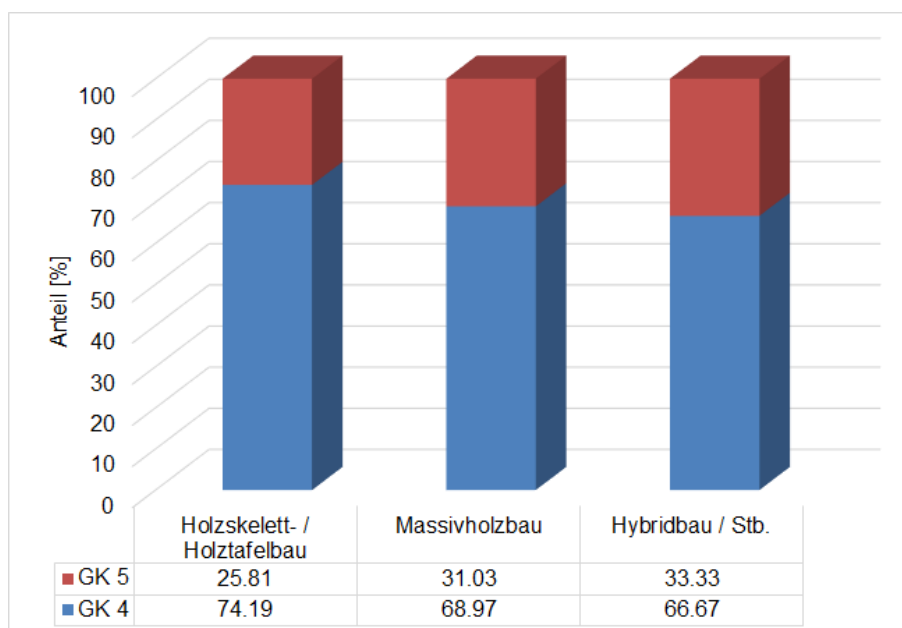


Abbildung 3: Anteil der Bauweisen nach Gebäudeklasse in Prozent

Mit den erhobenen Zahlen wurden die im Weiteren betrachteten Bauweisen und Bauarten im TIMpuls unter Zuhilfenahme von Zahlenwerten untermauert. Ebenso konnten anhand der umgesetzten Abweichungen und Kompensationen (z. B. Ausbildung der Brandschutzbekleidung, vgl. Abbildung 4) Tendenzen der Bauwirtschaft beobachtet werden, die im Rahmen des TIMpuls aufgenommen wurden.

Ausbildung der Brandschutzbekleidung nach Gebäudeklasse [%]

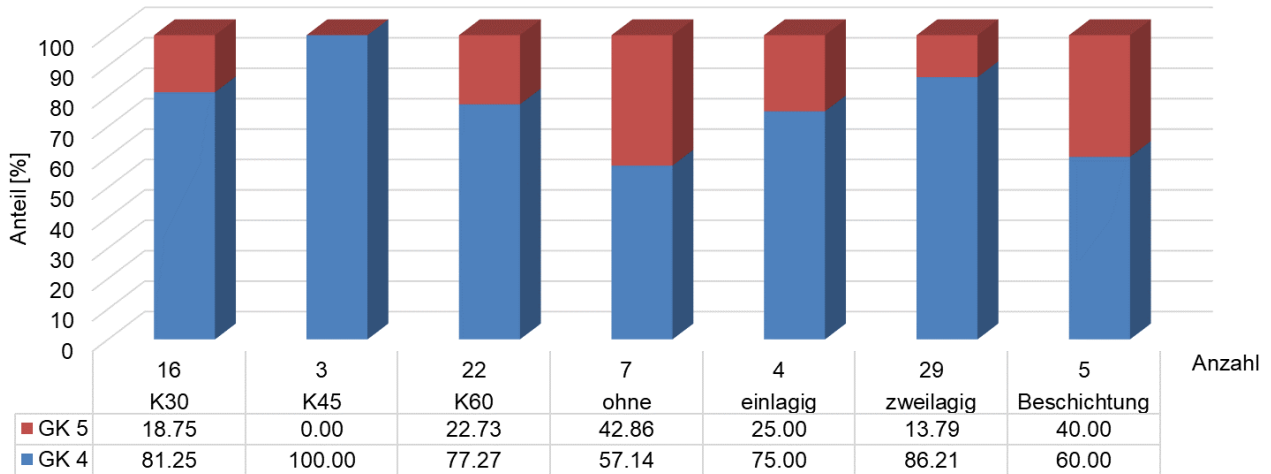


Abbildung 4: Ausbildung der Brandschutzbekleidung im mehrgeschossigen Holzbau

3.1.1.2 Durchgeführte Raumbrandversuche an Holzbaukonstruktionen aus der internationalen Literatur

Eine Recherche der internationalen Literatur zeigt, dass in den letzten 20 Jahren eine größere Anzahl an Raumbrandversuchen mit teilweise ungeschützten und anfänglich geschützten Holzbauteilen unter Realbrandlasten durchgeführt wurde (oftmals sind auch Vergleichsversuche mit vollständig geschützten Oberflächen durchgeführt). Die Abbildung 5 stellt eine qualitative Gegenüberstellung von Temperaturzeitkurven recherchierter Raumbrandversuche an Holzbaukonstruktionen im Vergleich zur ETK dar. Die recherchierten Raumbrandversuche wurden hinsichtlich der geometrischen und versuchstechnischen Randbedingungen analysiert, um hieraus Fragestellungen der im TIMpuls durchzuführenden Raumbrandversuche zu erschließen. Die veröffentlichten Ergebnisse der Raumbrandversuche konnten, durch einen teilweise abweichenden Fokus, die weitreichenden Fragestellungen im TIMpuls nur bedingt beantworten.

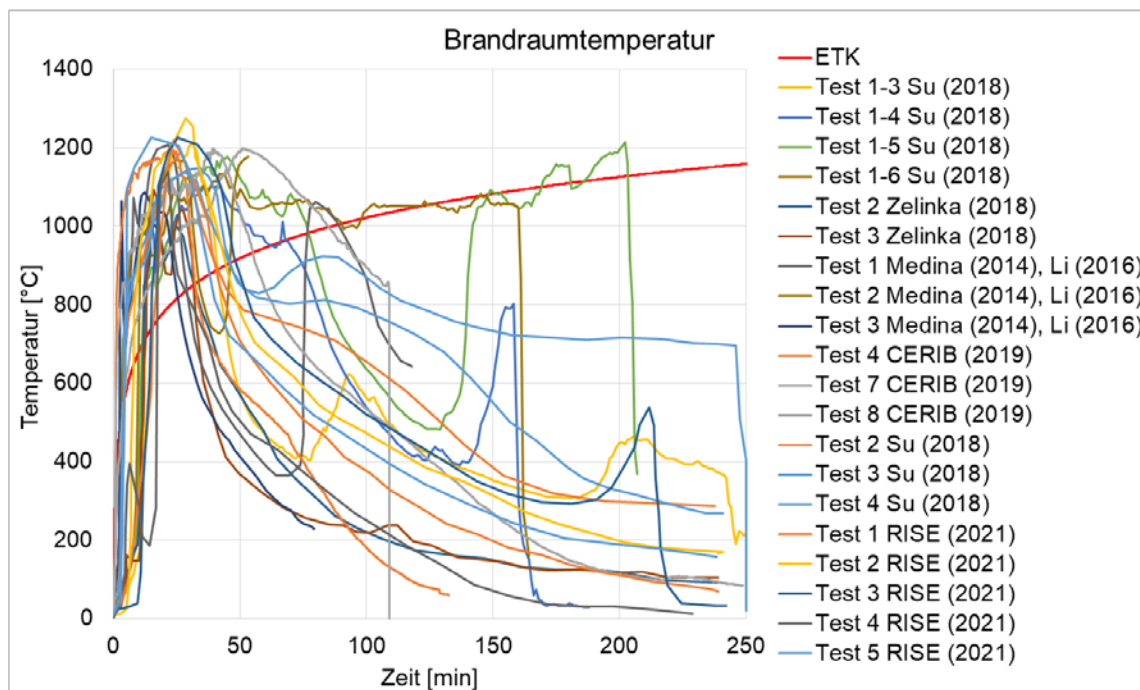


Abbildung 5: Übersicht diverser experimenteller Brandraumtemperaturen von Raumbränden mit teilweise ungeschützten Holzflächen

Die im TIMpuls durchgeführten Raumbrandversuche sollten das Brandverhalten bzw. die Branddynamik bei Bränden in Räumen mit ungeschützten sowie anfänglich geschützten Holzbauteilen darstellen. Die Branddynamik beschreibt das Zusammenspiel der Verbrennung innerhalb eines definierten Raumes unter Berücksichtigung der Ventilationsbedingungen. Es wurde vor allem der Einfluss von ungeschützten Holzflächen auf die drei Brandphasen - Brandentwicklung, stationäre Brandphase und Abklingphase - analysiert. Hierfür wurden zunächst mittelskalige Raumbrandversuche im Room Corner Testraum nach ISO 9705-1 [34] zur Untersuchung diverser Einflüsse durch ungeschützte Holzflächen durchgeführt. Im weiteren Projektverlauf wurden Großbrandversuche in einem Brandofen im Realmaßstab durchgeführt. Hierbei wurde der Fokus auf das Feuerwiderstandsverhalten des gesamten Bauteils inkl. Anschlussdetails (Wand-Wand; Wand-Decke) gelegt. Abschließend wurden auf Basis dieser Erkenntnisse Belegversuche mit Realbrandlasten (Holzkrippen) und natürlichen Ventilationsbedingungen durchgeführt.

Die in Abbildung 6 dargestellte Massen- und Wärmebilanz zeigt die Änderung der Branddynamik durch die zusätzliche strukturelle (immobile) Brandlast. Infolge ungeschützter Massivholzbauteile befindet sich im Brandraum, neben dem Quellterm der Massenfreisetzung (\dot{R}_1) der mobilen Brandlast, ein weiterer Quellterm, die strukturelle Brandlast. Die zusätzliche Massenfreisetzung der strukturellen Brandlast (\dot{R}_2) besitzt einen signifikanten Einfluss auf die Branddynamik im Brandraum. Die folgende Gleichung beschreibt die Massenbilanz im Brandraum gemäß Abbildung 6, \dot{m}_g bezeichnet den Massenstrom des Heißgases, \dot{m}_l den Massenstrom der in den Brandraum nachströmenden Luft. :

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + \dot{R}_1 + \dot{R}_2) = 0$$

Die Energiebilanz im Brandraum nach Abbildung 6 ergibt sich wie folgt:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_l + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0$$

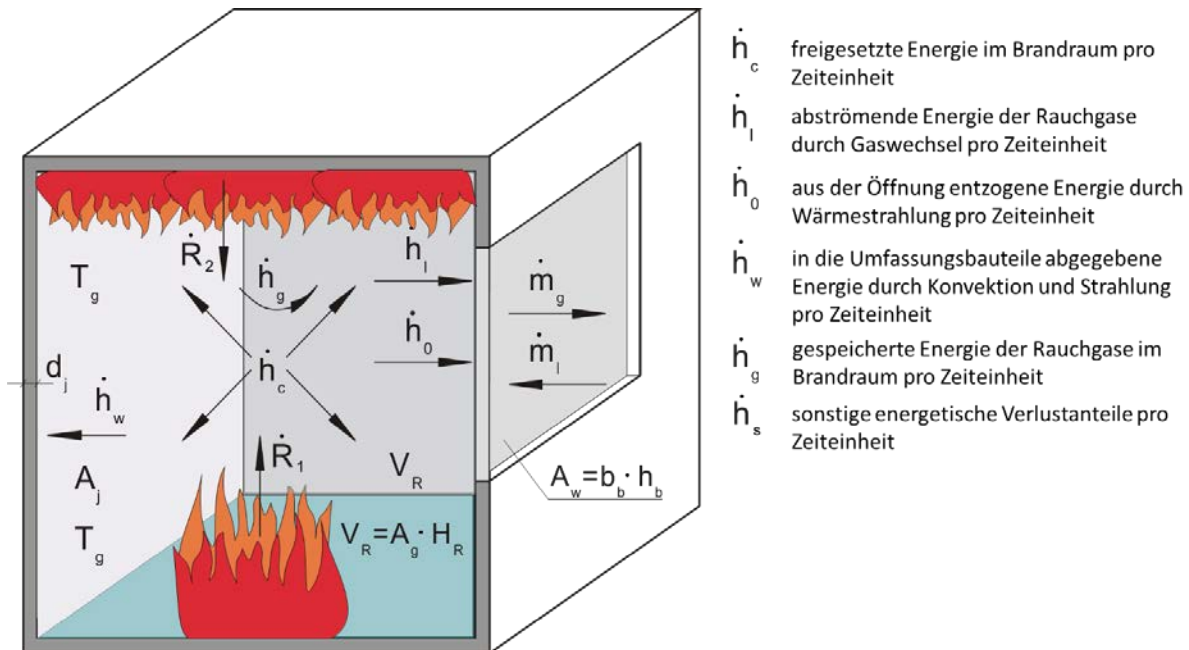


Abbildung 6: Bilanz der Wärme- und Massenströme (Ursprungsgrafik aus [128])

3.1.1.3 Aufbereitung, Analyse, Gegenüberstellung der präskriptiven Anforderungen für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise

Wer Planungs- oder Bauleistungen anbieten möchte, muss dafür Sorge tragen, dass die öffentlich-rechtlichen Anforderungen eingehalten werden. Dies gilt für das Bauen mit Holz genauso, wie für das Bauen mit anderen Baustoffen. Der Planungs- und Bauablauf im Holzbau ist maßgeblich durch die hohen Vorfertigungsmöglichkeiten geprägt. Bereits in den frühen Planungsphasen sind, neben den ersten architektonischen Überlegungen, Fertigungsabhängigkeiten (Elementgrößen und Montageablauf) des Holzbauunternehmens im Entwurf zu berücksichtigen.

Das Planungsteam muss über die notwendigen Fachkenntnisse für das baurechtskonforme Planen und Bauen mit Holz verfügen. Dies bedingt ein vertieftes bauordnungsrechtliches Wissen über die Anwendbarkeit von Bauteilen, deren Nachweismöglichkeiten und die werkstoffbezogenen baukonstruktiven Grundsätze. Als Ergebnis der Planungsphase muss eine holzbaugerechte und bauordnungsrechtlich abgesicherte (genehmigungsfähige) Planung vorliegen.

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführte Analyse der präskriptiven Anforderungen für Gebäude in Holzbauweise und deren Zusammenhänge und Abhängigkeiten stellen die ersten Grundlagen für den Brandschutznavigator [57] dar. Die Weiterentwicklung erfolgte unabhängig von diesem Vorhaben.

Der Brandschutznavigator kann für alle Planungs- und Baubeteiligten als Navigator durch das „bauordnungsrechtliche Sammelsurium an Vorschriften“ dienen. Er zeigt die aktuellen bauordnungsrechtlichen Möglichkeiten, Hintergründe und Zusammenhänge, wie Bauteile mit Anforderungen an den Feuerwiderstand in Holztafel- und Holzmassivbauweise baurechtskonform realisiert werden können. Weiter stellt er Informationen über die erforderlichen Nachweise bereit und erklärt, wie die Übereinstimmungsbestätigungen nach der erfolgreichen Bauausführung zu dokumentieren sind. Durch konkrete Beispiele wird der Sachverhalt praxisnah erklärt.

Der Brandschutznavigator und die erklärende Anleitung (Konzeptheft) stehen Interessierten auf der Website zum Download zur Verfügung (www.brandschutznavigator.de).

3.1.1.4 Beurteilungskonzepte für Brandeinwirkungen

Die Auswirkungen eines Brandes auf die umliegende Struktur in Form einer thermischen Beanspruchung kann durch den auf die Oberfläche der Struktur einwirkenden Wärmestrom beschrieben werden. Dieser besteht aus einem konvektiven und einem radiativen Anteil. Die mathematische Formulierung dieser Anteile ist in DIN EN 1991-1-2 [1] angegeben. Für die Bemessung von Bauteilen wird häufig eine Temperaturzeitkurve als thermische Einwirkung herangezogen.

Auf Grundlage zahlreicher systematischer Brandversuche an Holzmöbeln und Holzkrippen wurde die amerikanische Standard-Brandversuchskurve zur Abbildung von Raumbränden im Hochbau entwickelt, die weitestgehend der heutigen Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach [2] entspricht. Die ETK beschreibt nur die Vollbrandphase und vernachlässigt die Brandentwicklungs- und Abkühlphase eines natürlichen Brandverlaufes. Die DIN 4102 enthielt ab 1940 die ETK als Standard-Brandversuchskurve. Hintergrund dieser Entwicklung war die Erkenntnis, dass der Temperaturverlauf in den ersten 60 Minuten in der Regel den entscheidenden Einfluss auf das Bauteilverhalten ausübt. In durchgeführten Brandversuchen wurden für diesen Zeitraum Temperaturen von 950 °C bis 1150 °C festgestellt, welche durch die Standard-Brandversuchskurve abgedeckt wurde. International wird die Einheits-Temperaturzeitkurve über die ISO 834-1 geregelt.

Soll im Zuge der Betrachtung eines realen Brandes bzw. eines natürlichen Brandverlaufes in einem Raum eine leistungsorientierte und realitätsnahe Ermittlung der thermischen Einwirkung erfolgen, können vereinfachte und allgemeine Brandmodelle angewendet werden. Für diese Brandmodelle können individuelle Annahmen hinsichtlich einer Vielzahl an möglichen bzw. erforderlichen Eingangsparameter getätigt werden. Zunächst kann eine Unterteilung der Brandmodelle in vereinfachte und in allgemeine Modelle erfolgen. Bei den vereinfachten Brandmodellen wird direkt mit Handrechenformeln basierend auf verschiedenen Ansätzen, Annahmen und Korrelationen, die Effekte der chemisch-physikalischen Vorgänge annähern, eine Temperaturzeitkurve berechnet. Allgemeine Modelle berechnen eine Temperaturzeitkurve mit Hilfe von numerischen Verfahren (Zonenmodelle, Feldmodelle), die eine nähere physikalische Betrachtung in Form von Erhaltungsgleichungen erlauben.

Vereinfachte Brandmodelle

Bei den empirischen Ansätzen handelt es sich um Verfahren, die aufgrund von Experimenten bezüglich einer spezifischen Fragestellung gewonnen werden. Durch geeignete Experimente werden die wesentlichen Einflussparameter und ihr physikalischer Zusammenhang ermittelt und in Form vereinfachter Gleichungen dargestellt. Daraus ergeben sich empirisch belegte Modellansätze für spezielle Problemstellungen, die teilweise selbst Bestandteil von komplexeren Rechenverfahren sein können. Bei Anwendung dieser Ansätze ist daher deren Gültigkeitsbereich und die mitunter angegebene Fehlergrenze stets zu beachten. [3]

Eine weitere Differenzierung der vereinfachten Brandmodelle ist hinsichtlich der Anwendungsbereiche in Preflashover-Modelle, Postflashover-Modelle und Flashover-Modelle möglich. Die Preflashover-Modelle beschreiben den Brandverlauf bevor ein Flashover bzw. ein Vollbrand eingetreten ist. Die Postflashover-Modelle beschreiben den Brandverlauf auch nach dem Eintritt des Flashovers inkl. der anschließenden Vollbrandphase. Ein Flashover-Modell ermittelt in Abhängigkeit der Raumgeometrie und Ventilations-verhältnisse die benötigte Wärmeenergie, die zum Eintritt eines Flashovers führt.

Folgende Ansätze wurden recherchiert und analysiert:

Preflashover

- Ansatz von McCaffrey, Quintierre und Harkleroad [4]
- Ansatz von Foote, Pangi und Alvares [5]
- Ansatz von Deal und Beyler [6]
- Ansatz von Peatross und Beyler [7]
- Ansatz von Beyler [8]

Postflashover

- Ansatz von Magnusson und Thelandersson [9] (Grundlage für die parametrischen Temperaturzeitkurven in DIN EN 1991-1-2 [1], Anhang A)
- Ansatz von Babrauskas [14] und [15]
- Ansatz von Law [16]
- Ansatz nach Delichatsios, Lee und Tofilo [17]

- der Japanischen Abwandlung des Ansatzes von McCaffrey, Quintierre und Harkleroad [18]
- Ansatz von Feasey und Buchanan [19]
- Ansatz von Barnett [20]
- Ansatz von Zehfuß (Naturbrandmodell) [12] und [13] (Grundlage für das vereinfachte Naturbrandmodell in DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang AA [21])
- Ansatz von Ma und Mäkeläinen [23]

Flashover

- Ansatz von Babrauskas [26]
- Ansatz von McCaffrey, Quintierre und Harkleroad [4]
- Ansatz von Thomas [22]

Die zusammengetragenen, empirischen Ansätze aus der Literatur wurden anhand grundlegender Eigenschaften wie Kurvenverlauf, Eingangsparameter, Anwendungsgrenzen, Komplexität und Ansatzgrundlage miteinander verglichen. Ziel dieser Analyse war es festzustellen, ob neben dem Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-2/NA [21] ein weiteres Brandmodell für eine Erweiterung zur Berücksichtigung brennbarer Raumboflächen herangezogen werden kann. Hierbei musste der empirische Ansatz zunächst einen natürlichen Brandverlauf mit Brandentwicklungsphase, stationäre Brandphase und Abkühlphase realitätsnah abbilden können. Zudem musste das empirische Modell eine Unterscheidung des Brandregimes in brandlast- und ventilationsgesteuert ermöglichen.

Für einen Vergleich verblieb aus den recherchierten Brandmodellen, auf Basis einer qualitativen Begutachtung, folgende Auswahl, da die übrigen Modelle die gesetzten Anforderungen nicht einhalten können:

- Parametrische Temperaturzeitkurven nach EC1-1-2 – Anhang A [1],
- Vereinfachtes Naturbrandmodell nach EC1-1-2/NA – Anhang AA [21],
- BFD-Kurven (Ansatz von Barnett) [20] und
- Ansatz von Delichatsios, Lee und Tofilo [17].

Aufgrund nicht ausreichender Angaben zur Bestimmung der adiabatischen Gastemperatur bzw. eine gezwungene Anwendung numerischer Gleichungslöser wurde der Ansatz von Delichatsios, Lee und Tofilo nicht weiter betrachtet, auch wenn die publizierten Kurven vielversprechende Verläufe aufweisen, da dieses Verfahren nicht mehr als Handrechenverfahren anzuwenden ist.

Die hohen Anforderungen an die empirischen Ansätze konnten nur von den sogenannten BFD-Kurven gemäß dem Ansatz von Barnett sowie dem Ansatz von Magnusson und Thelandersson, welche die parametrischen Temperaturzeitkurven nach DIN EN 1991-1-2 – Anhang A [21] entsprechen, erfüllt werden.

Die normativ geregelten parametrischen Temperaturzeitkurven und das vereinfachte Naturbrandmodell sowie die BFD-Kurven wurden jeweils in ein Tabellenkalkulationsprogramm implementiert. Anzumerken ist hier, dass die in der Veröffentlichung der BFD-Kurven [20] angegebenen Gleichungen fehlerbehaftet sind, mittels zusätzlicher Sekundärliteratur jedoch berichtigt werden konnten.

Auffällig bei der Analyse war, dass die parametrischen Temperaturzeitkurven sowie die BFD-Kurven durchweg Raumtemperaturen oberhalb 1000 °C berechneten, selbst wenn eine große Ventilationsöffnung vorlag. Dies lässt darauf deuten, dass bei einer Berücksichtigung brennbarer Holzoberflächen die Raumtemperaturen weiter ansteigen und über einen längeren Zeitraum anhalten.

Für die drei gewählten Brandmodelle folgte eine Überprüfung der Genauigkeit anhand experimenteller Daten aus der Literatur, welche in Kapitel III 3.1.1.2 aufgeführt sind (z. B. [127]). Durch den Vergleich mit experimentellen Daten von Raumbrandversuchen mit Realbrandlasten lässt sich die Eignung des Brandmodells für die Abbildung von realitätsnahen Raumbränden feststellen.

Die in Abbildung 7 beispielhaft abgebildeten Kurven zeigen deutlich, dass die BFD-Kurven und die parametrische Temperaturzeitkurve die Abkühlphase nur unzureichend abbilden. Auch für die Brandentstehungsphase weisen diese beiden Brandmodelle einen abweichenden Verlauf gegenüber den experimentellen Daten auf.

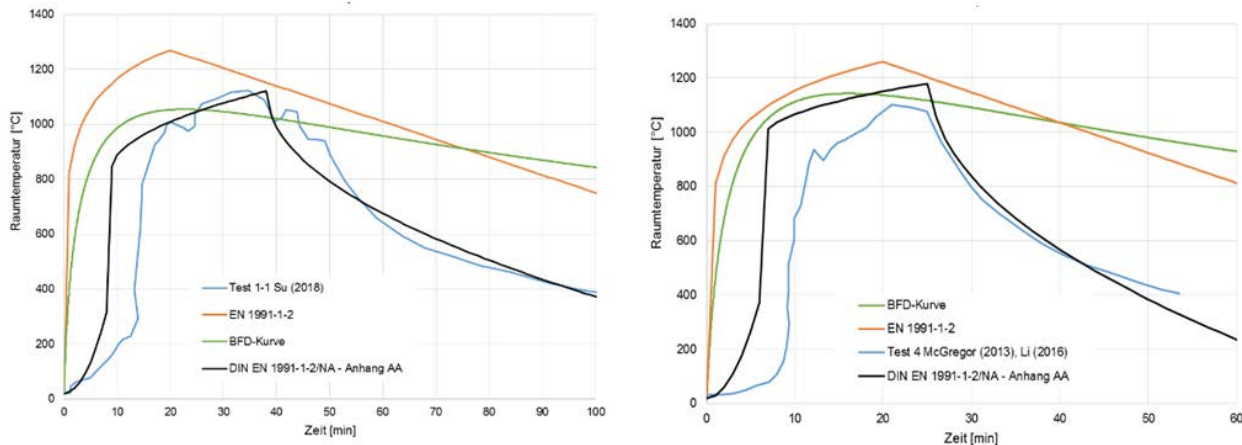


Abbildung 7: Vergleich der Brandraumtemperaturen unterschiedlicher Brandmodelle mit experimentellen Daten

Abschließend war festzustellen, dass von den recherchierten Brandmodellen lediglich das vereinfachte Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-2/NA [21] (im weiteren als Naturbrandmodell bezeichnet) einen natürlichen Brandverlauf hinreichend genau darstellen kann.

Hinsichtlich einer möglichen Erweiterung zur Berücksichtigung von ungeschützten Holzoberflächen und deren Beitrag zum Brandverlauf wurden die Formeln der drei betrachteten Brandmodelle analysiert. Prinzipiell muss sich die zusätzliche strukturelle Brandlast über die Brandlastdichte auf die Wärmefreisetzungsrate bzw. direkt auf die Temperaturentwicklung auswirken. Die Brandlastdichte ist bei jedem der betrachteten Brandmodelle ein wesentlicher Eingangsparameter. Ein Vorteil des Naturbrandmodells nach DIN EN 1991-1-2/NA [21] ist, dass in einem Zwischenschritt der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bestimmt wird. Über den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate lässt sich die zusätzliche Brandlast aus ungeschützten Holzoberflächen optimal berücksichtigen.

Allgemeine Brandmodelle

Der Verlauf eines natürlichen Brandes kann mit Verfahren auf Grundlage der Wärmebilanztheorie auf rechnerischem Wege ermittelt werden. Voraussetzung ist die Kenntnis der Randbedingungen wie Brandlasten, thermische Eigenschaften der Umfassungsbauteile und Ventilationsbedingungen. Um die komplexen Phänomene und physikalischen Prozesse eines Brandes zu beschreiben, wurden verschiedene mathematische Modelle entwickelt. Bei der Modellierung von Bränden werden vom Modelltyp her unterschieden:

- Vollbrandmodelle – Einzonenmodelle hier wird vorausgesetzt, dass im Brandraum ein voll entwickelter Brand herrscht. Der Anwendungsbereich von Einzonenmodellen ist auf kleine Räume beschränkt, bei denen sich bei sehr kurzer Brandentwicklungsphase nach dem Flashover aufgrund ihrer begrenzten Größe eine homogene Temperaturverteilung im gesamten Raum einstellt.
- Zonenmodelle – Mehrzonenmodellen werden Energie- und Massenbilanzen getrennt für verschiedene Zonen berechnet. Dabei wird unterschieden zwischen der oberen Heißgasschicht und der unteren Kaltgasschicht. Mit Mehrzonenmodellen lassen sich Brände in kleineren und mittleren Räumen, wie sie üblicherweise in Wohn- und Bürogebäuden vorhanden sind, mit ausreichender Genauigkeit simulieren. Für ausgedehnte Räume, wie z. B. im Industriebau sind Mehrraum-Mehrzonenmodelle geeigneter.
- CFD-Modelle (Computational Fluid Dynamics) – Feldmodelle hier wird der zu modellierende Raum in beliebig viele Kontrollvolumina (Elemente) unterteilt. Grundlage der Modellierung sind die partiellen Differentialgleichungen für die Massen-, Energie- und Impulserhaltung, die unter gegebenen Anfangs- und Randbedingungen numerisch gelöst werden. Für die Untersuchung lokaler Phänomene und von Bränden bei beliebigen Raumkonfigurationen können aufgrund des Detaillierungsgrades bei der Anwendung mit CFD-Modellen die besten Ergebnisse erwartet werden.

Welches Modell sich am besten für die Simulation eines Brandes eignet, ist eine Frage des Anwendungsbereiches, der Fragestellung bzw. Zielgröße, der geforderten Genauigkeit des Ergebnisses, der Rechenzeit und -kapazität. [3]

Zonen- und Feldmodelle unterscheiden sich dadurch, dass die Feldmodelle im Allgemeinen unmittelbarer auf den fundamentalen Erhaltungsgleichungen beruhen, während die Zonenmodelle vereinfachte Gleichungssysteme beinhalten, die mit Hilfe der empirischen Ansätze aus den fundamentalen Erhaltungsgleichungen entwickelt wurden. Daraus ergibt sich eine unterschiedliche mathematische Struktur und demzufolge unterschiedliche Lösungsverfahren. Diese Unterschiede sind auch für die Anwendbarkeit auf bestimmte Fragestellungen und den Detaillierungsgrad der jeweiligen Modelle verantwortlich. [3]

Eine Bewertung der Simulationsprogramme kann dabei methodisch durch drei Schritte erfolgen:

- **Modellqualifizierung:** Ein Modell ist qualifiziert, wenn die für die Beschreibung der realen Fragestellung notwendigen Phänomene im Modell ausreichend berücksichtigt sind. Dies bedeutet nichts anderes, als dass eine Größe, welche als Ergebnis verwendet werden soll, auch durch das Modell in geeigneter Form und nachvollziehbar berechnet werden muss,
- **Modellverifizierung:** Die Modellverifizierung kann sich entsprechend der Begriffsgrundlage nur auf relativ genau überprüfbare Vorgänge beschränken. Sie beinhaltet daher im Wesentlichen Vergleiche mit exakten Lösungen für spezifische Randbedingungen oder besonders qualifizierten numerischen Lösungen. Dabei stehen sowohl die mathematisch-physikalischen, als auch die numerischen Verfahren auf dem Prüfstand.
- **Modellvalidierung:** Die Modellvalidierung beinhaltet den Vergleich mit Experimenten und stellt einen fortwährenden Prozess dar, bei dem man sich der Anwendbarkeit auf unterschiedliche Problemstellungen vergewissert oder Fehlerbandbreiten und Schwachstellen bei der Anwendung erfasst. [3]

3.1.1.5 Festlegung repräsentativer Naturbrandkurven

Zur Beurteilung des Feuerwiderstandsverhaltens der Bauteile unter Naturbrandbeanspruchung wurden drei repräsentative Naturbrandkurven entwickelt, die in Abbildung 8 ersichtlich sind. Die Ergebnisse der Bauteilversuche unter Naturbrandbeanspruchung dienen zur Äquivalenzbetrachtung zwischen Beanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve und Naturbrandkurve. Die festgelegten Naturbrandkurven bilden die Temperaturzeitverläufe für Brände in Gebäuden mit Wohnnutzung und einer ungeschützten Holzoberfläche ab. Grundlage für die repräsentativen Naturbrandkurven bildet das Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-1-2/NA (Anhang AA) [21]. Die Eingangsparameter zur Berechnung der Naturbrandkurven sind in Tabelle 2 aufgeführt. Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandlastdichte und Wärmefreisetzungsrate wurden zu 1,0 angesetzt.

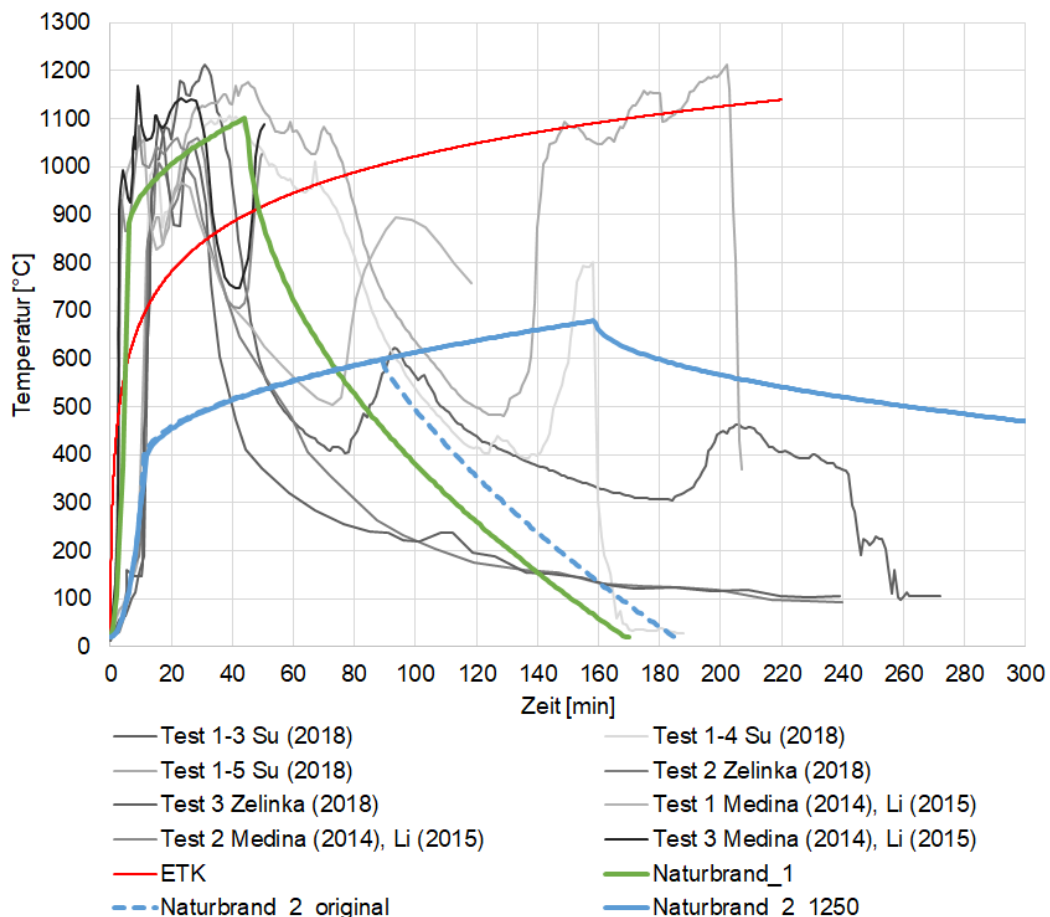


Abbildung 8: Gegenüberstellung der repräsentativen Naturbrandkurven mit experimentellen Raumbrandkurven

Der Verlauf der Brandkurve ‚Naturbrand_1‘ orientiert sich an experimentellen Daten von Raumbrandversuchen (siehe Abbildung 5, bspw. [40] und [41]), welche aus der Literatur stammen. Bei der Festlegung der Maximaltemperatur dieser Brandkurve wurde die im Normbrandofen technisch bedingte Limitierung auf 1100 °C berücksichtigt. Die Brandkurven ‚Naturbrand_2‘ und ‚Naturbrand_2_1250‘ stellen einen unteren Grenzwert da. Hierbei wurde eine geringe Maximaltemperatur von 600 °C festgelegt. Mit denselben Randbedingungen und der gleichen Brandlastdichte wie Naturbrand_1 stellt die Kurve Naturbrand_2_1250 einen Brandverlauf eines stark unterventilierten Brandes mit einer zeitlich langen Temperaturbeanspruchung dar. Unter der vereinfachten Annahme einer effektiven Verbrennungswärme von 15 MJ/m², einer Holzdichte von 450 kg/m³, einer konstanten Abbrandrate in der Aufheizphase von 0,7 mm/min und eines Abbrandes nur in der Aufheizphase lässt sich eine zusätzliche strukturelle Brandlast zu 213 MJ/m² berechnen. Unter Berücksichtigung der Brandlastdichte von Wohngebäuden nach DIN EN 1991-1-2/NA [21] mit 1085 MJ/m² (90%-Quantil) wird für die repräsentativen Naturbrandkurven eine Brandlastdichte von 1250 MJ/m² angesetzt. Für das Wärmespeichervermögen der Umfassungsbauteile wird ein Wert von 950 J/(m² · s^{0,5} · K) als gewichteter Mittelwert entsprechend

der angenommenen Konstruktion der Umfassungsbauteile bezogen auf die tabellierte Festwerte gemäß [21] angesetzt. Tabelle 2 zeigt die Eingangsparameter der verwendeten repräsentativen Naturbrandkurven.

Tabelle 2: Eingangsparameter der verwendeten repräsentativen Naturbrandkurven

Eingangsparameter	Naturbrand_1	Naturbrand_2	Naturbrand_2_1250
Brandlastdichte MJ/m ²	1250	675	1250
Ventilationsöffnungen m ² (H x B)	6,8 (2,0 x 3,4)	1,44 (0,6 x 2,4)	1,44 (0,6 x 2,4)
Brandraumfläche m ² (L x B)	24,0 (4,0 x 6,0)	20,0 (4,0 x 5,0)	20,0 (4,0 x 5,0)
Brandraumhöhe m	2.7	2.7	2.7
Öffnungsfaktor m ^{0,5}	0,094	0,013	0,013
Verbrennungseffektivität -	0,8	0,8	0,8
Brandentwicklungsgeschwindigkeit s	150	600	600
Wärmespeichervermögen der Umfassungsbauteile J/(m ² · s ^{0,5} · K)	950	950	950
Integral T · min	135.196	68.607	199.336

Der sich durch ein mögliches Ablösen von Lamellen einer Brettsper Holzfläche bei einer Brandbeanspruchung einstellende zweite Flashover (vgl. Test 1-3 aus [127]) wird innerhalb der repräsentativen Naturbrandkurven nicht berücksichtigt.

3.1.1.6 Löschverhalten von Holzbauteilen

Holz wird bereits seit Jahrhunderten vielseitig als Baustoff eingesetzt. Dementsprechend groß ist die Erfahrung, dass brennendes Holz unter der Verwendung von Wasser gelöscht werden kann. Wasser ist prinzipiell ein gutes Löschmittel, es ist nahezu überall verfügbar, ungiftig, chemisch neutral und besitzt mit ca. 2640 kJ/l eine gute Kühlwirkung [270]. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts, mit der Entwicklung der chemischen Industrie, kamen neue Baustoffe auf, die nicht mehr mit Wasser allein gelöscht werden konnten, woraufhin neue Löschmittel entwickelt wurden. Löschmittel können unterschieden werden in:

- Wasser
- Wasser mit Zusätzen (Netzmittel, Verdickungsmittel, Salze)
- Löschschaum
- Trockenlöschpulver
- Inertgase
- Sonstige Löschmittel (Sand, Gussspäne, Salze) [156].

Die Wirkungen dieser Löschmittel, auch als Löscheffekt bezeichnet, können wie folgt eingeteilt werden [157] und [158]:

- Kühlen: Entzug von Wärmeenergie und Abkühlen des Brandstoffs unter seinen Zündpunkt
- Ersticken: Trennung von Brandstoff und Oxidationsmittel, z. B. durch Verdrängung des Luftsauerstoffes
- Inhibition: Bindung freier Radikale, Unterbrechung der Kettenreaktion des Flammenbrandes

Jeder dieser Löscheffekte kann in weitere Untereffekte gegliedert werden, beispielsweise kann das Erstickten durch eine Verdrängung des Luftsauerstoffes, die Verdünnung des Brandstoffes (bei Gasen und Flüssigkeiten) oder durch Aufbringen einer trennenden Schicht zwischen Brandstoff und Oxidationsmittel erfolgen.

Bei der Verwendung eines Löschmittels wirken oft mehrere Löscheffekte gleichzeitig.

Beim Löschen eines Brandes mit Wasser wird hauptsächlich der Effekt des Kühlens genutzt, da dem Brand durch Erhitzung und Verdampfung des Wassers Energie entzogen wird. Gleichzeitig wirkt auch die Erstickung, da der entstehende Wasserdampf den Luftsauerstoff verdrängt und flüssiges, nicht verdampftes Wasser den Brandstoff bedeckt oder verdünnt.

Wird dem Wasser ein Netzmittel zugegeben, reduziert sich die Oberflächenspannung des Wassers, wodurch es besser an die Pyrolysefront vordringen kann und bessere Löscheffekte erzielt. Die spezifische Wärmekapazität und infolgedessen die Kühlwirkung des Wassers werden durch das Netzmittel kaum beeinflusst. Die Zugabe von Salzen in das Löschwasser erhöht den Siedepunkt und verbessert somit ebenfalls den Löscheffekt [159] [160]. Verdickungsmittel im Wasser und Löschsäume nutzen vorrangig die Erstickung, indem sie eine luftundurchlässige Schicht auf dem Brandstoff bilden. Ebenso können Löschpulver, Löschgase und sonstige Löschmittel (z. B. Löschsand) eine Branderstickung bewirken und/oder zur Inhibition eingesetzt werden. Nachteilig gilt zu berücksichtigen, dass die Verwendung (Zumischung) und die dauerhafte Bereitstellung (Lagerung) der Zusatzmittel, sowie die Sanierung eines Gebäudes nach einem Brandereignis (Kontamination), mit größeren technischen und finanziellen Aufwendungen verbunden ist. Da diese Löschmittel gezielt zur Bekämpfung bestimmter Brände entwickelt wurden (z. B. Flüssigkeits- oder Metallbrände) kommen sie tendenziell selten zum Einsatz. 90 % aller Brände werden Feststoffbränden (Brandklasse A) zugeordnet [161].

Maßgebend für den Löscherfolg bei Bränden von Holzbauteilen ist, neben einem geeigneten Löschmittel und dessen Verwendung (Löschverfahren), ob der Löscheffekt im Bereich der Verbrennungsreaktion ausgelöst werden kann. Die Oberfläche offener, unbekleideter Massivholzbauteile kann erfahrungsgemäß, auch bei großer Dicke der Holzkohleschicht, unproblematisch gelöscht werden [162], [90], [163] und [164]. Bei der Verwendung bekleideter Holzbauteile ist eine (Schwel-)Brandentstehung im Holz möglich, noch bevor die Bekleidung herabfällt. In diesem Fall müsste die Bekleidung durch die Feuerwehr entfernt und das offengelegte Holz gelöscht werden. Aus baukonstruktiver Sicht sollte die Möglichkeit von Bränden im schwer zugänglichen Bauteilinneren (Hohlraum- und Fugenbrände) durch eine ausreichende brandschutztechnisch wirksame Bekleidung ausgeschlossen werden.

In [165] wurden Zimmerbrände mit Möbel und Holzkrippen als Brandlast unter Verwendung von Mehrzweckstrahlrohren, Pistolenstrahlrohren und Schaumrohren (L200 Schwerschäum und L400 Mittelschaum) gelöscht. Der Löschangriff erfolgte durch eine Berufsfeuerwehr zu dem Zeitpunkt, an dem ca.



40 % der anfänglichen Masse des Brandguts abgebrannt waren. Es wurden die verbrauchten Löschmittelmengen, die beim Löschen entstandene Schadenswassermenge und die Löschdauer gemessen. Bei geringerer Wasserbeaufschlagungsrate lag der Löschwasserbedarf und die Schadenswassermenge tendenziell niedriger.

3.1.1.7 Selbstverlöschten von Holzbauteilen

Der abwehrende Brandschutz umfasst alle Maßnahmen zur Abwehr von Gefahren für Personen, Tiere, Sachen und die Umwelt, die durch Brände entstehen [166]. Als Brennen wird eine mit Flamme und/oder sichtbarer Wärmestrahlung (Licht) selbstständig ablaufende exotherme Reaktion zwischen einem brennbaren Stoff und Sauerstoff verstanden [167]. Der Vorgang des Verbrennens ist von verschiedenen Bedingungen abhängig, wie der verfügbaren Sauerstoffmenge, dem brennbaren Stoff, dem Zündinitial und dem Zusammenspiel dieser Faktoren. Infolgedessen können verschiedene Lösungsverfahren zu Beendigung eines Brandes eingesetzt werden, siehe Abschnitt 3.1.1.6.

Brände von Baustoffen und Bauteilen im Rahmen dieser Forschungsarbeit gelten als selbstverlöschend, wenn alle Verbrennungsvorgänge ohne die Ausführung äußerer Löschmaßnahmen enden. Das Selbstverlöschten von Holzbauteilen erfolgt, sobald die für die Pyrolyse des Holzes notwendige Wärme nicht mehr durch die laufende thermische Zersetzung des Holzes zur Verfügung gestellt werden kann.

Bauordnungsrechtlich werden brandschutztechnische Anforderungen an Baustoffe und Bauteile unterschieden. Im Rahmen der Baustoffklassifizierung wird das Selbstverlöschten für schwerentflammbare (B1) Baustoffe nach DIN 4102-1 [168] gefordert. Eine Prüfung im Brandschacht gilt unter anderem als bestanden, wenn „Die Proben nur so weit nachbrennen [...], dass die Anforderungen an die Restlänge erfüllt werden.“

Die Klassifizierung von Bauteilen hinsichtlich des Feuerwiderstandes repräsentiert ihre Funktionsfähigkeit im Falle eines vollentwickelten Brandes aufgrund der Normbrandbeanspruchung nach der ETK. Alternativ kann die thermische Einwirkung nach DIN EN 1991-1-2/NA 21 durch eine, im Einzelfall zu bestimmende, Naturbrandkurve bestimmt werden. Für den Nachweis mit ETK werden die Bauteile über die jeweils zu klassifizierende Prüfdauer von 30, 60, 90 oder 120 Minuten thermisch beansprucht. Die Prüfung gilt als bestanden, sofern das Bauteil seine Funktion über die Prüfdauer erhält. Ein Abkühlen des Brandes und das Nachbrandverhalten des Bauteils, z. B. das Bauteilverlöschten, werden nicht berücksichtigt. Die ETK stellt somit einen Brandverlauf dar, der einen Großteil der realen Brandverläufe berücksichtigt. Die Abkühlphase wird jedoch nicht berücksichtigt, sodass, davon ausgegangen werden muss, dass das Bauteil unmittelbar nach Überschreiten seiner Prüfdauer versagt. Für feuerbeständige Bauteile (Feuerwiderstandsdauer 90 Minuten) wird entsprechend Musterbauordnung [27] gefordert, dass die tragenden und aussteifenden Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Bei raumabschließenden, feuerbeständigen Bauteilen wird außerdem eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen gefordert. Damit wird indirekt angenommen, dass sich diese Bauteile nicht am Brand beteiligen und der reale Brand, der bei üblichen Brandlasten in Wohngebäuden etwa der Intensität des Brandverlaufs einer 60- bis 70-minütigen ETK-Beanspruchung entspricht, auch ohne Löschangriff der Feuerwehr überstanden wird. Einige Landesbauordnungen [169], [170], [171] (siehe Abschnitt 2.2) erlauben anstatt hochfeuerhemmende oder feuerbeständige Bauteile, Bauteile in Holzbauweise, bzw. aus brennbaren Baustoffen auszuführen. Diesbezüglich wird gefordert, dass die „erforderliche Feuerwiderstandsfähigkeit gewährleistet wird“ [169], „dass Feuer und Rauch nicht über Grenzen von Brand- oder Rauchabschnitten ... hinweg übertragen werden können“ [170]. Diese Bauteile müssen also die geforderte Feuerwiderstandsdauer (z. B. 90 Minuten für „anstatt feuerbeständig“) erreichen, dürfen aber in den tragenden und aussteifenden Teilen brennbar sein. Eine explizite Forderung zum Selbstverlöschten dieser Bauteile besteht nicht.

Der Verlauf einer Naturbrandkurve nach DIN EN 1991-1-2/NA [21] wird anhand der Brandlastdichte, Brandraumgeometrie und Ventilationsverhältnisse im Einzelfall bestimmt. Löschmaßnahmen durch Nutzer, Feuerwehr oder Anlagentechnik werden im Sicherheitskonzept [21] unter Berücksichtigung einer Ausfallwahrscheinlichkeit angesetzt, reduzieren somit die maximale Bemessungs-Wärmefreisetzungsrate und infolgedessen den Temperaturzeitverlauf der Naturbrandkurve. Der Naturbrandnachweis setzt voraus, dass das Bauteil über den kompletten Brandverlauf seine Funktionen beibehält. Dies schließt das Abkühlen des Brandes und der Bauteile mit ein und setzt ein Selbstverlöschten voraus.

Theoretische Ansätze und Untersuchungen zum Entzünden und Verlöschten von Feststoffen bestehen bereits seit Jahrzehnten [172], [173], [174]. Eine vollumfängliche Quantifizierung der Rahmenbedingungen des Selbstverlöschens ist bisher allerdings nicht möglich. Maßgebend für das Selbstverlöschten ist die Energiebilanzierung des Verbrennungsvorganges. Diese Bilanz wird unter anderem durch den Wärmeeintrag aus der Verbrennung des Pyrolysegas-Luft-Gemisches beeinflusst. Die Wärmefreisetzung des Flammenbrandes und seine untere Explosionsgrenze (bzw. Durchzündung) sind von der Zusammensetzung des Pyrolysegas-Luft-Gemisches abhängig und dieses ist nicht vollständig vorhersagbar. Weiterhin wird der

Wärme- und Pyrolysegastransport durch die sich zunehmend bildende und nur unzureichend berechenbare Holzkohleschicht gestört. Betrachtet man das Selbstverlöschten von Holz nicht nur auf einer einzelnen Oberfläche, sondern als raumbildendes Bauteil (Wände und Decke) im Brandraum, ergeben sich weitere maßgebende Einflüsse auf das Selbstverlöschten. Mit zunehmender Menge an brennbaren Oberflächen im Brandraum erhöht sich die freigesetzte Wärmeenergie in diesem, dies wirkt sich in der Nachbrand- bzw. Abkühlphase entscheidend auf das Selbstverlöschten der Bauteile aus. In bisherigen Forschungsarbeiten [74], [75], [76], [175] wurde festgestellt, dass bei Bränden in Räumen mit Bauteilen in Holzbauweise mit nur einer brennbaren Oberfläche die anderen Wände bzw. die Decke sind dementsprechend bekleidet oder in nichtbrennbarer Massivbauweise ausgeführt nach dem Aufbrauchen der mobilen Brandlast, Selbstverlöschten eintreten kann. Werden mehrere Bauteiloberflächen brennbar ausgeführt, verringern sich die Tendenzen zum Selbstverlöschten. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass sich zwei einander zugewandte, brennbare Bauteiloberflächen gegenseitig Wärmestrahlungen zuführen (Kreuz- oder Rückstrahlung).

3.1.1.8 Brandverhalten von Holzbauteilen und deren Rauchdichtigkeit

Im Rahmen des Vorhabens wurden diverse Versuche zu Bewertung von Bauteilanschlüssen unter Brandbeanspruchung gesichtet und ausgewertet um eine belastbare Datengrundlage zu erlangen [64]. Inzwischen stellen [258] [263] [65] Grundlagen als Stand der Technik für das weitere Vorhaben dar.

3.1.1.9 Temperaturabhängiges Materialverhalten von Holz

Die Abschätzung der Tragfähigkeit von Holzkonstruktionen im modernen, mehrgeschossigen Holzbau während und nach einem Brandereignis ist mit dem aktuellen Stand der Technik nur unter Berücksichtigung von konservativen Sicherheitsfaktoren durchführbar. Besonders bei der Beurteilung der mechanischen Festigkeitseigenschaften des unverbrannten Holzes herrscht Unsicherheit, daher werden in der Baupraxis häufig unnötigerweise komplette Holzbauteile ausgetauscht oder Bohrkerne zur Analyse der „noch vorhandenen“ Festigkeit genommen. Dieses Vorgehen erfordert im mehrgeschossigen Holzbau komplizierte und zeitaufwendige Baumaßnahmen, die mit einem besseren Wissen über die thermomechanischen Materialeigenschaften von Holz zielgerichteter und geringer ausfallen können. Im Idealfall kann die Resttragfähigkeit der Holzkonstruktion ausreichend sein und daher das Anbringen einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung ausreichen. Dies könnte die Sanierung von Holzgebäuden nach einem Brandfall erheblich vereinfachen und beschleunigen. Dies muss noch weiter untersucht werden.

Aufgrund der Inhomogenität des Baustoffes Holz müssen unterschiedliche Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte in Abhängigkeit der Art (z. B. Biegung, Druck, Zug usw.) und dem Kraft zur Faser Winkel (rechtwinklig oder parallele zur Faserrichtung) der Beanspruchung für die Bemessung von Holzbauteilen verwendet werden. Für die Bemessung unter Raumtemperatur (auch als Kaltbemessung bezeichnet) sind diese Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte umfangreich untersucht und normativ für die Bemessung von Holzbauteilen nach Festigkeitsklassen sortiert wiedergegeben. Für die Brandschutzbemessung von Holzbauteilen werden für die Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte in der Regel nur temperaturabhängige Abminderungsfaktoren, wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 ersichtlich, bereitgestellt, somit wird eine Differenzierung nach Festigkeitsklasse hierbei nicht vorgenommen. Dieses Vorgehen impliziert, dass der Einfluss der Ausgangsfestigkeit oder -steifigkeit auf die prozentualen Verluste der Fertig- oder Steifigkeit bei steigenden Materialtemperaturen vernachlässigbar gering ist.

Die wichtigsten An- und Vorgaben für die Brandschutzbemessung von Holzbauteilen regelt aktuell Teil 1-2 des Eurocodes 5, der die Tragwerksbemessung für den Brandfall beinhaltet [42]. In Anhang B dieses Teils werden die Angaben zu den temperaturbedingten Veränderungen von Materialkennwerten des Baustoffes Holz dargestellt. Wie in Abbildung 9 und Abbildung 10 gezeigt, befinden sich darunter auch Werte für die temperaturabhängige Abminderung der Festigkeiten und Steifigkeiten (E-Modul) parallel zur Faserrichtung von Nadelholz. Für Druck quer zur Faserrichtung kann dieselbe Abminderung angenommen werden wie bei der für Druck parallel zur Faserrichtung. Insgesamt ist eine starke Vereinfachung des Verlaufs des Festigkeits- und Steifigkeitsverlust in den normativen Darstellungen erkennbar. Besonders die sofortige Abminderungen beim Überschreiten der Materialtemperatur von 20 °C in den Verläufen scheint unrealistisch. Konkrete Werte werden nur für die Materialtemperatur von 100 °C angegeben. Die angegebenen Werte stammen aus der Forschungsarbeit von König und Walleij [129] und sind im Vergleich mit anderen Literaturquellen [136], [137], [140], [147] sehr konservativ.

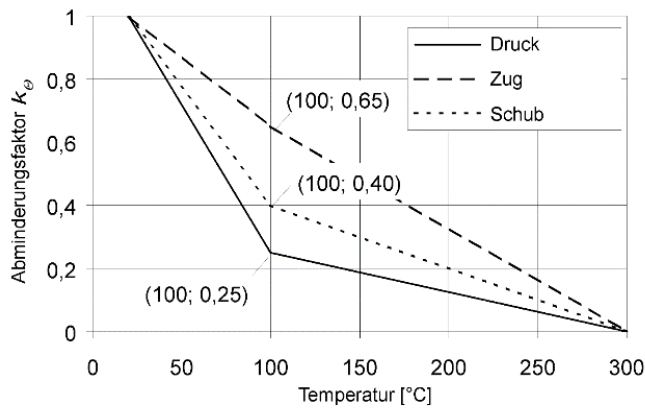


Abbildung 9: Abminderungsfaktor der Festigkeiten von Nadelholz nach [42]

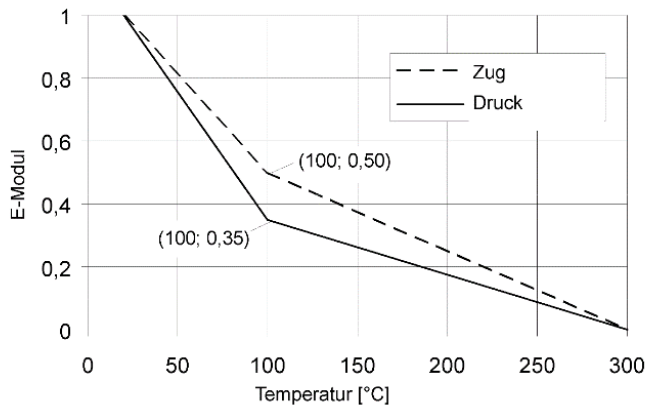


Abbildung 10: Abminderungsfaktor des E-Moduls von Nadelholz nach [42]

Die thermischen und mechanischen Materialeigenschaften von Bauholz waren bereits in der Vergangenheit Untersuchungsgegenstand von Forschungsarbeiten, weshalb die Analyse des bereits bestehenden Wissens für das Aufzeigen von vorhandenen Erkenntnissen und Wissenslücken hilfreich ist. Insgesamt wird in diesem Forschungsvorhaben der Fokus auf die Untersuchung des thermomechanischen Materialverhalten von Holz gelegt, daher umfasst die erarbeitete Zusammenstellung die wesentlichen Versuchs- und Forschungsergebnisse, die für die Betrachtung der temperaturabhängigen Veränderungen der Festigkeit und Steifigkeit von Holz relevant sind. Besonders wegen der hohen Relevanz für Wand- und Deckenbauteile bei mehrgeschossigen Holzgebäuden sind die Untersuchungen zu Biege-, Druck- und Zugbeanspruchung parallel zur Faserrichtung bedeutsam.

3.1.1.10 Thermomechanisches Verhalten der Holzdruckfestigkeit

In der Vergangenheit wurde bereits eine Vielzahl von Versuchen durchgeführt, die das thermomechanische Verhalten der Holzdruckfestigkeit in Faserrichtung untersuchten. Da es hierfür keine normativen oder allgemein anerkannten Versuchsmethoden gibt, unterscheiden sich teilweise die in der Literatur auffindbaren Versuche erheblich. Besonders die Größe und Art der Erwärmung der Holzproben variiert hier stark. Eine Gemeinsamkeit, die sich bei fast allen Versuchen findet, ist das Referenzieren der gemessenen Druckfestigkeiten bei unterschiedlichen Temperaturniveaus des Materials auf eine Ausgangstemperatur im Bereich von 20 °C. Nachfolgend werden relevante Versuche und Erkenntnisse aus der Literatur dargestellt und deren Einfluss auf die praktische Anwendung und das Vorgehen in diesem Forschungsvorhaben erörtert.

Bis in die 1980er Jahre waren die Versuchsergebnisse [136] von Kollmann von 1940 im deutschsprachigen Raum von großer Bedeutung. Die fünf untersuchten Materialtemperaturstufen gehen von 10 °C bis 100 °C und die Probekörper, wie Glos und Henrici in [137] beschreiben, sind kleine fehlerfreie Holzprismen. Die Ergebnisse aus dem Jahre 1940 wurden 1944 im Rahmen der Forschung [138] von Kollmann und Schulz ausgebaut. In der Buchsammlung von Kollmann [139] wird ein linearer Verlauf der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zwischen den tatsächlich gemessenen Materialtemperaturstufen dargestellt, vgl. Abbildung 11. Es ist erkennbar, dass bei steigender Materialtemperatur ab 20°C die Druckfestigkeit des Kiefernholzes stetig abnimmt und bei 100 °C die Restdruckfestigkeit des Kiefernholzes nur noch 50 % gegenüber der Druckfestigkeit bei 20 °C entspricht. Nach Kollmann fällt die Restdruckfestigkeit mit 86 % bei 100 °C für Fichtenholz deutlich geringer aus, wie von Glos und Henrici in [137] dargestellt. Kritisch zu beurteilen sind die untersuchten Probekörper, welche im Vergleich zu den im Holzbau üblich eingesetzten Querschnitten zu klein ausfallen, Hier bleiben eventuell relevante Effekte, wie beispielsweise der Feuchtetransport bei der Erwärmung oder Wachstumsmerkmale sowie angeschnittene Faserverläufe, unberücksichtigt.

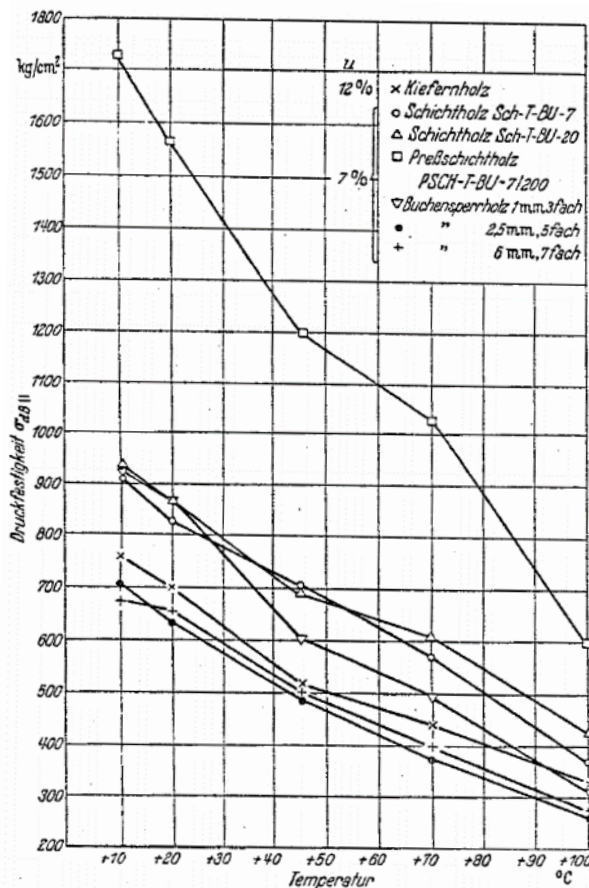


Abbildung 11: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Temperatur bei Vollholz und Schichtholz nach [139]

1977 führte Schaffer [140] Versuche zur Ermittlung der thermomechanischen Druckverhalten von Douglasie durch und fasste diese Ergebnisse, wie in Abbildung 12 dargestellt, in einem Forschungsbericht zusammen. Bei der Untersuchung von Schaffer wird der Temperaturbereich des Materials von 20 °C bis 280 °C sowie verschiedene Holzfeuchten betrachtet. Zusätzlich wurden erwärmte Holzproben abgekühlt und anschließend die Druckfestigkeit getestet. Bei den im warmen Zustand geprüften Probekörpern aus Douglasie ist ein deutlich geringerer Abfall der Druckfestigkeit bei steigender Materialtemperatur zu den Werten von Kollmann erkennbar. Im Bereich von etwa 120 °C bis 250 °C der Materialtemperatur ist bei den wieder abgekühlten Probekörpern eine Erhöhung der Druckfestigkeit messbar. Dies wird durch das vollständige Austrocknen des Holzes bei diesen Temperaturen erklärt, da bis zur Prüfung die Holzfeuchte nicht wieder ausreichend stark ansteigt. Dies lässt vermuten, dass bis etwa 250 °C keine bzw. eine kaum relevante dauerhafte Abminderung der Druckfestigkeit von Holz zu erwarten ist. Auch bei den Versuchen von Schaffer werden nur sehr kleine Holzproben untersucht und sind daher nicht uneingeschränkt auf reale Bauteildimensionen skalierbar.

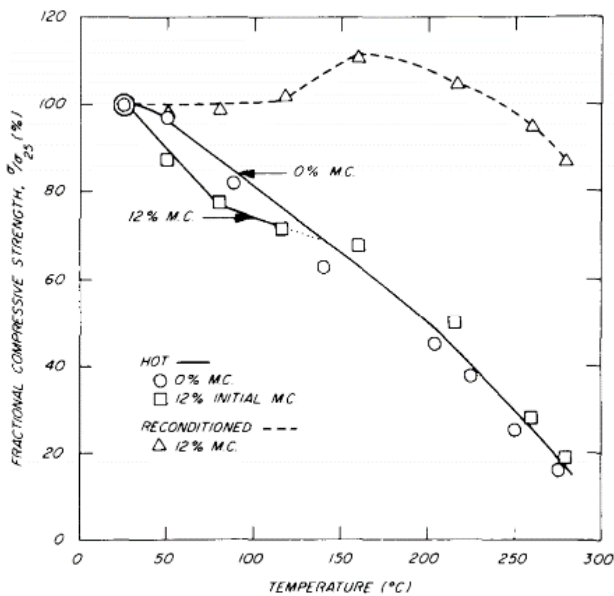


Abbildung 12: Druckfestigkeit als Funktion der Temperatur nach [140]

Die Untersuchung der thermomechanischen Materialeigenschaften an näherungsweise baupraktischen Holzquerschnitten war der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens „Festigkeiten von Bauholz bei hohen Temperaturen“ von Glos und Henrici aus den 1990er Jahren [137]. Die Druckprüfkörper hatten einen Querschnitt von 50 mm auf 120 mm und waren 180 mm hoch. Diese Abmessungen der Probekörper entsprachen im Vergleich zu anderen Versuchsdurchführungen aus der Literatur besser einem bautypischen Holzquerschnitt eines Ständers einer Holztafelbauwand. Insgesamt wurde die temperaturbedingte Veränderung der Druckfestigkeit an 267 Holzproben, die in drei Materialtemperaturgruppen von 20 °C, 100 °C und 150 °C verteilt waren, ausgewertet. Hierbei wurden auch unterschiedliche Holzfeuchtegehalte der Holzproben untersucht. Das Halten der Materialtemperatur auf einem konstanten Niveau nach der Entnahme der Probekörper aus dem Trocknungsschrank bis zur Durchführung der mechanischen Prüfung stellte eine versuchsbedingte Ungenauigkeit dar, weshalb eine Wiedererwärmung der Probekörper in der Prüfmaschine mit Infrarot-Strahlen angeordnet wurde. In Abbildung 13 ist das Ergebnis der Analyse der gemessenen Werte und der Interpretation durch Glos und Henrici dargestellt. Für den Wert bei 100 °C Materialtemperatur wurden die Probenkollektive D2 und D6 zusammengefasst und stellen eine Holzfeuchte von 7 bis 10 % dar. Das Probenkollektiv D8 gibt den Wert für 150 °C Materialtemperatur an und hat für diesen Temperaturbereich noch eine relativ hohe Holzfeuchte von 3 bis 6 %. Bei den untersuchten Holzproben mit geringerer Holzfeuchte wurden höhere Werte für die Druckfestigkeit ermittelt. Zusammenfassend bestätigen die Versuche von Glos und Henrici die Tendenz der Abnahme der Druckfestigkeit bei steigenden Materialtemperaturen des Holzes, wie dies auch bei den Versuchen mit kleineren Holzprobekörpern der Fall ist. Jedoch fällt die prozentuale Abminderung der Druckfestigkeit etwas besser aus. Anzumerken bleibt, dass die Belastung relativ schnell aufgebracht wurde und daher die Versagenszeit nur 50 Sekunden betrug, was die Ergebnisse eventuell leicht positiv beeinflusst. Zudem ist die Betrachtung bis 150 °C für ein Brandszenario nicht ausreichend.

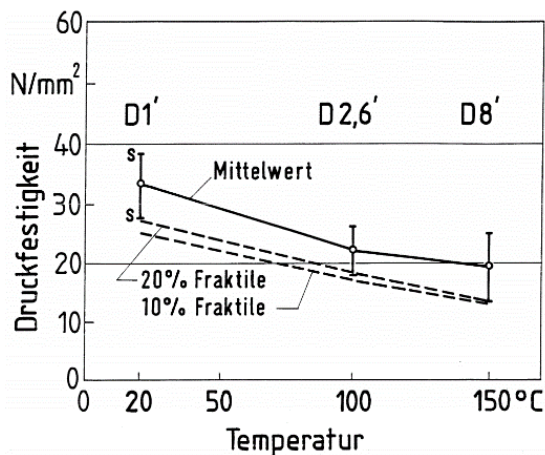


Abbildung 13: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [137]

Die Forschungsarbeiten [141]–[144] von König fokussierten sich im Wesentlichen auf die brandschutztechnisch relevanten Fragestellungen zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Bauteilen der Holztafelbauweise im Brandfall. In Zusammenarbeit mit Walleij [129], [135] wurden erste Bemessungsmodelle, die auch teilweise in dem bestehenden Eurocode 5 enthalten sind, entwickelt. Für die Herleitung dieser Bemessungsmodelle mussten zahlreiche Faktoren und deren Einfluss durch Simulationen und Vergleiche mit durchgeführten Brandversuchen ausgewertet werden. Hierbei wurde auch das thermomechanische Materialverhalten von Holz von König und Walleij [135] betrachtet. Die im Forschungsbericht [135] aufgezeigte Herleitung der thermomechanischen Materialeigenschaften basiert auf einer Rückrechnung von Brandversuchen mit Bauteilen der Holztafelbauweise. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen aus der Literatur wurden keine expliziten Versuche an Holzprobekörpern für die temperaturbedingten Abminderungsfaktoren der Druckfestigkeit vorgenommen. Stattdessen wurden Messdaten von Brandversuchen mit Holztafelelementen, die zweifach mit Gipskartonplatten bekleidet und mit Mineralwolle ausgedämmt waren, analysiert. Die Holztafelelemente erfuhren eine einseitige Brandbeanspruchung und wurden im Wesentlichen auf Biegung beansprucht. Die Beanspruchung variierte zwischen den Versuchen, sodass neben unterschiedlichen Lastniveaus auch die Orientierung der Biegebeanspruchung berücksichtigt wurde. Somit wurde sichergestellt, dass die brandseitige Temperaturerhöhung des Holzquerschnittes teilweise erst in dem Bereich der Zug- oder Druckspannungen erfolgte.

Die ermittelten Verformungswerte aus den Brandversuchen nutzten König und Walleij, um unter Berücksichtigung der zu erwartenden Temperaturverteilung im Holzquerschnitt die Steifigkeitsverhältnisse zu verschiedenen Zeitpunkten des Brandverlaufs zu ermitteln. Mit den temperaturbedingten Steifigkeitsverlusten, dem vorherrschenden Lastniveau und dem angesetzten Restquerschnitt wurde die Verteilung der Spannung im Holzquerschnitt errechnet und somit auch die temperaturbedingten Abminderungen der Druckfestigkeit für Holz abgeleitet. Im Rahmen der Rückrechnung der thermomechanischen Materialeigenschaften wurden nur konkrete Wertangaben für eine Materialtemperatur von 100 °C angegeben. Die Referenzfestigkeiten bzw. -steifigkeiten für die einzelnen Abminderungsfaktoren sind die Festigkeiten und Steifigkeiten bei einer Materialtemperatur von 20 °C. Der vollständige Verlust der Festigkeiten und Steifigkeiten wurde bei einer Materialtemperatur von 300 °C angenommen. Zwischenwerte wurden zwischen den drei Punkten linear interpoliert (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10).

Insgesamt ist das Vorgehen von König und Walleij basierend auf dem theoretischen Ansatz einwandfrei nachvollziehbar, jedoch sind die resultierenden Materialeigenschaften auffällig geringer als gemessene Materialeigenschaften aus Versuchen, die dies direkt untersuchen. König und Walleij argumentieren, dass Riss- und Schwindprozesse die Festigkeiten und Steifigkeiten minimieren und bisher in der Berechnung vernachlässigt wurden, jedoch bei realmaßstäblichen Holzständen gegenüber kleinen Holzprobekörpern in thermischen Versuchen dadurch Berücksichtigung finden. Ob diese Effekte durch die konservative Berechnung gut abgebildet werden, wird im Forschungsbericht von König und Walleij nicht nähergehend erläutert.

In Abbildung 14 werden die verschiedenen prozentualen Abminderungen der Druckfestigkeit in Faserichtung, die sich in Abhängigkeit der Materialtemperaturen ergeben, für die beschriebenen Literaturquellen dargestellt. Bereits bei diesem Vergleich der prozentualen Abminderungsfaktoren aus den einzelnen Quellen zeigt sich eine relativ starke Streuung der Ergebnisse. Faktoren, die diese Streuung

verursachen könnten, sind die unterschiedlichen Versuchsmethoden (z. B. Erwärmung, Prüfgeschwindigkeit usw.), die Imperfektionen der Holzprobekörper (z. B. Äste) und die verschiedenen Holzarten (z. B. Fichte, Kiefer usw.). Auffällig ist, dass die von König [135] hergeleitete prozentuale Abminderung der Druckfestigkeit am größten ausfällt. Besonders im Vergleich mit den Abminderungsfaktor von Glos und Henrici, der an Versuchen mit größeren Holzprobekörpern, die einem baupraktischen Querschnitt sehr nahekommen, abgeleitet wurden, zeigen sich eine deutliche Abweichung nach oben.

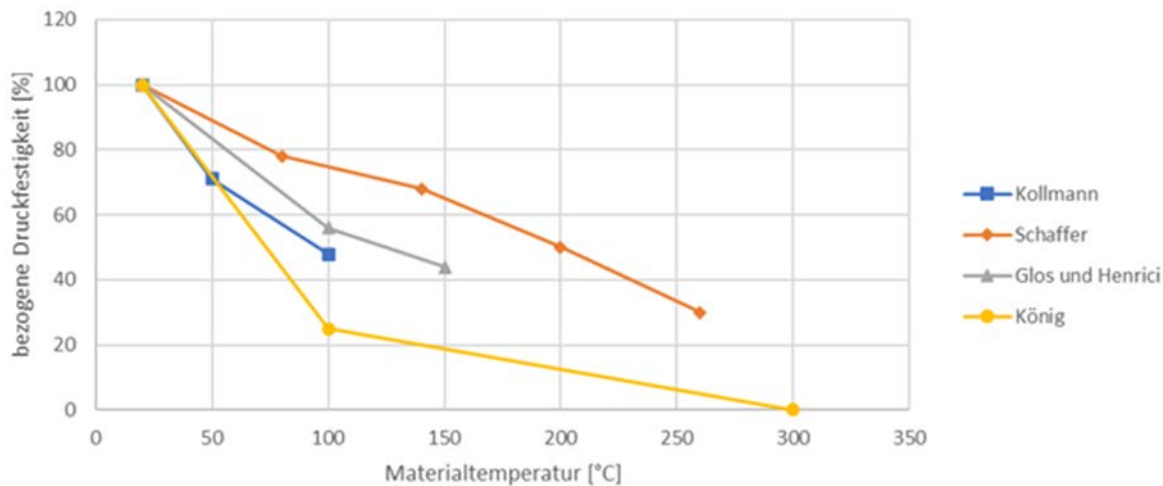


Abbildung 14: Vergleich der bezogenen Druckfestigkeit für das thermomechanische Verhalten der Druckfestigkeit

Weitere Versuche zur Ermittlung des thermomechanischen Verhaltens der Druckfestigkeit von Holz führten Knudson und Schniewind 1975 durch [130]. Jedoch war die Anzahl der Holzproben stark begrenzt und die ermittelten Ergebnisse ähnelten Schaffer [140].

Anfang der 2000er Jahre machte Young [145] weitere Versuche mit Holzprobekörpern (90 x 90 mm) bis zu einer Materialtemperatur von 288 °C. Hier zeigte sich, dass beinahe ein vollständiger Verlust der Druckfestigkeit auftrat [145], [146] und somit die Annahme von König bestätigt wurde, dass bei 300 °C im Holz die volle Abminderung der Druckfestigkeit um 100 % auftritt.

2006 stellte Bobacz [147] Ergebnisse für die Druckfestigkeitseigenschaften von Fichte bis 300 °C aus weiteren Versuchen ergänzt durch Werte aus Literaturquellen tabellarisch zusammen. Seine Ergebnisse liegen vergleichsweise nahe an den Messungen und Auswertungen von Glos und Henrici [137].

In Abbildung 15 ist die Auswertung der Versuche von Indefrey [148] dargestellt. Gut erkennbar ist der Anstieg der Druckfestigkeit bei den Probekörpern von 105 °C, dies wird durch die Dehydratation des Holzes erklärt. Alle Holzprobekörper über 100 °C wiesen eine Holzfeuchte von annähernd 0 % auf. Neben den eigenen Versuchen wurde ein ausführlicher Vergleich der bisher durchgeführten Versuche erstellt (vgl. Abbildung 16). Hier lässt sich erkennen, dass die Abnahme der Druckfestigkeit bereits bei niedrigen Temperaturen beginnt. Das Ausmaß der Abminderung variiert jedoch stark, was möglicherweise durch die unterschiedlichen Holzarten und Versuchsmethoden/ -bedingungen erklärt werden kann.

Insgesamt zeigt sich, dass die Herleitung von König, die auch im aktuellen Eurocode 5 Teil 1-2 verwendet wird, gegenüber allen Versuchen stark auf der sicheren Seite liegt.

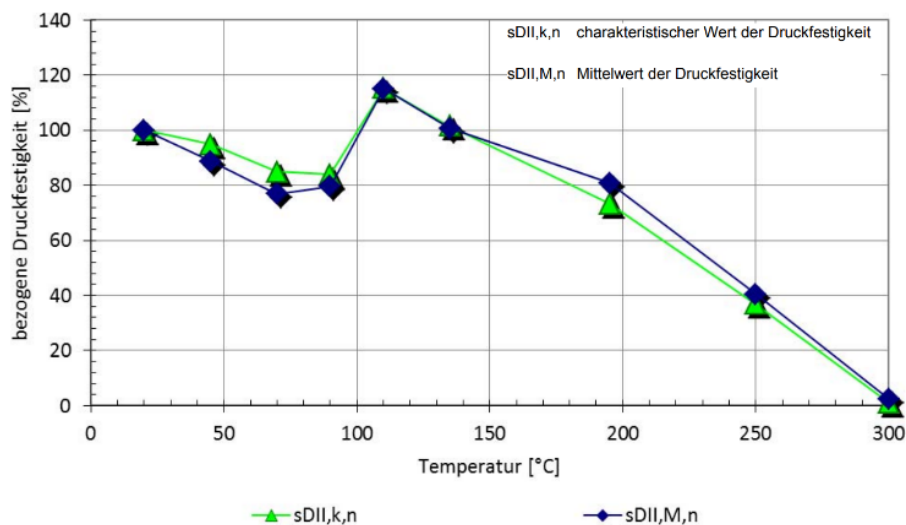


Abbildung 15: Prozentuale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [148]

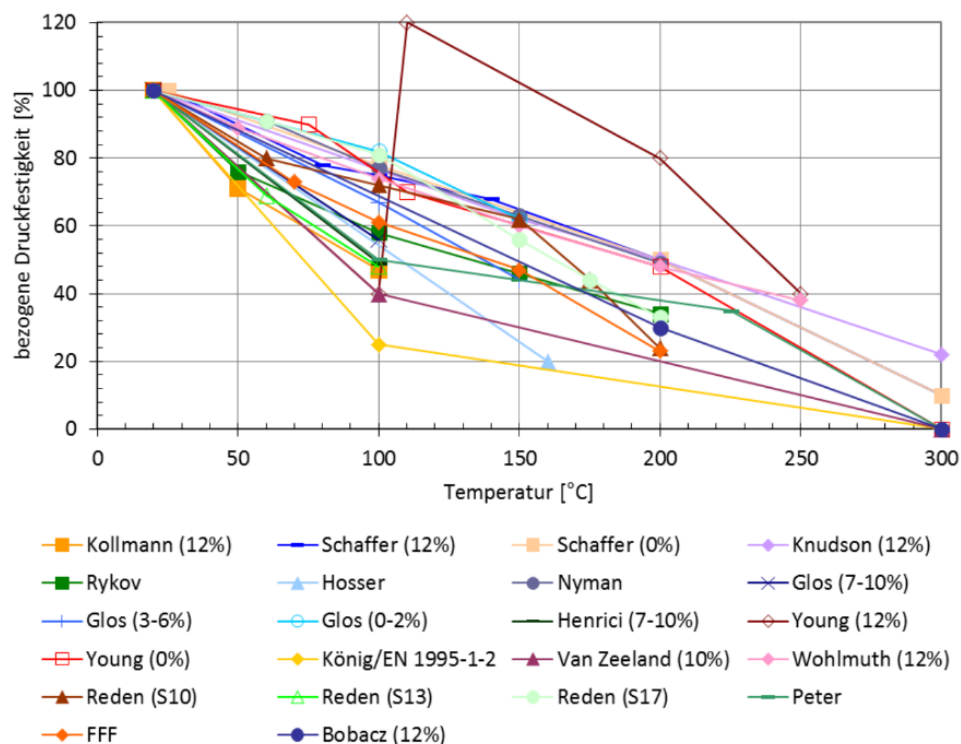


Abbildung 16: Prozentuale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur in Bezug auf 20 °C nach [148]

Zusammenfassend zeigen die hier dargestellten und darüber hinaus betrachteten Literaturquellen zum thermomechanischen Verhalten der Holzdruckfestigkeit, dass bei der Materialtemperatur von 300 °C mit dem vollständigen Verlust der Druckfestigkeit gerechnet werden kann. Nur bei vereinzelt Untersuchungen wurden bei diesem Temperaturniveau noch minimale Druckfestigkeiten festgestellt. Des Weiteren ist ergänzend anzumerken, dass sowohl bei Brandversuchen als auch Berechnungsverfahren die Grenze des Abbrandes von Holz mit der Lage 300 °C-Isothermen gleichgesetzt wird und sich somit mit dem nahezu vollständigen Verlust der Druckfestigkeit deckt.

Eine weitere Erkenntnis aus der Literatur, trotz der schweren Vergleichbarkeit und der großen Varianz der Ergebnisse, ist der bereits eintretende Verlust an Druckfestigkeit beim geringen Ansteigen der Materialtemperatur (< 60 °C). Als extremster Wert ist hierbei das Versuchsergebnis von Kollmann zu nennen, welches bei 50 °C Materialtemperatur bereits einen 30-prozentigen Verlust der Druckfestigkeit ge-

genüber der Referenztemperatur von 20 °C aufweist. Die meisten anderen Untersuchungen (vgl. Abbildung 16) zeigen im Temperaturbereich von 20 °C bis 60 °C eine deutlich geringere prozentuale Abnahme der Druckfestigkeit (10 % bis 20 %).

Aufgrund der hohen und teilweise bisher nicht erklärbaren Streuung der Untersuchungsergebnisse kann für die temperaturbedingte Abminderung der Druckfestigkeit von Holz bei steigenden Materialtemperaturen nur ein sehr konservativer Ansatz als Berechnungsgrundlage für die Praxis bereitgestellt werden (z. B. DIN EN 1995-1-2 [42]).

3.1.1.11 Thermomechanisches Verhalten der Holzzugfestigkeit

Neben Analyse der Druckfestigkeit wurde auch die Zugfestigkeit in Faserrichtung bei vielen Forschungsvorhaben, im Rahmen des thermomechanischen Verhaltens des Baustoffes Holz untersucht. Die Versuche aus der Literatur unterscheiden sich meist in der technischen Umsetzung, der Größe der Holzprobekörper, der verwendeten Holzart bzw. Sortierungsklasse und der Art der Erwärmung, da eine normative beziehungsweise allgemein anerkannte Versuchsdurchführung bisher nicht vorhanden ist. Daher ergeben sich die teilweise stark voneinander abweichenden Ergebnisse. Ein normativer oder allgemein anerkannter Versuchsaufbau und -ablauf ist bisher nicht vorhanden. Nachfolgend werden relevante Versuche und Erkenntnisse aus der Literatur dargestellt und deren Einfluss auf die praktische Anwendung und das Vorgehen in diesem Forschungsvorhaben erörtert.

Im Rahmen der Forschung [138] für den Einsatz von Holz im Flugzeugbau untersuchten Kollmann und Schulz 1944 das thermomechanische Verhalten der Zugfestigkeit. Der betrachtete Temperaturbereich beinhaltet eine Abkühlung bis in negative Temperaturen und eine Erwärmung des Materials bis zu 100 °C. Durch die Verwendung von sehr kleinen Querschnittsabmessungen wurden ausschließlich fehlerfreie Proben aus Kiefernholz für die Versuche herangezogen. Die Begrenzung der Materialtemperatur auf 100 °C ist für die Betrachtung von Holzbauteilen im Brandfall nicht ausreichend. Jedoch ist den Ergebnissen zu entnehmen, dass bereits ab 70 °C eine Reduktion der Zugfestigkeit zu erwarten ist, vgl. Abbildung 17.

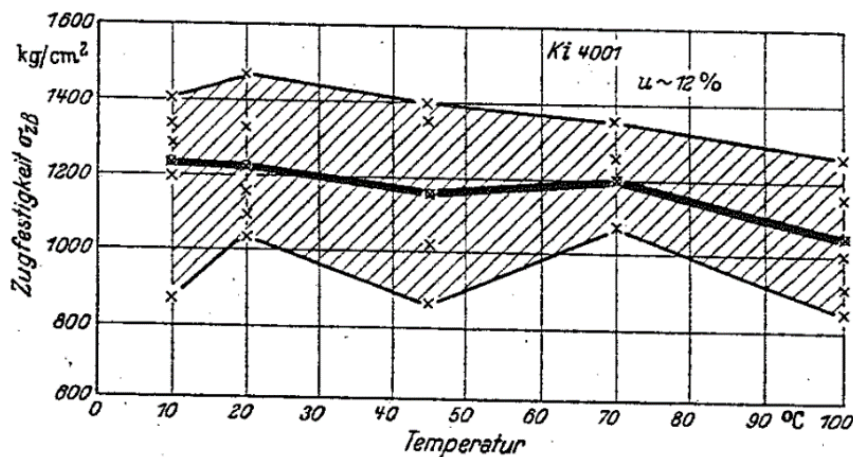


Abbildung 17: Zugfestigkeit parallel zur Faser in Abhängigkeit der Materialtemperatur bei Kiefernholz nach [138]

1985 wurde von Östman [149] eine Versuchsreihe zur Bestimmung der Zugfestigkeit von Fichtenholz bei verschiedenen Materialtemperaturen durchgeführt. Die verwendeten Probekörper sind fehlerfrei und besitzen eine Länge von 170 mm bei einer Breite von 10 mm. Die besonders schmale Dicke von circa 1 mm wurde gewählt, um eine möglichst schnelle Durchwärmung des Probekörpers im Ölbad zu ermöglichen. Der untersuchte Bereich von 20 °C bis 250 °C deckt nahezu den vollständigen Temperaturbereich bis zum Abbrand von Holz bei 300 °C ab. Im Temperaturbereich bis 100 °C wurden zudem unterschiedliche Feuchtegehalte der Holzproben untersucht. Ab 100 °C wurden vorgetrocknete Probekörper mit einem Feuchtegehalt von 0 % verwendet. Die Erwärmung im Ölbad sollte den Feuchtegehalt konstant halten. Hierbei war das Ziel, die Randbedingungen der Feuchteverteilung im Holzquerschnitt bei einem realen Brandereignis zu ermitteln. Die Messungen der Versuche ergaben eine Abnahme der

Zugfestigkeit bei steigender Materialtemperatur. Zwischen 20 °C und 200 °C ist die Abnahme eher moderat und gleichmäßig. Ab 200 °C ist ein deutlich beschleunigter Abfall der Zugfestigkeit erkennbar (siehe Abbildung 18).

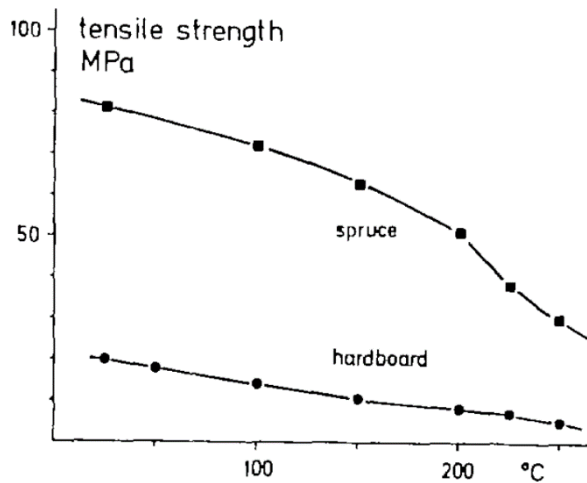


Abbildung 18: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Materialtemperatur nach [149]

An näherungsweise baupraktischen Holzquerschnitten untersuchten Glos und Henrici in den 1990er-Jahren das thermomechanische Verhalten der Holzzugfestigkeit [137]. Die verwendeten Holzprobekörper hatten einen Querschnitt von 50 mm auf 120 mm und waren 1700 mm lang. Die große Länge im Verhältnis zu den Querschnittsabmessungen war zur Gewährleistung der Krafterleitung an beiden Enden des Probekörpers erforderlich. Die beprobte Länge betrug 500 mm. Insgesamt wurden drei Temperaturniveaus von 20 °C, 100 °C und 150 °C und zwei Ausgangsfeuchten von 8 % und 12 % untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten für das verwendete Fichtenholz der Sortierklasse S13 bis S7 nach DIN 4074 eine sehr geringe Abnahme der Zugfestigkeit bei Temperaturen bis 100 °C. Anschließend ist eine leicht beschleunigte Abnahme der Zugfestigkeit bis 150 °C erkennbar (siehe Abbildung 19).

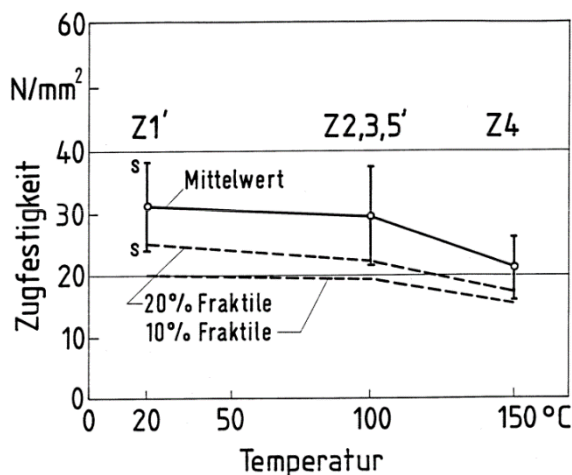


Abbildung 19: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [137]

Die Dissertation von Lau [150] von 1996 befasst sich ebenso mit der Thematik des Verhaltens von Zuelementen aus Holz unter der Beanspruchung von erhöhten Temperaturen. Neben der Betrachtung der einschlägigen Literatur und dem Vergleich von theoretischen Ansätzen zur Modellierung des thermomechanischen Verhaltens der Zugfestigkeit in Faserrichtung wurden zusätzlich Validierungsversuche durchgeführt. Zusätzlich zur Referenztemperatur von 20 °C wurden drei weitere Temperaturstufen von 150 °C, 200 °C und 250 °C ausgewertet. Die untersuchten Holzprobekörper hatten einen Querschnitt von 100 mm auf 50 mm und waren 2440 mm lang. Auch in diesen Versuchen ergab sich die

außergewöhnliche Länge durch die Notwendigkeit der Lasteinleitung über eine größere Kontaktfläche. Als betrachtete Holzart wurde Küsten-Kiefer als typisch kanadisches Bauholz herangezogen. Wie in Abbildung 20 ablesbar, variieren die gemessenen Festigkeitswerte mit der Belastungsgeschwindigkeit. Für die statische Betrachtung von Holzkonstruktionen ist daher eine langsamere Belastungsgeschwindigkeit, die meistens zu geringeren Festigkeitswerten führen, maßgebend und sollte bei Versuchen berücksichtigt werden. Nachdem weitere Messungen zwischen 20 °C und 150 °C nicht vorgenommen wurden, ist die Aussagekraft in diesem Bereich nicht belastbar. Jedoch ist der beschleunigte Abfall der Zugfestigkeit zwischen 150 °C und 250 °C gut erkennbar und bestätigt damit die Erkenntnisse aus den vorherigen Forschungsarbeiten.

Rate of loading (kN/s)	Temperature of exposure (°C)							
	20		150		200		250	
	Mean (N/mm ²)	S (N/mm ²)	Mean (N/mm ²)	S (N/mm ²)	Mean (N/mm ²)	S (N/mm ²)	Mean (N/mm ²)	S (N/mm ²)
1.85	36.6	13.43	29.8	9.09	22.7	7.38	18.7	5.78
0.2	37.5	13.12	25.7	7.48	19.7	7.41	14.5	4.23
0.067	37.7	12.97	23.8	6.62	17.6	5.63	13.4	3.71

Abbildung 20: Übersicht der durchschnittlich gemessenen Zugfestigkeiten der einzelnen Probengruppen nach [150]

Für die Herleitung des thermomechanischen Verhaltens der Holzzugfestigkeit nutzen König und Walleij 145 2000 denselben theoretischen Ansatz wie für die Herleitung des thermomechanischen Verhaltens der Holzdruckfestigkeit. Die rechnerische Herleitung der temperaturbedingten Abminderung erfolgte anhand von Verformungsergebnissen aus Brandversuchen von Holztafelbauwänden. Die Ergebnisse sind der aktuellen DIN EN 1995-1-2 [42] als Bemessungsgrundlage hinterlegt (siehe Abbildung 9).

Fornather führte mit Reden [151] weitere Versuche an Fichtenholz durch. Die gewonnenen Ergebnisse bestätigen die bisher durchgeführten Versuche anderer Forschungsvorhaben. Bei der Betrachtung verschiedener Sortierklassen kann beobachtet werden, dass die prozentuale Reduzierung der Zugfestigkeit in Folge von Erwärmung mit steigender Holzgüte etwas höher ausfällt. Dies wird durch vorhandene Fehlstellen bei schlechteren Sortierklassen erklärt, die unter Normalbedingungen zu einem früheren Versagen des Holzes führen können. Bei erhöhten Temperaturen scheint es eher zum reinen Holzversagen zu kommen, weshalb die Fehlstellen an Bedeutung verlieren.

In Abbildung 21 nach Indefrey werden verschiedene Versuchsergebnisse gegenübergestellt. Der relativ gleichmäßige Festigkeitsverlust mit steigender Temperatur bis etwa 200 °C ist hier gut ersichtlich. Im Anschluss ist mit einem rapideren Abfall der Zugfestigkeit bis 300 °C zu rechnen. Auch in diesem Vergleich ist eine relativ große Bandbreite der angegebenen Werte erkennbar, was sehr wahrscheinlich auf die verschiedenen Holzarten und die unterschiedlichen Versuchsaufbauten und -abläufe zurückzuführen ist.

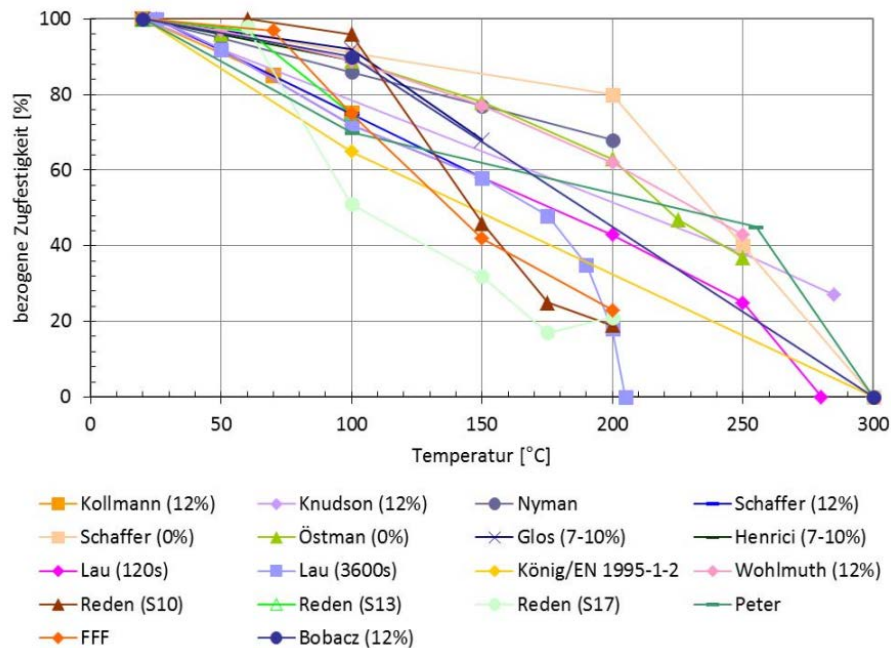


Abbildung 21: Gegenüberstellung der prozentualen temperaturabhängigen Zugfestigkeiten bezogen auf die Referenztemperatur von 20 °C nach [148]

3.1.1.12 Thermomechanische Verhalten der Holzbiegefestigkeit

Die Biegefestigkeit von Holz gehört bei der statischen Bemessung von Holzkonstruktionen im mehrgeschossigen Holzbau mit zu den wesentlichen erforderlichen Kennwerten. Durch die Inhomogenität des Holzes und daraus resultierenden Umlagerungsprozessen bei Biegebeanspruchungen ergibt sich eine charakteristische Biegefestigkeit, die nicht linear mit der Druck- und Zugfestigkeit zusammenhängt, sondern durch weitere Faktoren beeinflusst wird. Aus diesem Grund muss auch bei der Untersuchung der thermomechanischen Materialeigenschaften von Holz eine separate Betrachtung der Biegefestigkeit in Faserrichtung erfolgen. Nachfolgend werden relevante Versuche und Erkenntnisse aus der Literatur dargestellt und deren Einfluss auf die praktische Anwendung und das Vorgehen in diesem Forschungsvorhaben erörtert.

Kollmann und Schulz 1944 machten erste Versuche zur Ermittlung der temperaturbedingten Festigkeitsabnahme der Biegefestigkeit von Holz bis etwa 100 °C Materialtemperatur (siehe Abbildung 22) [138]. Die Versuchsergebnisse zeigen den Verlauf der Reduzierung der Festigkeit für Kiefernholz. Als ein wesentlicher Einfluss wird von Kollmann und Schutz das Verhältnis der Stützweite zur Stabdicke genannt, da bei kürzeren Spannweiten die Querkraftbeanspruchung an Bedeutung gewinnt und dort nochmals ein anderes thermomechanisches Verhalten zu erwarten ist.

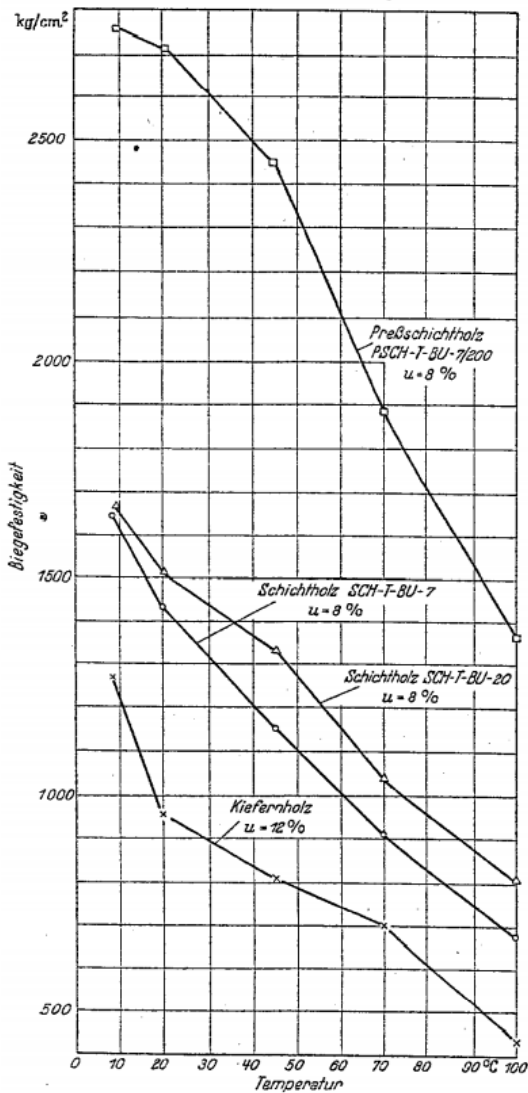


Abbildung 22: Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Temperatur bei Kiefernholz, Schichthölzern und Pressschichtholz nach [138]

Im Forschungsbericht [137] von 1990 beschreiben Glos und Henrici ihre Ergebnisse zur Untersuchung der Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen. Hierzu gehört auch die experimentelle Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens der Biegefestigkeit in Faserrichtung. Die Holzprobekörper für die Biegeprüfung hatten einen Querschnitt von 70 mm in Breite auf 150 mm in Höhe. Die Gesamtlänge der Holzprüfkörper betrug 3000 mm. Die statisch relevante Spannweite der Biegeprüfung betrug 2700 mm und entsprach damit dem 18-fachen der Höhe des Querschnittes. Die Belastung der Holzprobekörper erfolgte in den Drittelpunkten. Die untersuchten Materialtemperaturen sind 20 °C, 100 °C und 150 °C. Wie in Abbildung 23 gut erkennbar, ist der Verlauf des Mittelwerts der Reduzierung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur annähernd linear. Die ermittelten Werte wurden unter Berücksichtigung der Ästigkeit der Holzprobekörper vorgenommen, die vermeidlich schwächere Seite durch das Vorhandensein von mehr Astlöchern wurde nach unten in die Zugzone gelegt, damit wurde ein frühzeitigeres Versagen der Holzprobekörper auf Biegung provoziert. Die geringe Anzahl an Temperaturstufen lässt nur eine geringe Ableitbarkeit des Verlaufes der Biegefestigkeit zu.

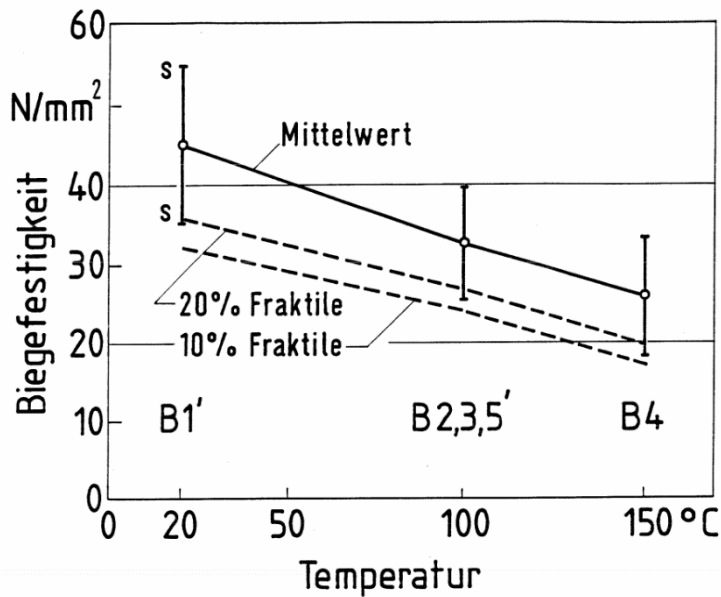


Abbildung 23: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [137]

Der Bericht von König und Walleij [135] beschreibt, dass das thermomechanische Verhalten der Biegefestigkeit vorrangig von dem thermomechanischen Verhalten der Druckfestigkeit abhängt. Eine genaue Angabe zum Verlauf der temperaturbedingten Reduzierung der Biegefestigkeit konnte in den vorliegenden Literaturquellen nicht gefunden werden. Jedoch sind die Angaben in der DIN EN 1995-1-2 sehr wahrscheinlich auch von König und Walleij für die Biegebeanspruchung.

In 2003 befasst sich auch Peter mit der temperaturabhängigen Biegezugfestigkeit. In dem Forschungsbericht [283] gibt es keine Angabe in Form eines Verlaufes, sondern ein Rechenmodell, welches anhand Biegeversuchen in Brandöfen validiert wurde. Insgesamt ergeben sich für das thermomechanische Verhalten der Biegefestigkeit konservative Ergebnisse.

In Abbildung 24 werden die wenigen verfügbaren Angaben zur prozentualen Reduzierung der Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur zusammengefasst. Insgesamt zeigt sich bei den meisten Angaben aus der Literatur ein annähernd linearer Verlauf zwischen der Referenztemperatur von 20°C und der Grenztemperatur von 300 °C. Jedoch muss auch festgehalten werden, dass die abgebildete Datenmenge im Verhältnis zur Druck- oder Zugfestigkeit deutlich reduziert ist.

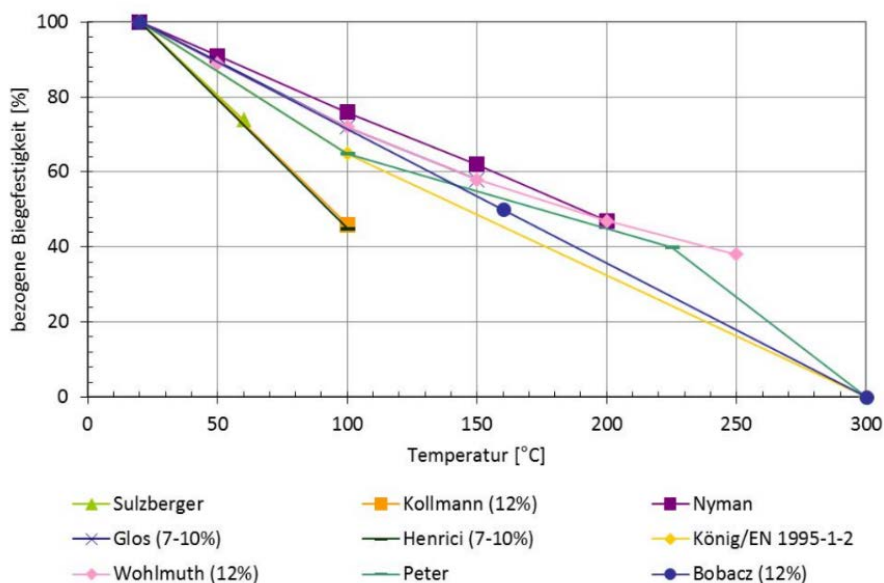


Abbildung 24: Darstellung der prozentualen temperaturabhängigen Biegefestigkeit aus der Literatur nach [148]

3.1.1.13 Erkenntnisse zum thermomechanischen Verhalten von Holz

Zusammenfassend zeigen die dargestellten und darüber hinaus betrachteten Literaturquellen zum thermomechanischen Verhalten des Baustoffes Holz, dass dieses Thema bereits häufiger im Fokus der Forschung stand. Aus dem aktuellen Stand der Wissenschaft ergeben sich Erkenntnisse und Wissenslücken, die in den folgenden Punkten aufgelistet sind.

- Bisher konnte sich bei der Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens von Holz kein einheitliches Vorgehen bzw. Prüfverfahren in der Wissenschaft durchsetzen.
- Die technische Umsetzbarkeit von Prüfaufbauten zur Untersuchung dieser Materialkennwerte sind meist komplex und individuelle Lösungen.
- Die Vergleichbarkeit der Angaben in der Literatur ist durch die Verwendung von verschiedenen Holzarten minimiert machbar.
- Abgeleitete Rechenmethoden oder Angaben von Bemessungswerten sind sehr konservativ.
- Bereits bei geringen Steigerungen der Materialtemperatur ($< 60\text{ °C}$) sind Reduzierungen der Festigkeiten erkennbar. Besonders bei Druck ist diese Reduzierung sehr ausgeprägt mit 10 % bis 20 % in den meisten Fällen. In der DIN EN 1995-1-1 [152] wird der Anwendungsbereich auf maximal 60 °C begrenzt, jedoch gibt es keinen Hinweis, ob der bereits eintretenden Reduzierung der Festigkeit bis dahin Rechnung getragen wird.
- In der Regel kann bei Materialtemperaturen ab 100 °C eine Holzfeuchte von annähernd 0 % angenommen werden.
- Eine Dehydratation vom Holz kann zu einer Verfestigung des Holzes führen, welches der temperaturbedingten Reduzierung der Festigkeit entgegenwirkt.
- Bisherige Untersuchungen haben die Reversibilität des thermomechanischen Verhaltens von Holz höchstens untergeordnet betrachtet. Jedoch wäre dies für Sanierungsarbeiten nach Brandfällen in Holzbauwerken von großem Interesse.

3.1.1.14 Haustechnische Installationen im Holzbau

Zur Versorgung der technischen Gebäudeausrüstung eines Gebäudes sind sowohl vertikale als auch horizontale Leitungsführungen notwendig. Haustechnische Installationen werden in Elektroleitungen, brennbare und nichtbrennbare Rohre (beispielsweise als wasserführende Leitungen) und luftführende Leitungen unterschieden.

Durchdringen diese Leitungen raumabschließende Bauteile, für die eine Feuerwiderstandsfähigkeit vorgeschrieben ist, ist dies entsprechend der grundsätzlichen Anforderungen nach MBO § 40 [27] nur möglich, wenn eine Brandausbreitung ausreichend lang nicht zu befürchten ist oder Vorkehrungen hiergegen getroffen sind. Entsprechend der brandschutztechnischen Schutzziele MBO § 14 schließt der Begriff „Brandausbreitung“ die Ausbreitung von Rauch ein.

Ausgenommen von diesen Anforderungen sind nach MBO § 40 und § 41 [27] die Durchdringungen von Bauteilen mit haustechnischen Installationen in den Gebäudeklassen 1 und 2, innerhalb von Wohnungen und innerhalb derselben Nutzungseinheit mit nicht mehr als insgesamt 400 m² in nicht mehr als zwei Geschossen.

Die MLAR [176] konkretisiert als Vorkehrungen gegen die Brandausbreitung die Führung

- offener Leitungen durch Abschottungen oder
- Leitungen innerhalb von Schächten bzw. Kanälen,

die mindestens dieselben Feuerwiderstandsdauern aufweisen wie die durchdrungenen, raumabschließenden Bauteile.

Die Abschottungen von Leitungen in Schächten und Kanälen kann einerseits an der Schacht-/ Kanalwand stattfinden (Typ A) oder in der Bauteilebene des durchdrungenen Bauteils (Typ B). Grundsätzlich wird bei der Durchführung von Installationen durch Decken empfohlen, eine Abschottung in Deckenebene vorzunehmen [177]. Bei gewerblichen Objekten kann eine Schacht- bzw. Kanallösung gegebenenfalls langfristig wirtschaftlicher sein, da hier einerseits eine hohe Installationsdichte vorliegt und andererseits die Wahrscheinlichkeit regelmäßiger Nachinstallationen vergleichsweise hoch ist.

Erleichterungen nach MLAR

Die MLAR [176] beschreibt zur Erfüllung der Anforderungen der MBO [27] außerdem Erleichterungen. Unter Beachtung der nachfolgend genannten Randbedingungen dürfen Leitungen ohne Abschottung, durch Wände / Decken mit Anforderungen an den Feuerwiderstand, geführt werden. Diese Erleichterungen sind ohne weitere Maßnahmen in Holzbauteilen anwendbar [178]. Der Gesetzgeber beschreibt für diese Erleichterungen keine Vorgaben zur Begrenzung der Temperaturleitung / maximalen Oberflächentemperatur auf der dem Brand abgewandten Seite, z. B. bei ungedämmten Rohren und Elektrokabeln. Das Restrisiko wird hier auf Grundlage jahrelanger Schadenerfahrung unberücksichtigt gelassen [179].

Dabei sollte das Wort „Erleichterung“ nicht als Erleichterung des Aufwandes und der Sorgfaltspflicht missverstanden werden, es beschreibt im baurechtlichen Sinne die „Erleichterung der brandschutztechnischen Nachweisführung“ [178]. Der Verwendbarkeitsnachweis wird durch die Einhaltung der Anforderungen gemäß den Erleichterungen in der MLAR [176] geführt. Das bedeutet jedoch nicht, dass der Fachplaner oder Ausführende diesen Punkt vollständig außer Acht lassen kann. Auch bei Anwendung der Erleichterungen der MLAR [176] ist er verpflichtet, die Schutzziele der (Muster) Bauordnung [27] zu beachten. Dies bedeutet, dass er z. B. bei möglicher Lagerung von brennbaren Stoffen in der Nähe von Leitungsdurchführungen Vorkehrungen gegen die Entstehung von Sekundärbränden zu treffen hat, z. B. durch Abtrennungen mit Vorwandinstallationen [179].

Die Erleichterungen der MLAR [176] gelten für Leitungsführungen durch feuerhemmende Wände und für einzelne Leitungen.

Durch feuerhemmende Wände dürfen

- einzelne elektrische Leitungen
- Kabelbündel bis 50 mm Durchmesser
- Nichtbrennbare Rohrleitungen (auch mit brennbarer Beschichtung bis 2 mm)

geführt werden.

Der Raum zwischen den Leitungen und dem Bauteil muss mit nichtbrennbaren oder im Brandfall aufschäumenden Baustoffen vollständig ausgefüllt wird. Werden Mineralfasern (Schmelztemperatur ≥ 1000 °C) oder aufschäumende Dämmschichtbildner verwendet, darf der maximale Abstand zwischen Leitungen und umgebenden Bauteil nicht mehr als 50 mm betragen.

Die Erleichterungen für feuerhemmende Wände wurden eingeführt, um sich erhöhende Kosten- und Arbeitsaufwände infolge einer veränderten Formulierung der MBO im Jahr 2002 entgegenzuwirken. Mit der Novellierung der MBO 2002 wurden die Anforderungen zu Abschottungen in raumabschließenden Bauteilen, „die feuerbeständig sein müssen“ (ab F90) [180] auf „Bauteile, für die eine Feuerwiderstandsfähigkeit vorgeschrieben ist“ (ab F30) [181] geändert. Bei Decken sind aufgrund der höheren Brandbelastung in der Regel höhere Anforderungen an die Abschottung notwendig [179].

Erleichterungen für einzelne Leitungen sind möglich für

- a) einzelne elektrische Leitungen
- b) einzelne Rohrleitungen mit Außendurchmesser bis 160 mm aus nichtbrennbaren Baustoffen (ausgenommen Aluminium und Glas), auch mit Beschichtungen aus brennbaren Baustoffen bis zu 2 mm Dicke
- c) einzelne Rohrleitungen für nichtbrennbare Medien und Installationsrohre für elektrische Leitungen mit einem Außendurchmesser bis 32 mm aus brennbaren Baustoffen, Aluminium oder Glas

Die Bezeichnung (a) einzelne elektrische Leitungen beinhalten auch Kabelbündel aus bis zu drei Kabeln mit einem Durchmesser von insgesamt maximal 32 mm [182].

Möglichkeiten zur Abschottung des Ringspalts und Außenzwickels von Kabelbündel wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens HolzbauRL BW untersucht [258]. Es wurden zwei Brandversuche, mit jeweils zwei Kabelbündeln (NYM 3 x 2,5) und 5 mm Ringspalt, durchgeführt. Die Ringspalte und Außenzwickel wurden Gipsspachtel und intumeszierender Brandschutzmasse verspachtelt. Bei einem Brandversuch waren die Schutzwirkungen der beiden Verspachtelungen gleichermaßen wirksam, beim anderen Versuch wurden beim Gipsspachtel eine schnellere Temperaturerhöhung innerhalb der Durchdringung und ein früheres Zusammenschmelzen der Kabel an der brandabgewandten Seite festgestellt.

Die genannten Leitungen (a), (b) und (c) dürfen unter Beachtung nachfolgend genannter Randbedingungen ohne Abschottungen durch Wände / Decken mit Anforderungen an den Feuerwiderstand geführt werden [176]:

- der lichte Abstand der Leitungen untereinander bei Leitungen nach (a) und (b) mindestens dem einfachen des größeren Leitungsdurchmessers, nach (c) mindestens dem fünffachen des größeren Leitungsdurchmessers entspricht,
- der lichte Abstand zwischen einer Leitung (a) oder (b) und einer Leitung (c) mindestens dem größeren Maß (1 x D oder 5 x D) entspricht,
- die feuerbeständige Wand oder Decke eine Dicke von mindestens 80 mm, die hochfeuerhemmende Wand oder Decke eine Dicke von mindestens 70 mm, die feuerhemmende Wand oder Decke eine Dicke von mindestens 60 mm hat und
- der Raum zwischen Leitungen und den umgebenden Bauteilen mit Zementmörtel oder Beton in der vorgenannten Mindestbauteildicke vollständig ausgefüllt wird.

Für einzelne Leitungen in jeweils eigenen Durchbrüchen oder Bohröffnungen [176] genügt es, den Raum zwischen der Leitung und dem umgebenden Bauteil (oder Hüllrohr aus nichtbrennbaren Baustoffen) mit Baustoffen aus Mineralfasern oder mit im Brandfall aufschäumenden Baustoffen vollständig zu verschließen. Zur Gewährleistung der Rauchdichtigkeit wird für Mineralfasern eine Mindeststopfdichte von 90 kg/m^3 empfohlen [178]. Der lichte Abstand zwischen der Leitung und dem umgebenden Bauteil oder Hüllrohr darf bei Verwendung von Baustoffen aus Mineralfasern (Schmelztemperatur ≥ 1000 °C) nicht mehr als 50 mm, bei Verwendung von im Brandfall aufschäumenden Baustoffen nicht mehr als 15 mm betragen (Abbildung 25).

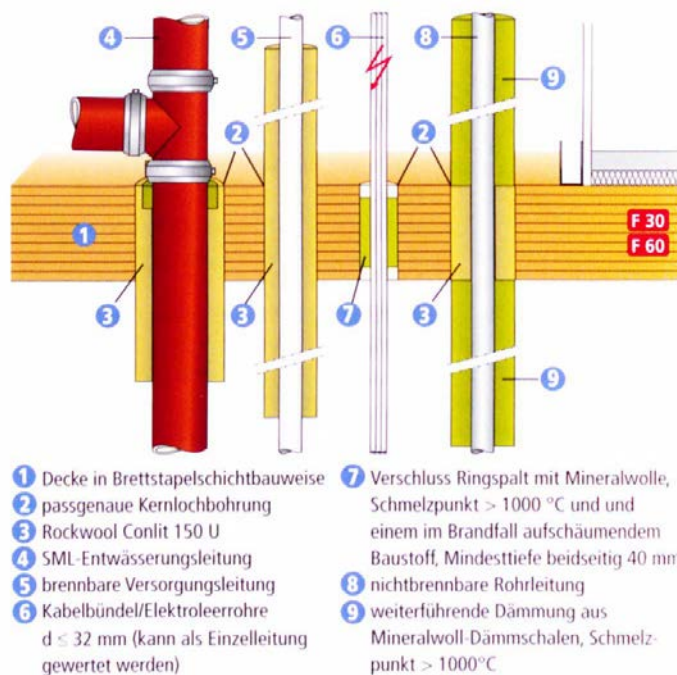


Abbildung 25: Beispiel von Leitungsdurchführungen durch eine feuerhemmende Decke in Brettstapel-/Brettschichtbauweise nach den „Erleichterungen der MLAR, Abschnitt 4.3.2“ mit passgenauer Kernbohrung oder Leitungen mit Restverschluss durch eine Mineralwollstopfung, Schmelzpunkt ≥ 1000 °C und einem im Brandfall aufschäumenden Baustoff [178].

Für einzelne Rohrleitungen (b und c) mit Dämmung [176] gilt außerdem, dass die Dämmung im Bereich der Leitungsdurchführung (Durchbrüche oder Bohröffnungen) aus nichtbrennbaren Baustoffen (Schmelztemperatur ≥ 1000 °C) besteht. Umhüllungen aus brennbaren Baustoffen bis 0,5 mm Dicke sind zulässig. Der lichte Abstand untereinander, gemessen zwischen den Dämmschichtoberflächen im Bereich der Durchführung, sowie zu elektrischen Leitungen muss mindestens 50 mm betragen. Bei Rohrleitungen mit Dämmungen aus brennbaren Baustoffen außerhalb der Durchführung ist eine Umhüllung aus Stahlblech oder beidseitig der Durchführung, auf eine Länge von jeweils 500 mm, eine Dämmung aus nichtbrennbaren Baustoffen anzuordnen.

Lüftungsleitungen

Für Lüftungsanlagen, raumlufthechnische Anlagen und Warmluftheizungen bestimmt die Musterbauordnung [27], dass diese betriebssicher und brandsicher sein müssen. Sie dürfen raumabschließende Bauteile, für die eine Feuerwiderstandsfähigkeit vorgeschrieben ist, nur überbrücken, wenn eine Brandausbreitung ausreichend lang nicht zu befürchten ist, oder wenn Vorkehrungen hiergegen getroffen sind.

Diese Anforderungen gelten nicht

- für Gebäude der Gebäudeklassen 1 und 2,
- innerhalb von Wohnungen,
- innerhalb derselben Nutzungseinheit mit nicht mehr als 400 m² in nicht mehr als zwei Geschossen.

Diese Anforderungen werden durch die Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Lüftungsanlagen (MLüAR) [184] konkretisiert. Gegen die Übertragung von Feuer und Rauch werden in den Lüftungsleitungen Brandschutzklappen (Abbildung 26) angeordnet, welche die gleiche Feuerwiderstandsfähigkeit aufweisen müssen, wie das durchdrungene Bauteil.



Abbildung 26: Brandschutzklappe (Bild: Wildeboer Bauteile GmbH)

Brandschutzklappen sind entsprechend DIN EN 15650 [185] europäisch harmonisierte Bauprodukte. Für ihre Verwendung im europäischen Raum (CE-Kennzeichnung) sind vom Hersteller oder seinen Vertretern Leistungserklärungen und Betriebs-/ Montageanleitungen auszustellen. Ihre Verwendung in Deutschland wird in MVVTB Anhang 4 Kap. 7 [186] geregelt.

Einige Hersteller [187], [188], [189], [190], [191] beschreiben für ihre Brandschutzklappen den Einbau in Wände und Decken in Massivholz- und Holztafelbauweise. Dementsprechend werden Brandschutzklappen in Holzbauteilen in Weich- oder Hartschotts eingebaut, welche wiederum passgenau (oder in verfüllte Fugen) ohne Auslaibung im Holzbauteil befestigt sind (Abbildung 27). Die Rahmenstärke der Weich- oder Hartschotts um die Brandschutzklappe herum beträgt zwischen 40 mm und 60 mm. In den jeweiligen Leistungserklärungen, Betriebs-/ Montageanleitungen und Anwenderhandbüchern werden, in Abhängigkeit zur erzielten Feuerwiderstandsklasse, Mindestanforderungen an die Holzbauteile (Bauteildicke, Bauteilbekleidungen, Holzständerabmessungen) und die Weich- bzw. Hartschotts (Rahmentiefe, Befestigungen) gestellt.

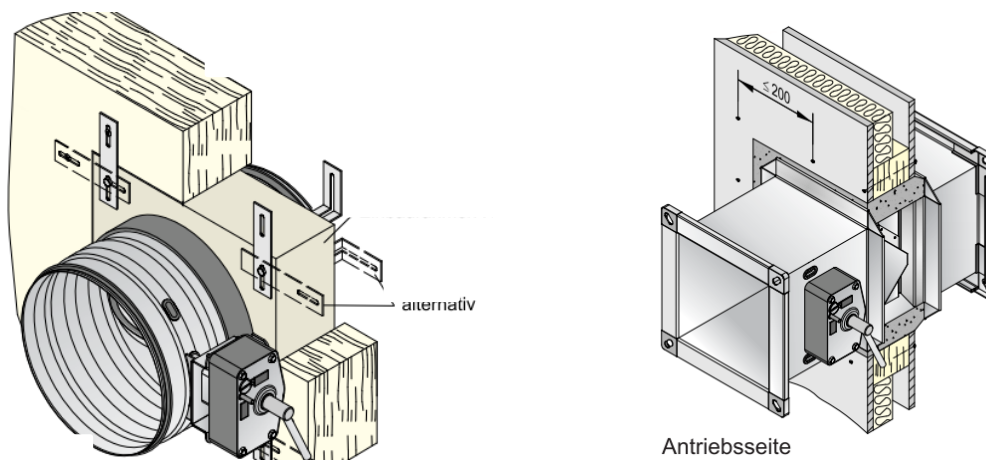


Abbildung 27: Einbau in Wände und Decken in Holzmassivbauweise mit Einbaurahmen und Holzrahmenbauweise mit Mörtelschott (Bild: Wildeboer Bauteile GmbH [187], [188])

Installationsführungen in hochfeuerhemmenden Holzrahmenbauteilen

Die baurechtlichen Möglichkeiten einer Abschottung in hochfeuerhemmenden Holzrahmenbauteilen werden in der M-HFHolzR [47] dokumentiert.

Die M-HFHolzR [47] fordert für hochfeuerhemmende Holzrahmenbauteile, dass Auslaibungen in Öffnungen mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindungen ausgeführt werden. Sofern an den Verschluss der Öffnung brandschutztechnische Anforderungen gestellt werden, wie an Rohr-/ Kabelabschottungen oder Brandschutzklappen, ist ein entsprechender bauaufsichtlicher Verwendbarkeits- bzw. Anwendbarkeitsnachweis für den Einbau in hochfeuerhemmende Bauteile notwendig.

Entsprechend der M-HFHolzR [47] dürfen Installationen nicht in hochfeuerhemmenden Holzrahmenbauteilen geführt werden, sondern sind in Installationsebenen vor den Wänden bzw. unterhalb der Decken oder in Schächten und Kanälen zu führen.

Davon ausgenommen sind

- einzelne Leitungen oder
- einzelne, nichtbrennbare Hüllrohre mit bis zu drei Leitungen,

sofern sie zur Versorgung des angrenzenden Raumes innerhalb derselben Nutzungseinheit dienen. Durchdringungen der Brandschutzbekleidung sind mit nichtbrennbaren Baustoffen zu verspachteln. Einzelne Hohlwanddosen dürfen mit einem Mindestabstand von 150 mm zum nächsten Holzständer bzw. Holzrippe eingebaut werden und sie sind innerhalb des Wandhohlraumes vollständig mit mindestens 30 mm nichtbrennbaren Dämmstoffen zu umhüllen. Gegenüberliegende Hohlwanddosen sind gefachversetzt anzuordnen. Diese Ausnahmen gelten in Treppenraumwänden nur für Leitungen, die ausschließlich der Versorgung des Treppenraums dienen, sie gelten nicht für hochfeuerhemmende Stützen und Träger und Wänden, die anstelle von Brandwänden zulässig sind.

Nach [178] bestehen keine brandschutztechnischen Bedenken bei der Übertragung der aufgeführten Grundsätze nach [47] auf feuerhemmende Holzbalkendecken. Diesbezüglich sind Erleichterungen möglich, da das Schutzniveau bei feuerhemmenden Bauteilen geringer ist.

Installationsführungen durch Holzbauteile

Wie für Abschottung von Installationen durch hochfeuerhemmende Holzrahmenbauteile, wird auch für Massivholzbauteile ohne brandschutztechnisch wirksame Bekleidung eine Auslaibung der Bauteilöffnung, entsprechend der M-HFHolzR und der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer der Decke, empfohlen [177]. Im Bereich der Abschottung wird außerdem eine umlaufende Brandschutzbekleidung ≥ 100 mm Breite angeordnet (Abbildung 28). Durch diese Brandschutzbekleidung wird ein „Hinterbrennen“ des Abschottungssystems verhindert und die Konstruktion ist mit einer geprüften Situation in einer leichten Trennwand vergleichbar. Die geforderte Breite der Brandschutzbekleidung ≥ 100 mm ist auf die grundsätzliche Regelung des DIBt zu Abständen von Abschottungen zurückzuführen [192].

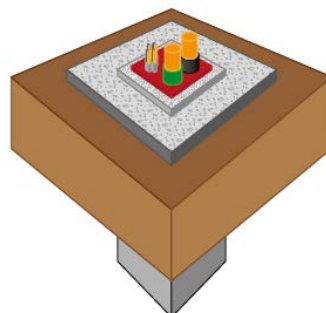


Abbildung 28: Darstellung der umlaufenden Brandschutzbekleidung [177]

klassifizierte Abschottungen in Holzbauteilen

Können die genannten Erleichterungen nicht angewendet werden, sind zur Führung von Leitungen durch raumabschließende Bauteile hindurch klassifizierte Abschottungen in den Bauteilöffnungen notwendig.

Im Rahmen der Leitungsanlagenrichtlinie [176] ist, solange keine harmonisierten europäischen Bauproduktnormen unter einem Mandat der Bauprodukttrichtlinie oder eine Guideline als Grundlage einer europäischen technischen Zulassung (ETAG) erstellt wurden, für alle Leitungsabschottungen ein allgemeiner bauaufsichtlicher Ver- oder Anwendbarkeitsnachweis (allgemeine Bauartgenehmigung, allgemein bauaufsichtliche Zulassung, allgemein bauaufsichtliches Prüfzeugnis) erforderlich [178].

Problematisch ist das Fehlen von bauaufsichtlichen Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweisen für die Durchführung von Installationen durch raumabschließende Holzbauteile. Dies ist auf die geringe Berücksichtigung von Holzkonstruktionen innerhalb der Prüfnormen DIN EN 1363-1 [66] und DIN EN 1366-3 [193] zurückzuführen. DIN EN 1363-1 [66] beschreibt die zu verwendenden Prüfeinrich-

tungen und Prüfbedingungen, DIN EN 1366-3 [193] das Verfahren zur Prüfung von Leitungsabschottungen. Das Prüfverfahren bietet als Prüfwände und -decken, in welche Leitungen und Abschottungen eingebaut werden, nur Massiv- und Leichtbaukonstruktion an. Da sowohl das Bauen im Bestand, als auch der moderne, mehrgeschossige Holzbau eine Vielzahl unterschiedlicher Wand und Deckenkonstruktionen bietet, konnten bisher keine allgemeingültigen, als (quasi-)feuerbeständig bewertete Holzbauteile bestimmt werden. Würde man sich beispielsweise grundlegend auf eine Brettsperrholzdecke einigen, müssten weiterhin die Anordnung, Dicke und Anzahl der Holzlagen bestimmt werden, sowie die Eigenschaften des Holzes und des Bindemittels. Eine allgemeingültige Prüfung von Abschottungen in Holzbauteilen ist somit nicht möglich und die Anwendung einer geprüften Abschottung ist aktuell nur auf die tatsächlich geprüfte Konstruktion beschränkt.

Die wenigen für Holzbauteile zugelassenen Abschottungen weisen einen überschaubaren Anwendungsbereich auf. Eine Rohrschale als Abschottung für nichtbrennbare Rohrleitungen von Rockwool Mineralwoll GmbH & Co. OHG [194] kann in mindestens 160 mm dicken Brettsperrholzdecken (R 90) nach ETA-11/0189 [195] (5-lagig, Nadelholz, Abbrandrate 0,65 mm/min) verwendet werden (Abbildung 29, links). Weitere Holzbauteile sind nicht abgedeckt. Der Einbau erfolgt in eine passgenaue Bohrung ohne Auslaibung oder ggf. unter Verwendung eines hohlraumfüllenden, dämmschichtbildenden Baustoffes im Ringspalt.

Eine ähnliche Einbauweise ist mit einer Brandschutzdichtmasse der Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH [196] möglich. Diese Abschottung, für nichtbrennbare Rohrleitungen und Aluminiumverbundrohre mit Mineralwollisolierung, wird ebenfalls in einer Durchführung ohne Auslaibung und dem zugelassenen Ringspaltverschluss ausgeführt. Die Abschottung darf durch Massivholzwände und -decken (Brettsperrholz) bestimmter Hersteller und durch zweilagig bekleidete Holzbalkendecken (F90, min. 236 mm) und Holzrahmenwände (F90, min. 152 mm) geführt werden (Abbildung 29, rechts).

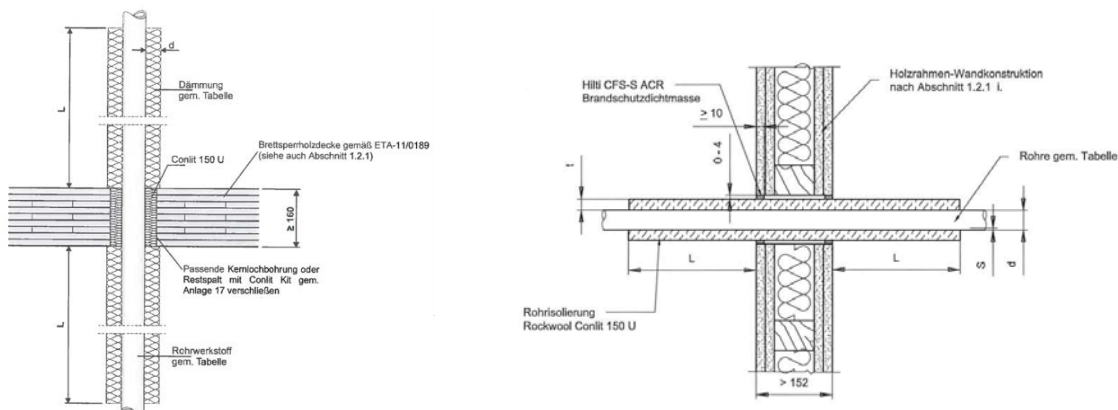


Abbildung 29: R 90 Rohrabschottung für nichtbrennbare Rohrleitungen in Brettsperrholzdecke (links) [194] und in Holzrahmenwand (rechts) [196]

Eine in der Baupraxis übliche Methodik, zur Nutzung klassifizierter Abschottungssysteme aus Massivbauweisen in Holzbauteilen, ist der Einbau einer Betonplatte in das Holzbauteil (Abbildung 30). Die Betonplatte kann beispielsweise in eine Brettsperrholzdecke oder in ein Gefach einer Holzbalkendecke eingesetzt werden. Die Auslaibung der Bauteilöffnung wird entsprechend der M-HFHolzR [47] und der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer der Decke ausgeführt. Anschließend können die für Massivbauweisen zugelassenen Abschottungssysteme unverändert in die Betonplatte eingebaut werden. Allerdings muss bei einer örtlichen Betonage der Feuchteintrag in die, auf Feuchteschwankungen sensiblen, Holz- und Gipsbaustoffe besonders berücksichtigt werden.

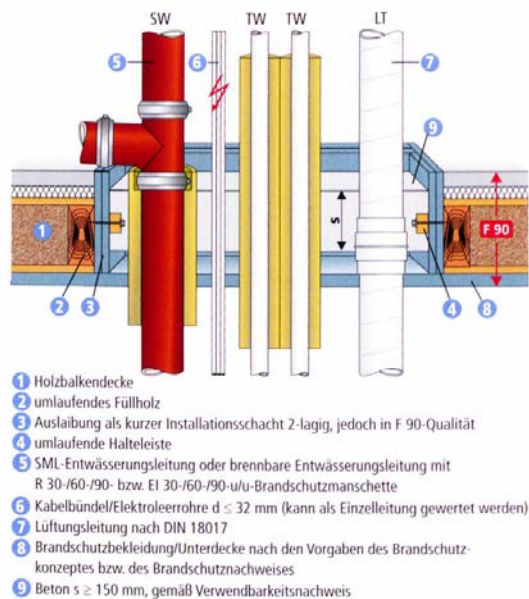


Abbildung 30: Beispiel von Leitungsabschottungen durch eine feuerbeständig ertüchtigte Holzbalkendecke mit Auslaibung und innenliegenden klassifizierten Abschottungen inkl. Halteleiste [178]

Diese Einbauart stellt in dieser Kombination eine nicht wesentliche Abweichung vom Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweis der klassifizierten Abschottung dar [178]. Die Abweichung kann durch den Hersteller / Errichter im Rahmen einer Übereinstimmungserklärung bestätigt werden. Sollte der Hersteller / Errichter in seiner Beurteilung unsicher sein, kann er seine Einschätzung durch den Inhaber des Ver- bzw. Anwendbarkeitsnachweises bestätigen lassen. Unterstützt wird diese Methodik meist durch gutachterliche Stellungnahmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das DIBt in [197] feststellt, dass ein allgemeines „ergänzendes Gutachten“ den Verwendungs- bzw. Anwendungsbereich der Zulassung / Bauartengenehmigung / Prüfzeugnisse in unzulässiger Weise erweitert und, rein formal betrachtet, bei der Errichtung baulicher Anlagen nicht herangezogen werden darf. Eine nicht wesentliche Abweichung kann nur im Einzelfall, auf ein konkretes Bauvorhaben bezogen, angewendet werden. Aussteller und Verantwortlicher der Übereinstimmungserklärung bleibt stets der Hersteller / Errichter [178].

Aktuelle Forschungsarbeiten [198] untersuchen die Möglichkeit, die derzeit eingesetzte Betonplatte durch Holzmassiv- und Holzrahmenmodule zu ersetzen. Diese Holzmodule erfüllen die, sich aus den Abschottungssystemen ergebenden, zusätzlichen Anforderungen, beispielsweise an die Bauteildicke, und könnten werkseitig vorproduziert werden. Erste Großbrandversuch mit 160 mm dicken Brett-schichtholzmodulen und modifizierten Abschottungssystemen belegen Feuerwiderstandsdauern bis zu 120 Minuten. Durch die Verwendung dieser Holzmodule, anstelle der gängigen Betonplatten, wird der Anteil des Baustoffes Holz erhöht. Dadurch verbessert sich die ökologische Qualität im Herstellungsprozess des Gebäudes sowie die Akzeptanz von Holz als brandschutztechnisch wirksamer Baustoff.

3.1.1.15 Schutzzieldefinition und Sicherheitskonzept

Grundsätzlich stellt ein Sicherheitskonzept einen wichtigen Zusammenhang zwischen der im öffentlichen Interesse liegenden Sicherheit bzw. der in § 3 der Musterbauordnung (MBO) [27] verankerten Schutzziele und der gebotenen Wirtschaftlichkeit bei der bautechnischen Konstruktion her. Eine ausreichende Sicherheit besteht, wenn z. B. ein Versagen des Bauwerkes innerhalb der geplanten Nutzungsdauer nur mit einer akzeptierbar kleinen Wahrscheinlichkeit (Zielversagenswahrscheinlichkeit) auftritt. [3]

Bei der Bemessung der baulichen Brandschutzmaßnahmen müssen die Unsicherheiten und Parameterstreuungen der verwendeten Materialien durch die Auswahl geeigneter Bemessungswerte abgedeckt werden. Dadurch wird ein bedingtes Versagen mit ausreichender Zuverlässigkeit vermieden, wie in Abbildung 31 gezeigt wird. Diese Bemessungswerte werden, in Übereinstimmung mit dem Teilsicherheitskonzept der konstruktiven Eurocodes, über charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitswerte sowie Teilsicherheitsbeiwerte definiert. Die damit erreichte Zuverlässigkeit bzw. das verbleibende Restrisiko ist für den Aufsteller der Nachweise jedoch nicht erkennbar. [3]

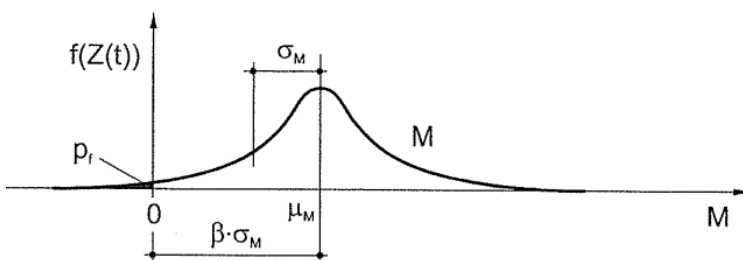


Abbildung 31: Sicherheitsabstand einer Verteilungsdichte M zum Grenzzustand [28]

Ein wesentliches Prinzip ist die Beschreibung der Nachweissituationen durch Grenzzustände (Grenzzustands-gleichungen) mit streuenden Einflussgrößen. Für diese Einflussgrößen werden Bemessungswerte vorgegeben, die i. d. R. aus charakteristischen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten berechnet werden. Die Bemessungswerte bzw. die Teilsicherheitsbeiwerte sollen so festgelegt werden, dass der betrachtete Grenzzustand mit einer vorgegebenen Zuverlässigkeit nicht überschritten wird, wie in Abbildung 32 dargestellt. Für die erforderliche Zuverlässigkeit werden in Abhängigkeit von den möglichen Folgen beim Überschreiten des Grenzzustandes Richtwerte gegeben [29]. Gemäß dem DIN EN 1990 [30] sind Grenzzustände der Tragfähigkeit (Sicherheit der Personen und/oder Sicherheit des Tragwerks) und Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (Funktion des Tragwerks und/oder Wohlbefinden der Nutzer) definiert.

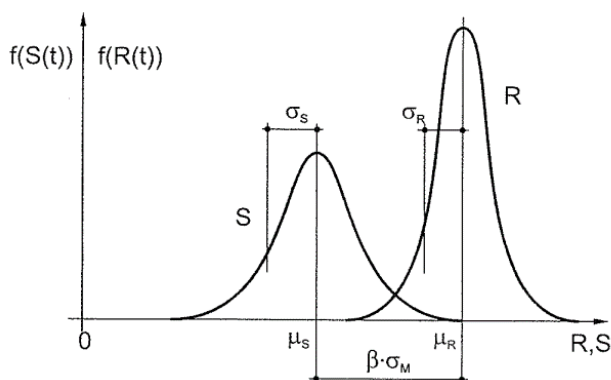


Abbildung 32: Verteilungsdichten von Widerstand R und Einwirkung S [28]

Statistisch und/oder experimentell abgesicherte Daten zu den betreffenden Einflussgrößen sowie die Modellunsicherheiten bei der Beschreibung der Brandeinwirkung sind national nur spärlich und zum Teil widersprüchlich vorhanden. Auch belastbare Daten zur Zuverlässigkeit und Wirksamkeit von anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen sind teilweise noch unzureichend. Solche An-

gaben werden jedoch benötigt um, z. B. die Kompensation von nicht ausführbaren baulichen Brandschutzmaßnahmen durch anlagentechnische oder abwehrende Brandschutzmaßnahmen quantitativ zu begründen. [29]

Der Lastfall Brand stellt entsprechend DIN EN 1991 eine außergewöhnliche Bemessungssituation dar, die sehr selten Eintritt und daher während der Nutzungsdauer eines Gebäudes nur mit einer sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeit zu erwarten ist. Demzufolge darf die erforderliche Zuverlässigkeit im Vergleich zu den häufiger zu erwartenden Bemessungssituationen (gängige Gebrauchslastfälle) reduziert werden. Auf der Einwirkungsseite erfolgt dies, indem die Teilsicherheitsbeiwerte in der Regel entfallen bzw. zu 1,0 gesetzt werden und als Bemessungswerte für den Brandfall unmittelbar die nominalen Werte der Eigengewichtslasten und für die Leiteinwirkung sowie für weitere veränderliche Einwirkungen die quasi-ständigen Werte angesetzt werden dürfen. Ausgenommen hierbei ist Wind als Leiteinwirkung, hier ist der häufigste Wert anzusetzen.

Für den Brandfall wird in DIN EN 1991-1-2 [1] empfohlen, und auch vom zuständigen DIN-Arbeitsausschuss für Deutschland im Nationalen Anhang bestätigt, dass die Teilsicherheitsbeiwerte für die Materialkennwerte bei allen Baustoffen und Bauarten (γ_M) einheitlich 1,0 betragen, d. h., dass auf der Widerstandsseite mit den charakteristischen Werten gerechnet wird. Damit kann die erforderliche Zuverlässigkeit der Brandschutzbemessung nur über die Definition einer hinreichend konservativen Bemessungsbrandeinwirkung sichergestellt werden. [3]

Dementsprechend folgt für die brandschutztechnische Nachweisführung von Bauteilen und Tragwerken, dass zum einen die mechanischen Einwirkungen bauartunabhängig gemäß DIN EN 1991 vorzugeben sind und zum anderen, dass die charakteristischen Werte der Materialeigenschaften aus den entsprechenden bauartspezifischen Eurocodeteil unverändert übernommen werden müssen. Somit ergibt sich die erforderliche Zuverlässigkeit der Brandschutzbemessung allein über die Beschreibung einer hinreichend konservativen Bemessungsbrandeinwirkung. [29]

Das Sicherheitskonzept für den baulichen Brandschutz orientiert sich an den getroffenen Festlegungen in den europäischen Normen und integriert diese. Das betrifft einerseits die generellen Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit von Bauwerken und Tragwerken, die bauart- und baustoffübergreifend in DIN EN 1990 [30] geregelt sind und andererseits das in DIN EN 1991-1-2/NA [21] enthaltene semiprobabilistische Sicherheitskonzept.

Im Folgenden wird das semiprobabilistische Sicherheitskonzept für den baulichen Brandschutz näher betrachtet und die Besonderheiten herausgestellt. Dieses Sicherheitskonzept ist bereits in der nationalen Normung (DIN EN 1991-1-2/NA [21]) enthalten und ist für:

- unterschiedliche Bauweisen (Beton, Stahl, Verbund, Holz, Mauerwerk),
- unterschiedliche Nutzungsarten (Standardgebäude und Sonderbauten),
- unterschiedliche Brandeinwirkungen (Naturbrandbeanspruchung) und
- unterschiedliche rechnerische Nachweisverfahren (vereinfachte und allgemeine Rechenverfahren nach den Eurocode-Brandschutzteilen)

gleichermaßen anwendbar und berücksichtigt folgende brandschutztechnischen Randbedingungen:

- Brandentstehungshäufigkeit (nutzungsabhängig),
- Brandausbreitungswahrscheinlichkeit (nutzungsabhängig),
- Verfügbarkeit und Wirksamkeit anlagentechnischer Maßnahmen,
- Verfügbarkeit und Wirksamkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr. [29]

Die erforderliche Zuverlässigkeit von tragenden und/oder raumabschließenden Bauteilen eines Gebäudes im Brandfall hängt von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers in einer Nutzungseinheit eines Gebäudes und den mit dem brandbedingten Versagen der Bauteile verbundenen Schadensfolgen ab. Durch den vorbeugend baulichen Brandschutz wird dafür gesorgt, dass das Brandrisiko auf ein tolerierbares "Restrisiko" begrenzt bleibt.

3.1.1.16 Grundlagen zu Bewertung der Brandausbreitung über Außenwandbekleidungen aus Holz

Ein klar definiertes Schutzziel als Vorgabe zur Begrenzung der Brandweiterleitung über Außenwandbekleidungen ist für die Betrachtung von Fassaden aus brennbaren Baustoffen, wie z. B. Holzbekleidungen, eine wichtige Grundlage. Dies lässt sich jedoch in Deutschland aktuell nicht eindeutig ableiten und festlegen [58].

Aus Sicht der Bauaufsicht ist der Einsatz normalentflammbarer Außenwandbekleidungen wie nachfolgend beschrieben zu bewerten: „Wenn nun normalentflammbare Fassadenbekleidungen dort zulässig gemacht werden sollen, wo bislang nur schwerentflammbare zulässig sind, sollte das Anforderungsniveau dafür im Ergebnis nicht geringer angesetzt werden. Wo sich notgedrungen ein „Weniger“ durch die Baustoffklasse ergibt, könnte dementsprechend ein „Mehr“ an konstruktiven Maßnahmen erforderlich werden. Dafür erhoffen wir uns Vorschläge / Ergebnisse aus der Forschung.“ [59].

Ein weiterer wichtiger Grundsatz ist, dass wirksame Löscharbeiten möglich sein müssen und die Brandstellen für die Feuerwehr folglich mit den zur Verfügung stehenden technischen Mitteln löschar sein müssen (z. B. Brand in Hinterlüftungsspalt oder Zugänglichkeit bezogen auf die Höhe).

Zum aktuellen Zeitpunkt werden für brennbare Außenwandbekleidungen aus Holz in Brandschutznachweisen in Deutschland bauordnungsrechtliche Abweichungen definiert und dabei auf in Österreich [60] oder in der Schweiz [61], [62] zugelassene Systeme verwiesen. Diesen Lösungen liegen jedoch unterschiedliche Schutzziele zugrunde, die eine Anwendung in Deutschland nicht ohne weiteres zulassen [58].

Bei einer Definition eines Schutzziels für Deutschland müssen die beschreibenden Parameter klar definiert sein, um Missverständnissen vorzubeugen. Nur dadurch lassen sich mögliche konstruktive Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit hin bewerten. Die einfache Formulierung „Der Brand darf eine Ausdehnung von zwei Geschossen im Gebäude nicht überschreiten“ ist nicht ohne weiteres in konkrete Anforderungen zu überführen. Konkret muss geklärt sein, wie das Mitbrennen der Fassade bzw. die Brandausbreitung in darüber liegende Geschosse durch eine aus einer Öffnung austretenden Flamme zu bewerten ist.

Nachstehende Aspekte und Anforderungen sollen in der konkreten Beurteilung der brandschutztechnischen Sicherheit von Fassaden und Außenwandbekleidungen, insbesondere in Verbindung mit dem Werkstoff Holz, berücksichtigt werden:

- Die Flammenhöhen aus der Fensteröffnung des Primärbrands lassen sich über ein allgemeines Schutzziel nicht definieren oder begrenzen.
- Die vertikale Brandausbreitung soll begrenzt werden. Außerhalb der Flamme aus dem Primärbrandgeschoss bzw. des Sockelbrands soll keine weiterführende vertikale Brandausbreitung über die Geschosstrennung (i. d. R. Deckenebene) erfolgen.
- Die horizontale Brandausbreitung auf der brennbaren Außenwandbekleidung soll sich nicht wesentlich außerhalb der Flammenbreite aus dem Primärgeschoss ausdehnen.
- Brandabschnittstrennungen dürfen nicht negativ beeinflusst werden.
- Wirksame Löscharbeiten müssen möglich sein.

Die Flammenhöhe aus der Fensteröffnung des Primärbrandgeschosses lässt sich bauordnungsrechtlich nicht begrenzen. Es sind zwar für unterschiedliche Nutzungen statistische Annahmen für durchschnittliche Brandlastdichten bekannt, diese können jedoch von der realen Situation stark abweichen. Jede Person hat das Recht auf die freie Entfaltung ihrer Persönlichkeit, und das gilt auch für den Wohn- oder Arbeitsraum. Folglich wird es auch immer wieder Extremfälle, wie stark verwehrte Wohnungen mit enormer Ansammlung von Gegenständen und somit stark erhöhter Brandlast, geben. Brände in Räumen verlaufen i. d. R. zudem ventilationsgesteuert. Bei stark erhöhter Brandlast werden mehr brennbare Pyrolysegase nach außen transportiert und es entstehen folglich größere Flammenlängen an der Fassade. Zudem beeinflusst die Fenstergeometrie die Flammenlänge. Dieser Sachverhalt kann nicht über das Bauordnungsrecht reguliert werden.

Die vertikale Brandausbreitung über brennbare Außenwandbekleidungen lässt sich über Brandsperrern pro Geschoss, i. d. R. in Deckenebene, begrenzen. Der Abstand der Brandsperrern untereinander muss

dabei der typischen Geschosshöhe, i. d. R. ca. 3 m, entsprechen. Die Brandsperrern sind in jedem Geschoss notwendig. In der Regel sind die Brandsperrern auf Höhe der raumabschließenden Decke anzuordnen [61], [62]. Dadurch kann sichergestellt werden, dass mit normalentflammaren Bekleidungen (wie z. B. Holzbekleidungen) eine Brandausbreitung auf weitere Geschosse außerhalb der Primärfamme unterbunden wird.

Sofern die Brandsperrern innerhalb eines Geschosses, bspw. erst in Höhe des Fenstersimses, angeordnet werden sollen, kann es notwendig sein, die Außenwand, sprich die Wand hinter der Außenwandbekleidung, raumabschließend feuerhemmend (bei nichttragenden Außenwänden nach Außenbrandkurve) auszuführen, Fenster und Türen sind ausgenommen. Dies wäre für brennbare Außenwände grundsätzlich bauordnungsrechtlich gemäß MBO [27] notwendig, aber in diesem Fall auch für nichtbrennbare Außenwände (z. B. Glasfassaden mit davor befindlicher normalentflammbarer Außenwandbekleidung) sinnvoll. Dadurch soll eine Brandweiterleitung in andere Geschosse durch einen Einbrand in das Geschoss, in dem sich die wirksame Brandsperrern befindet, verhindert werden.

Die horizontale Brandausbreitung soll begrenzt sein. Ist dies nicht erfüllt, sind vertikale Brandsperrern notwendig.

Im Bereich von Brandwänden sind besondere Maßnahmen zur Sicherstellung der Brandabschnittsbildung notwendig. Eine horizontale Brandweiterleitung über diesen Bereich muss ausgeschlossen sein, z. B. durch nichtbrennbare Außenwandbekleidungen ≥ 1 m.

Wirksame Löscharbeiten sind möglich, wenn die Feuerwehr die brennende Außenwandbekleidung gezielt ablöschen kann und diese für sie zugänglich ist. Dies kann durch im Gebäude vorhandene Öffnungen, wie bspw. Fenster oder Balkone, ebenerdig über Zu- und Durchgänge oder ggf. über Hubrettungsfahrzeuge erfolgen. Letzteres führt zur Notwendigkeit von Aufstellflächen gemäß Richtlinien über Flächen für die Feuerwehr [63].

3.1.2 Arbeitspaket 2 Brandversuche und numerische Untersuchungen

3.1.2.1 Raumbrandversuche im Room Corner

Mit den im Forschungsvorhaben TIMpuls durchgeführten Raumbrandversuchen soll das Brandverhalten sowie die Branddynamik bei Bränden in Räumen mit ungeschützten und anfänglich geschützten Holzbauteilen untersucht werden. Es ist vor allem der Einfluss von ungeschützten Holzflächen auf die drei Brandphasen (Brandentwicklung, stationäre Brandphase und Abkühlphase) zu analysieren. Internationale klein- und mittelmaßstäbliche Untersuchungen [32] und [75] zeigen bereits, dass mit der zusätzlichen strukturellen Brandlast ein Einfluss auf die Branddynamik einhergeht. Der Einfluss ist im Brandregime, den Brandraumtemperaturen und dem Nachbrandverhalten sowie einem möglichen Selbstverlöschen erkennbar.

Die Branddynamik beschreibt das Zusammenspiel der Verbrennung innerhalb eines definierten Raumes unter Berücksichtigung der Ventilationsbedingungen. Hierbei wird der Brandverlauf über die drei Brandphasen betrachtet. Infolge ungeschützter Massivholzbauteile befindet sich im Brandraum, neben dem Quellterm der Massenfreisetzung der mobilen Brandlast, ein weiterer Quellterm, die strukturelle Brandlast. Die zusätzliche Massenfreisetzung aus der strukturellen Brandlast (\dot{R}_2) besitzt einen signifikanten Einfluss auf die Branddynamik im Brandraum. Infolge des, bei struktureller Brandlast vermehrt vorliegenden, ventilationsgesteuerten Brandregime wird die Wärmefreisetzung im Raum durch den Sauerstoff der einströmenden Frischluftmenge (\dot{m}_i) begrenzt. Gleichzeitig nimmt der Anteil an nicht verbrannten Pyrolysegasen in der ausströmenden Rauchgasmenge (\dot{m}_g) zu, welches zu einer vermehrten Oxidation der Pyrolysegase außerhalb des Brandraumes führt. Eine theoretische Darstellung der Beeinflussung der Massen- und Wärmeströme durch die strukturelle Brandlast ist in Abbildung 33 dargestellt. Die folgende Gleichung beschreibt die Massenbilanz im Brandraum gemäß Abbildung 33:

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_i + \dot{R}_1 + \dot{R}_2) = 0$$

Die Energiebilanz im Brandraum nach Abbildung 33 ergibt sich wie folgt:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_i + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0$$

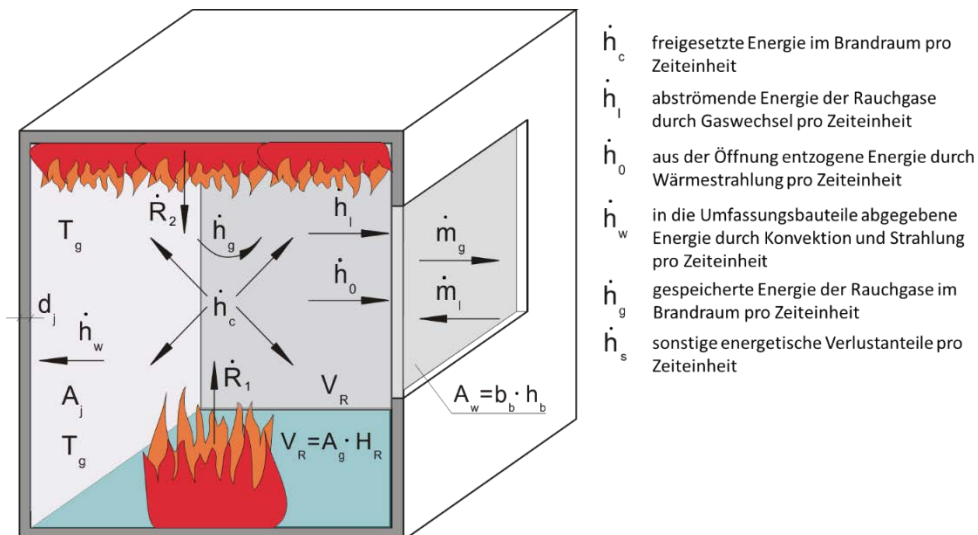


Abbildung 33: Bilanz der Wärme- und Massenströme (Ursprungsgrafik aus [128])

Eine Versuchsreihe von Raumbränden, zur Analyse der Branddynamik bei teilweise ungeschützten Holzflächen, erfolgte im Room Corner-Versuchsstand nach DIN EN 14390 [33] bzw. ISO 9705-1 [34]. Hierbei fand eine ergänzende Bestätigung der internationalen Untersuchungsergebnisse sowie weiterführender Erkenntnisgewinnung durch mittelskalige Raumbrandversuche zu diversen Einflüssen, wie z. B. Menge der strukturellen Brandlast, Ventilationsbedingungen, Brandquelle oder Versagen der Brandschutzbekleidung, bei ungeschützten und anfänglich geschützten Holzflächen statt.

Die Abmessungen des normierten Raumes sind in Abbildung 34 dargestellt. Der Room Corner empfiehlt sich aufgrund der umfangreichen Messdatenerfassung für eine systematische Untersuchung des Raumbrandverhaltens im mittleren Maßstab. Die bei einem Brandversuch in diesem Versuchsstand freierwerdenden Verbrennungsprodukte werden mit der oberhalb der Öffnung angeordneten Abzugshaube aufgefangen und über das Abzugsrohr abgeleitet. Im Abzugsrohr erfolgt neben der Erfassung der Volumenstromrate die Messung der optischen Dichte (Lichtmessstrecke). Über eine an dem Abzugsrohr gekoppelte Probenentnahmestrecke erfolgt die Analyse der Brandgase hinsichtlich der Konzentration an Sauerstoff (O_2 -Gasanalysegerät), Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid (CO/CO_2 -Analysegerät).

Eine Einschränkung hinsichtlich der Versuchsaufbauten ist die am Abzugsrohr angeschlossene Anlage zur Rauchgasreinigung. Die maximale Förderleistung der Anlage begrenzt die freigesetzte Brandleistung. Die im Brandversuch freigesetzten Verbrennungsprodukte müssen zur Analyse über die Abzugshaube aufgefangen werden. Infolge des gegebenen Durchmessers des Abzugsrohrs sowie der maximalen Förderleistung der Rauchgasreinigungsanlage ist die Wärmefreisetzungsrate der Room Corner Versuche technisch bedingt auf ca. 2.000 kW begrenzt.

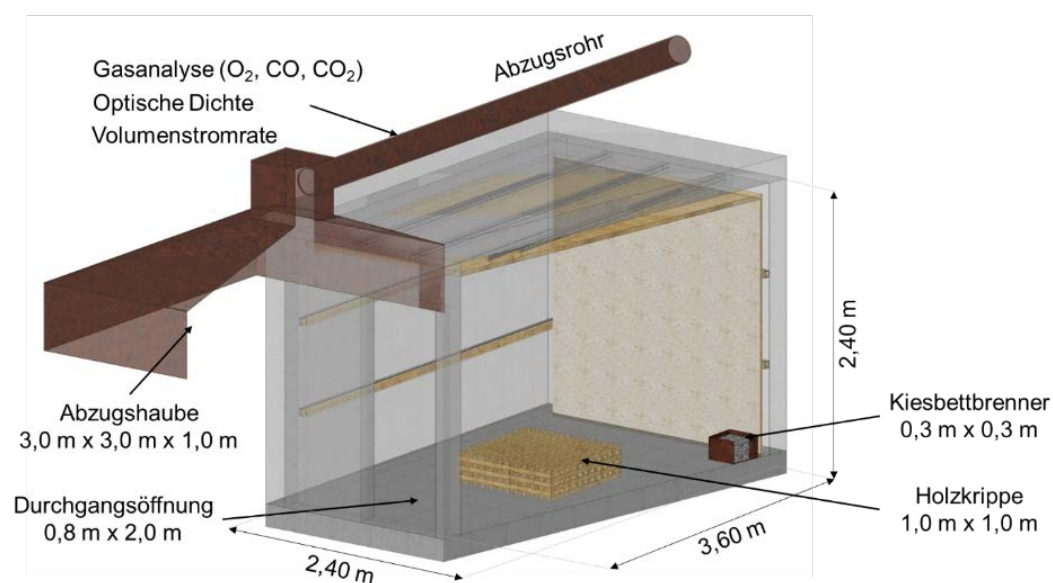


Abbildung 34: Darstellung des Room Corner Testraum nach DIN EN 14390 [33] bzw. ISO 9705-1 [34]

Konzeption

In Anbetracht der gesetzten Ziele weist der Room Corner Testraum, aufgrund der umfangreichen Datenerfassung (Temperaturen, Wärmefreisetzungsrate, Massenverlust, Analyse der Brandnebenerscheinungen) eine optimale Eignung zur anfänglichen Untersuchung von Raumbränden auf. Diese Versuche dienen zur Analyse des Brandverlaufes bei ungeschützten und anfänglich geschützten Holzoberflächen. Außerdem werden im Zuge dieser Versuchsserie Löschmaßnahmen sowie das Nachbrandverhalten (inkl. möglichem Selbstverlöschen) mit untersucht.

Zur realistischen Darstellung eines Brandverlaufes sollten die Raumbrände mit Realbrandlasten durchgeführt werden. Um eine mögliche Streuung bei der Wärmefreisetzungsrate durch die mobile Brandlast zu berücksichtigen ist die Verwendung von einem Kiesbettbrenner (propangasbetrieben mit eigenem Durchflussmesser) bzw. Holzkruppen mit definierten Eigenschaften (z. B. Abmessungen, Gewicht, Feuchtegehalt) zielführend.

Die Auswertung von Realbrandversuchen aus der Literatur (vgl. Abbildung 5 zeigt bereits, dass die Ausbildung einer ungeschützten Holzfläche den Brandverlauf in der Brandentwicklungs- und Abkühlphase stark beeinflusst. Des Weiteren zeigte sich bei zusätzlicher struktureller Brandlast, dass das Brandregime zu einem früheren Zeitpunkt im Brandverlauf in einen ventilationsgesteuerten Brand übergeht [75].

Brandquelle

In den Raumbrandversuchen wurden als Brandquelle (Stützfeuer), zur Darstellung der mobilen Brandlast, ein 300 x 300 mm² großer propangasbetriebener Kiesbettbrenner (GB) oder Holzkippen mit einer Grundfläche von 1,0 x 1,0 m² verwendet. Die Nettoleistung des Kiesbettbrenners betrug, in Anlehnung an [33], während der ersten 10 min nach der Zündung 100 kW anschließend erfolgte eine Leistungssteigerung auf 300 kW, wobei die Dauer dieser Leistungsstufe in den einzelnen Versuchen variieren kann. In Abhängigkeit der Ausstattung des Versuchsstandes war der Kiesbettbrenner auf Brennerposition 1 oder Brennerposition 2 angeordnet, wie Abbildung 35 zeigt. Für die Abbildung des Stützfeuers durch die Holzkippe wurde jeweils eine 50 kg Krippe mittig des Raumes auf der Krippenposition 1 und/oder Krippenposition 2 (siehe Abbildung 35) angeordnet. Die nicht vernagelte Holzkippe bestand aus kreuzweise gestapelten Stäben aus sägerauem Fichtenholz Sortierklasse S10 nach DIN 4074-1 [39] mit Abmessungen von 40 x 40 x 1000 mm³ (B x H x L). Das Masse-Luft-Verhältnis der Holzkippen entspricht somit 1:1. Außerdem erfolgte keine Konditionierung des Feuchtegehaltes der Krippen. Mittels elektronischem Feuchtemessgerät wurde an 10 Stichproben je Krippe eine durchschnittliche Holzfeuchte von ca. 12 % bestimmt. Die stichprobenartig gemessene Dichte der Fichtenstäbe ergab einen Durchschnittswert von ca. 460 kg/m³. Zur Entzündung der Krippen wurden drei Zündwannen mit jeweils 200 ml Methanol verwendet.

Die Festlegung der Leistung der Brandquelle erfolgte in Abhängigkeit der Menge an ungeschützten Holzoberflächen unter Beachtung der maximalen Förderleistung der Rauchgasreinigungsanlage. Für diese Versuchsreihe fand ab dem Erreichen dieses technisch bedingten Grenzwertes (Abbruchkriterium) der Beginn der Löschmaßnahmen durch die Brandsicherheitswache einer Berufsfeuerwehr statt. Zudem wurde bei der Dimensionierung darauf geachtet, dass die Brandleistung der Brandquelle die Leistung aus der strukturellen Brandlast nicht dominiert. Bei einer überdimensionierten Brandquelle wird der Brandverlauf maßgebend über das Brandverhalten der Brandquelle und nicht der strukturellen Brandlasten bestimmt. Entsprechend ist eine Beurteilung des Einflusses der strukturellen Brandlast auf den Brandverlauf nur schwer möglich.

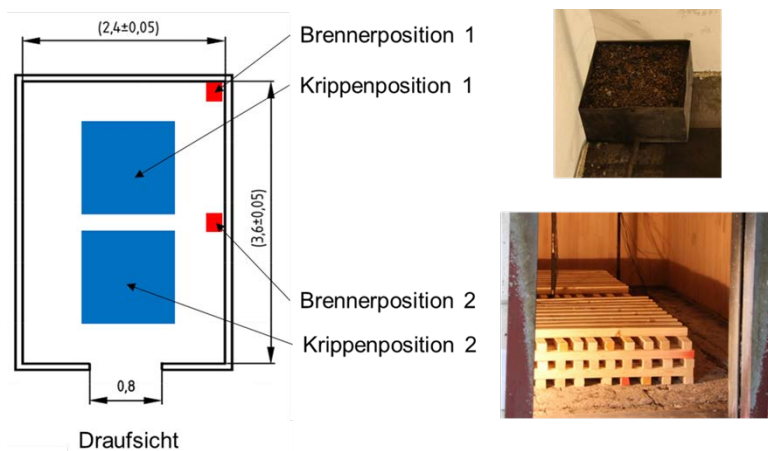


Abbildung 35: Darstellung der mobilen Brandquelle sowie der möglichen Position im Versuch

Materialien zur Ausstattung

Zur Analyse des Brandverhaltens bei ungeschützten und anfänglich geschützten Holzflächen wurde der Versuchsstand mit entsprechendem Plattenmaterial ausgekleidet. Zur Montage der Plattenmaterialien erfolgte die Anbringung einer Unterkonstruktion auf den, aus 200 mm Porenelementen bestehenden, Umfassungswänden des Versuchsstandes.

Zur vereinfachten Abbildung von ungeschützten und anfänglich geschützten Holzbauteilen wurden in der Versuchsreihe die in Tabelle 3 aufgelisteten Plattenmaterialien verwendet. Die Massivholzplatten mit Dicken von 40 mm bzw. 42 mm bilden vereinfacht ungeschützte Massivholzbauteile ab. Die Holzwerkstoffplatte in 15 mm und die Massivholzplatten in 18 mm bzw. 19 mm Dicke wurden immer durch eine Brandschutz-bekleidung in 12,5 mm Dicke zur Darstellung von anfänglich geschützte Holztafel- bzw. Massivholzbauteilen ausgeführt.

Für die Montage der 40 mm bzw. 42 mm starken Massivholzplatten wurden zur Befestigung Schnellbauschrauben (4,5 x 75) mit Teilgewinde verwendet. Je Massivholzplatte wurden 18 (3 x 6) Schrauben

in vorgebohrten Löchern zur Montage verwendet. Die Befestigung der 18 mm bzw. 19 mm Massivholzplatten, der 12,5 mm Gipsplatten Typ A bzw. Gipsfaserplatten und der 15 mm starken OSB/3-Platten erfolgte durch Schnellbauschrauben (3,9 x 45) mit Vollgewinde. Zur Montage sind pro Platte 20 (5 x 4) Schrauben verwendet worden. Die Herstellerangaben zu den Verbindungsmittelabständen wurden hier bewusst vernachlässigt, da ein Versagen der Brandschutzbekleidung und damit eine Veränderung der Branddynamik mitbetrachtet werden.

Sämtliche montagebedingte Fugen zwischen den Bekleidungsmaterialien und den Umfassungsbauteilen des Versuchsstandes sind mit Mineralwolle verfüllt, um ein Eindringen von Heißgasen in die Unterkonstruktion zu verhindern. Stoßfugen der Brandschutzbekleidung sind immer unverspachtelt ausgeführt, da in dieser Versuchsreihe ein Entzünden der geschützten Holzflächen mit untersucht wird.

Tabelle 3: Plattenförmiges Bekleidungsmaterialien der Room-Corner Versuchsreihe

Komponente	Bezeichnung	Stärke mm	Produktnorm/ Zulassung
Holzwerkstoff	OSB/3	15	DIN EN 300 [35]
	Massivholzplatte (Fichte / Tanne)	42 bzw. 18	DIN EN 13353 [36]
Vollholz	Massivholzplatte (Buche)	40 bzw. 19	
Brandschutzbekleidung	Gipsplatte Typ A	12,5	DIN EN 520 [37]
	Gipsfaserplatte	12,5	ETA-03/0050 [38]

In Abhängigkeit des untersuchten Ziels der einzelnen Raumbrandversuche erfolgte eine unterschiedliche geometrische Auskleidung sowie Bekleidung der Raumwände (Wand A – C, vgl. Abbildung 36) und der Decke mit den plattenförmigen Bekleidungsmaterialien gemäß Tabelle 4: Versuchsmatrix der Room Corner Versuchsreihe. Die Wand mit der Durchgangsöffnung sowie der Boden wurden in dieser Versuchsreihe nie bekleidet.

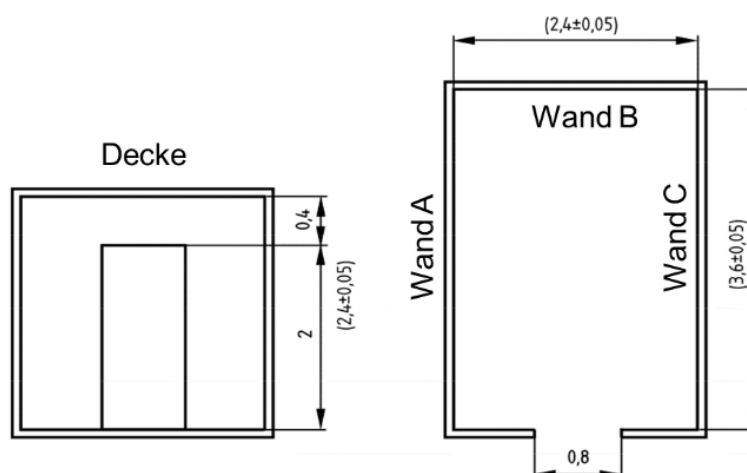
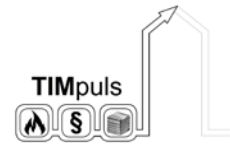


Abbildung 36: Links: Vordere Ansicht des Room-Corner Versuchstandes; rechts Grundriss des Room-Corner Versuchstandes

Die Versuchsmatrix der Versuchsreihe ist in Tabelle 4 abgebildet. Mit fortlaufender Bezeichnung nehmen die Auskleidungen des Versuchsstandes zu. Die ungeschützten Holzflächen sind farblich orange



hinterlegt, während Wände ohne Auskleidung (nicht brennbare Porenbetonwand des Versuchsstandes) grau hinterlegt und mit der Beschriftung "ohne" gekennzeichnet sind. Die Versuche RC_V21 und RC_V22 wurden zu Beginn der Versuchsreihe als Kalibrierungsversuche für die mobile Brandlast sowie als Reverenzversuch bei nicht brennbarer Bauweise herangezogen.

Die Spalte „ a_{bb} bei t_0 “ beschreibt das prozentuale Verhältnis der Fläche an ungeschützten Holzoberflächen zu Versuchsbeginn (A_{bb}) zur maximal möglichen Fläche an ungeschützten Holzoberflächen A_{TIM} . Die Berechnung dieser Fläche erfolgt über folgende Gleichung:

$$A_{TIM} = A_r - A_w - A_f$$

Wobei A_r = Fläche der Umfassungsbauteile des Brandraumes, A_w = Öffnungsfläche und A_f = Grundfläche des Brandraumes entspricht. Von der Fläche der Umfassungsbauteile werden die Flächen der Ventilationsöffnungen und der Brandraumgrundfläche abgezogen. Entsprechend gibt A_{TIM} die maximale Fläche an ungeschützten Holzoberflächen wieder.

Der in dem Versuch untersuchte primäre Einflussparameter ist über die Spalte „Einfluss“ ersichtlich. Unabhängig davon werden je Versuch versuchsübergreifende Einflussparameter mitbetrachtet.

Tabelle 4: Versuchsmatrix der Room Corner Versuchsreihe

Bezeichnung	α_{300} bei t_0	O [$m^{0,5}$]	Decke	Wand A	Wand B	Wand C	Einfluss
RC_V1	24%	0,049	Fichte (42mm)	ohne	ohne	ohne	bb Oberfläche
RC_V2	24%	0,049	Buche (40mm)	ohne	ohne	ohne	bb Oberfläche
RC_V5	38%	0,020	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	ohne	Fichte (42mm)	Fichte (42mm)	Ventilation
RC_V6	40%	0,049	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	ohne	Buche (40mm)	Buche (40mm)	bb Oberfläche
RC_V7	40%	0,049	Buche (19mm) + GF (12,5mm)	ohne	Buche (40mm)	Buche (40mm)	2 x 50 kg HK
RC_V8	24%	0,049	Fichte (42mm)	ohne	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	2 x 50 kg HK
RC_V9	24%	0,020	Buche (40mm)	ohne	Buche (19mm) + GF (12,5mm)	Buche (19mm) + GF (12,5mm)	Ventilation
RC_V10	24%	0,049	Buche (40mm)	ohne	OSB/3 (15mm) + Typ A (12,5mm)	OSB/3 (15mm) + Typ A (12,5mm)	bb Oberfläche
RC_V11	24%	0,049	Fichte (42mm)	ohne	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	1 x 50 kg HK
RC_V12	24%	0,020	Fichte (42mm)	ohne	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	Vent. + 1 x 50 kg HK
RC_V13	48%	0,049	Fichte (42mm)	Fichte (18mm) + GF (12,5mm)	Fichte (18mm) + GF (12,5mm)	Fichte (42mm)	GB mittig Wand C
RC_V14	38%	0,020	Fichte (42mm)	Fichte (18mm) + GF (12,5mm)	Fichte (42mm)	Fichte (18mm) + GF (12,5mm)	Vent. + 1 x 50 kg HK
RC_V15	40%	0,049	Buche (40mm)	OSB (15mm) + GF (12,5mm)	Buche (40mm)	Buche (19mm) + GF (12,5mm)	1 x 50 kg HK
RC_V16	40%	0,049	Fichte (42mm)	Fichte (18mm) + GF (12,5mm)	Fichte (42mm)	Fichte (18mm) + GF (12,5mm)	bb Oberfläche
RC_V17	48%	0,049	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	Fichte (42mm)	OSB/3 (15mm) + Typ A (12,5mm)	Buche (40mm)	GB mittig Wand C
RC_V18	48%	0,049	Fichte (18mm) + GF (12,5mm)	Fichte (42mm)	OSB/3 (15mm) + GF (12,5mm)	Buche (40mm)	GB mittig Wand C
RC_V19	24%	0,049	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	ohne	Fichte (18mm) + Typ A (12,5mm)	Fichte (42mm)	GB mittig Wand C
RC_V20	24%	0,049	Buche (19mm) + Typ A (12,5mm)	ohne	OSB/3 (15mm) + Typ A (12,5mm)	Fichte (42mm)	1 x 70 kg HK
RC_V21	0%	0,049	ohne	ohne	ohne	ohne	Brandlast (Kies befeuchter) Brandlast (2 x 25 kg Hobkrippe)
RC_V22	0%	0,049	ohne	ohne	ohne	ohne	

Messtechnik

Zur Erfassung der Temperaturentwicklung innerhalb des Raumes waren zwei Messbäume (Messbaum 1 und Messbaum 2) mit je sieben über die Höhe verteilten Mantelthermoelementen (3 mm Durchmesser) angeordnet, wie Abbildung 37 zeigt. Ein dritter Messbaum in der Durchgangsöffnung mit acht über die Höhe verteilten Mantelthermoelementen umfasste auch bidirektionale Sonden zur Berechnung der Strömungsraten (vgl. Abbildung 38). Mit dieser Anordnung an Messpunkten lässt sich ein hinreichendes Temperaturprofil über den Brandraum sowie Strömungsprofil über die Öffnungshöhe aufzeichnen. Zusätzlich erfolgte die Verwendung der angeschlossenen Analyseeinheit im Abzugsrohr zur Erfassung der Temperatur und Druckdifferenz, Konzentration an Sauerstoff sowie Konzentration an Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoff-dioxid. Mit den in DIN EN 14390 - Anhang D [33] enthaltenen Gleichungen lassen sich über die Messwerte der Analysestrecke der Volumenstrom im Abzugsrohr und mittels der Sauerstoffverbrauchsmethode die Wärmefreisetzungsrates (HRR) berechnen.

Im Hinblick auf die Ziele dieser Brandversuche ist die Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates über die Sauerstoffverbrauchsmethode eine bei allen Versuchen relevante Vergleichsgröße. Selbiges ist für die Temperaturen im Brandraum zu nennen, da z. B. die Flashoverkriterien oder das Nachbrandverhalten auch über die Brandraumtemperaturen zu analysieren sind.

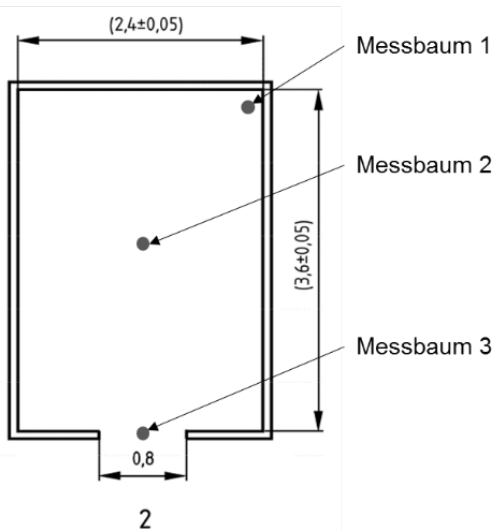


Abbildung 37: Positionen der Temperaturmessbäume im Grundriss des Room-Corner Versuchstandes



Abbildung 38: links: Bidirektionale Sonden und Temperaturmessstellen am Messbaum 3; rechts: Temperaturmessstellen am Messbaum 2

Auswertung Room Corner Tests

Einfluss der Art der strukturellen Brandlast (Holzart)

Die Auswirkung der Holzart der strukturellen Brandlast wurde in Brandversuchen RC_V1 und RC_V2 untersucht. Ein Vergleich der experimentellen Daten der Versuche RC_V1 (Fichte) und RC_V2 (Buche) zeigt den Einfluss der strukturellen Brandlastart bei identischer Zündquelle, Ventilationsöffnungen und Auskleidung (vgl. Abbildung 39). Als Brandquelle wurde der propangasbetriebene Kiesbettbrenner auf Brennerposition 1 verwendet.



Abbildung 39: Versuchsaufbau RC_V2, links: Vor dem Versuch; rechts: In der stationären Brandphase (26. Versuchsminute)

Wie Abbildung 40 zeigt, ist ein vergleichbares Entzündungsverhalten der ungeschützten Decken mit dem Erhöhen der Brennerleistung, nach einer Versuchsdauer von 10 min., von 100 kW auf 300 kW erkennbar. Die ermittelte Wärmefreisetzungsrate (HRR) weist zu diesem Zeitpunkt die Maximalwerte auf. Die im Verlauf der thermischen Zersetzung des Holzes entstehende Kohleschicht verringerte die Abbrandrate, wodurch sich der Abfall der Wärmefreisetzungsrate in den ersten 10 min. nach dem Maximalwert erklären lässt. Anschließend stellt sich ein stationäres Abbrandverhalten mit annähernd konstanter HRR ein. Bezüglich der Wärmefreisetzungsrate und Temperaturentwicklung weist RC_V2 vergleichend zu RC_V1, aufgrund der höheren Dichte der Buche (gemessen $\rho_0 = 700 \text{ kg/m}^3$) im Gegensatz zur Fichte (gemessen $\rho_0 = 450 \text{ kg/m}^3$), höhere Werte auf ($\varnothing \Delta HRR = 300 \text{ kW}$; $\varnothing \Delta T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$). Ein annähernd identisches Verhalten ist beim Abstellen der Brandquelle zur Analyse des Nachbrandverhaltens, welches hier zum Selbstverlöschen führt, ersichtlich.

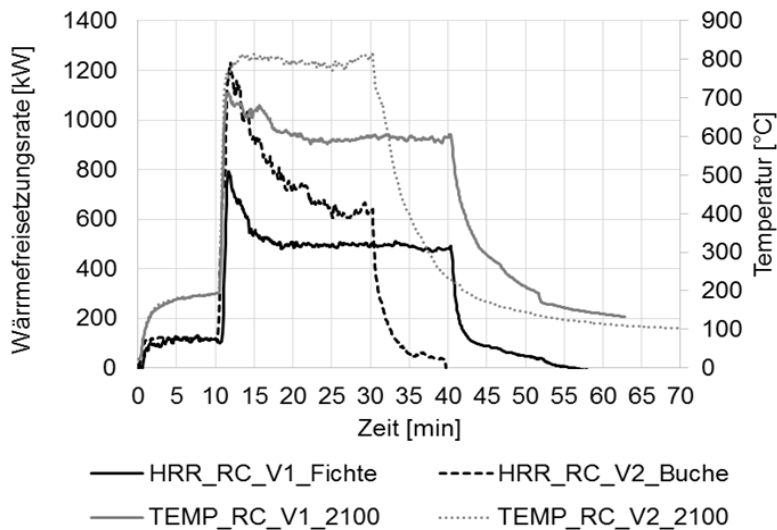


Abbildung 40: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und Wärmefreisetzungsrate (HRR) bei unterschiedlicher Art der strukturellen Brandlast

Einfluss der Ventilationsbedingung

Zur Untersuchung der Branddynamik bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen, wie in Abbildung 41 gezeigt, für identisch ausgekleidete Versuchsräume sowie Brandquelle können die folgenden Versuchsdaten herangezogen werden. An den Versuchsergebnissen von RC_V11 und RC_V12 ist der Einfluss einer reduzierten Ventilationsöffnung gut erkennbar, wie in Abbildung 42 dargestellt. Die Brandquelle in Form einer 50 kg Holzkruppe weist für den Versuch RC_V12 ($O = 0,020 \text{ m}^{0,5}$) eine verzögerte Entwicklung der Wärmefreisetzung im Vergleich zu RC_V11 ($O = 0,049 \text{ m}^{0,5}$) auf. Zudem ist der Spitzenwert der Wärmefreisetzungsrate um ca. 600 kW geringer, da eine Verkleinerung der Ventilationsöffnung zum früheren Übergang in ein ventilationsgesteuertes Brandregime führt. Während der kurzen stationären Brandphase kann für beide Raumbrandversuche eine Wärmefreisetzungsrate vergleichbarer Größenordnung festgestellt werden. In der Abkühlphase ist für RC_V12, gegenüber RC_V11, ein zeitlich längerer Verlauf der HRR ersichtlich, dieses ergibt sich aus dem ventilationsgesteuerten Brandregime.

Anhand der Temperaturentwicklung ist die Auswirkung der verkleinerten Ventilationsöffnung ebenfalls zu erkennen. Für RC_V11 erfolgte ab der 5. Versuchsminute der Eintritt des Flashovers. Anschließend folgte in der 16. Versuchsminute der Beginn der Abkühlphase, welche zunächst einen starken Abfall und ab der 25. Versuchsminute nur noch einen stetigen Abfall aufwies. Im Gegensatz dazu zeigte RC_V12 den Eintritt des Flashovers erst zur 7. Minute des Versuches. Die darauffolgende stationäre Brandphase hielt bis zur 20. Minute an. Eine stetig fallende Temperaturentwicklung (ca. 20 K/min) bis zur 50. Versuchsminute kennzeichnete die anschließend einsetzende Abkühlphase. Der deutlich unterschiedliche Verlauf der Abkühlkurven spiegelt die vorherrschenden Ventilationsverhältnisse wider.

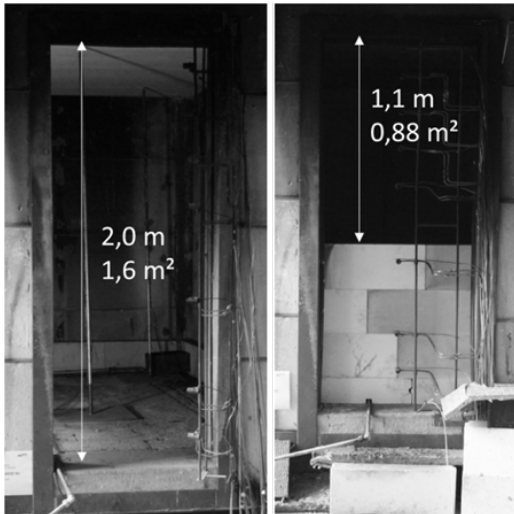


Abbildung 41: Darstellung der beiden untersuchten Ventilationsöffnungen ($O = 0,049 \text{ m}^{0,5}$ bzw. $0,020 \text{ m}^{0,5}$)

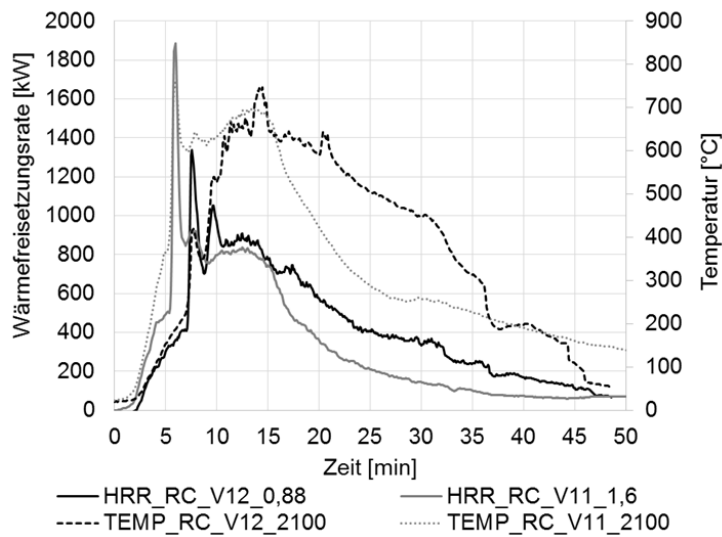


Abbildung 42: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen

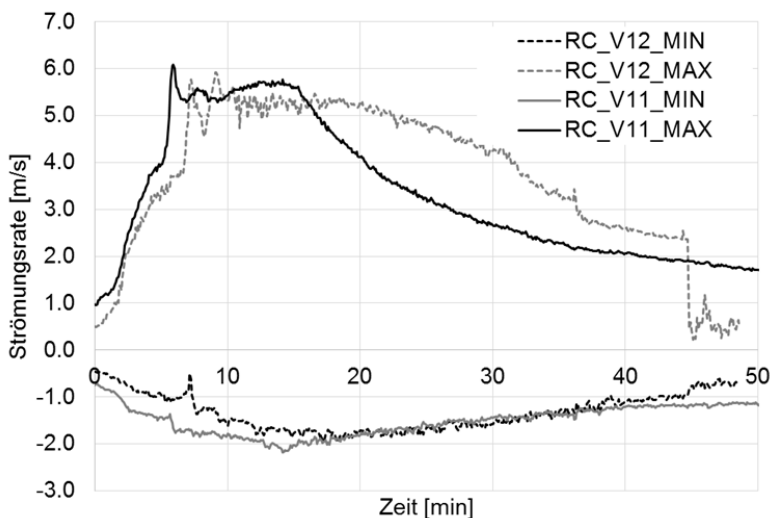


Abbildung 43: Vergleich der Strömungsraten im oberen und unteren Bereich der Öffnung (Messbaum 3) für RC_V11 ($O = 0,049 \text{ m}^{0,5}$) und RC_V12 ($O = 0,020 \text{ m}^{0,5}$)

Mit der Aufzeichnung der Differenzdrücke und der lokalen Temperaturen konnte ein Strömungsprofil über die Öffnungshöhe berechnet werden. Es zeigt sich in Abbildung 43, dass unabhängig der Ventilationsöffnung die Strömungsraten in etwa dieselbe Größenordnung (- 2,0 bis 6,0 m/s) aufweisen. Dieses lässt auf einen unterschiedlichen Volumenstrom und damit eine unterschiedliche Menge an ein- und ausströmenden Kalt- bzw. Heißgasen schließen. Für die minimalen Strömungsraten ist zu beachten, dass diese in RC_V11 auf einer Höhe von 220 mm über dem Boden und für RC_V12 auf einer Höhe von 1220 mm über dem Boden (320 mm oberhalb der Brüstung) gemessen wurde, siehe Abbildung 41.

In den visuellen Beobachtungen während der Versuchsdurchführung wurde im Nachbrandverhalten ein Verlöschen der Flammen an der ungeschützten Holzdecke beobachtet (RC_V11 ca. 17. Minute; RC_V12 ca. 25. Minute) sofern die Holzkrippe ca. 60 – 70 % der Masse umgesetzt hatte sowie die Raumtemperatur unterhalb 500 °C gesunken war.

Ein Versagen der Brandschutzbekleidung mit dem Entzünden der geschützten Holzoberfläche und/oder Abfallen der Bekleidung wurde bei diesen Raumbrandversuchen (RC_V11 und RC_V12) nicht beobachtet. Ein annähernd identisches Verhalten liegt für die Versuche RC_V14 und RC_V15 vor, welches den hier dargestellten Einfluss der Ventilationsbedingung bestätigt.

Einfluss auf den Flashoverzeitpunkt

Für den Flashoverzeitpunkt wurden alle durchgeführten Brandversuche bezüglich des gesetzten Kriteriums ‚Raumtemperatur über 550 °C‘ und ‚Brandübersprung auf die strukturelle Brandlast‘ überprüft und die entsprechende Versuchsminute (Zeit ab Beginn der Beflammung) analysiert. Die Beurteilungskriterien für den Flashoverzeitpunkt weisen eine Übereinstimmung zu den Literaturangaben aus Kapitel III 3.1.1.4 gemäß den Flashover-Modellen auf.

Mit zunehmender Menge ungeschützter Holzoberflächen und in Abhängigkeit der Leistung der Brandquelle verkürzt sich die Dauer bis zum Eintritt des Flashovers. Die geometrische Anordnung der ungeschützten Holzoberflächen als Decken- oder Wandfläche bildet in Bezug auf die Zeit bis zum Eintritt des Flashovers in dieser Versuchsreihe nicht den primären Einflussfaktor. Anhand der Dauer bis zum Eintritt des Flashovers (siehe Abbildung 40, Abbildung 42 und Abbildung 44) wird deutlich, dass die Leistung der Brandquelle einen massiven Einfluss auf den Flashoverzeitpunkt bzw. den Brandübersprung auf die strukturellen Brandlasten besitzt. Des Weiteren sind der Raumgröße und damit dem Abstand der Brandquelle zur strukturellen Brandlast sowie der brennbaren Oberflächen zueinander Einflüsse auf den Brandübersprung zuzuordnen. Die hier dargestellten Versuchsergebnisse zeigen den Eintritt des Flashovers zwischen der 5. und 11. Versuchsminute, welches in etwa der Bandbreite des Flashoverzeitpunktes der Versuchsreihe entspricht. Bei Flashoverzeiten über 10 Minuten besteht die Brandquelle immer aus dem Kiesbettbrenner, dessen Leistung gemäß dem Versuchsablauf nach 10 Minuten von 100 kW auf 300 kW erhöht wurde. Bei der Verwendung der Holzkrippe erfolgte der Flashover im Zeitbereich zwischen drei und sieben Minuten in Abhängigkeit des Versuchsaufbaus. Dieses verdeutlicht zudem die Abhängigkeit des Flashoverzeitpunktes von der Leistung des Stützfeuers.

Bei Untersuchungen zum Eintritt des zweiten Flashovers bzw. erneuten Brandübersprung auf die strukturelle Brandlast (siehe Abbildung 44) wurde nach dem Eintritt des ersten Flashovers beim Überschreiten des Abbruchkriteriums ein Löschvorgang des Vollbrandes eingeleitet bzw. die Brandquelle abgestellt. Die Brandquelle selber wurde dabei nicht gelöscht bzw. mit einer Stützflamme von 50 kW aufrechterhalten. Die jeweilige Ausstattung des Versuchsraumes ist aus Tabelle 4 zu entnehmen. Für RC_V7 mit einer Holzkrippe als Brandquelle erfolgte der zweite Flashover bereits nach zwei bis drei Minuten. In den Versuchen RC_V13 und RC_V16 führte das Reduzieren der Brandquelle auf die Stützflamme (300 kW auf 50 kW) kurz nach dem ersten Flashover zum selbstständigen Verlöschen der Flammen. Mit der erneuten Leistungssteigerung auf 300 kW der Brandquelle folgte nach ca. zwei Minuten der Eintritt des zweiten Flashover. Nach dem zweiten Flashover mit dem Erreichen des Abbruchkriteriums folgte für die drei Versuche ein Löschvorgang durch die Brandsicherheitswache, bei dem der Brand vollständig gelöscht wurde.

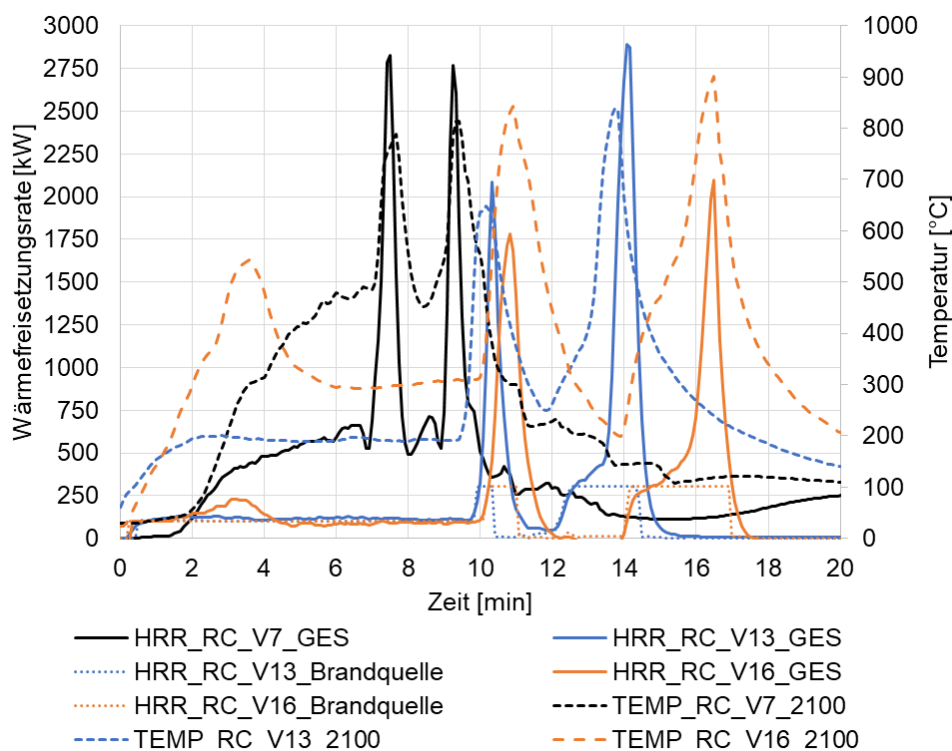


Abbildung 44: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) für den Eintritt des zweiten Flashover

Anhand der Bedingungen bis zum Eintritt des Flashovers ist deutlich, dass die Leistung der Brandquelle einen massiven Einfluss auf den Flashoverzeitpunkt bzw. den Brandübersprung auf die strukturelle Brandlast besitzt. Des Weiteren lassen sich die Raumgröße und damit der Abstand der Brandquelle zu der strukturellen Brandlast sowie der brennbaren Oberflächen zueinander ebenfalls relevante Parameter auf den Brandübersprung benennen.

Einfluss der Brandquelle

Die Brandquelle besitzt einen Einfluss auf die Dauer bis zum Brandübersprung von der mobilen Brandquelle auf die strukturelle Brandlast. Ab einer Wärmefreisetzungsrate größer als 500 kW bzw. Raumtemperatur oberhalb 550 °C erfolgte in diesen Versuchen ein Überspringen des Brandes von der Brandquelle auf die strukturelle Brandlast.

Die gemessenen Temperaturverläufe in Abbildung 45 zeigen maximale Temperaturen in einer vergleichbaren Größenordnung. Daraus lässt sich ableiten, dass bei identischer Menge an struktureller Brandlast die Brandquelle im Mittel eine vergleichbare Leistung (Wärmefreisetzung) abgegeben hat (Kiesbettbrenner = 300 kW; 1 x 50 kg Holzkrippe = 300 kW nach Kalibrierversuch). In Versuch RC_V10 wurde die Leistung des Gasbrenners nach einer Beflammungsdauer von 10 Minuten mit 100 kW auf eine Leistung von 300 kW erhöht. Die zugrundeliegenden Holzkrippen der Versuche RC_V8 (2 x 50 kg)

und RC_V11 (1 x 50 kg) weisen eine vergleichbare Temperaturentwicklung auf, die sich nur durch einen geringfügigen Zeitversatz unterscheidet. Im Versuch RC_V8 erfolgte nur die Zündung der Holzkrippe auf Krippenposition 1. Die Videodokumentation von RC_V8 zeigte, dass bei Versuchsabbruch die Holzkrippen maximal zu 50% am Brand beteiligt waren. Hierdurch ist eine Vergleichbarkeit der Brandquelle sowie der freigesetzten Wärme zwischen RC_V8 und RC_V11 gegeben.

Infolge einer unbemerkten Verstopfung und Verdrehung der Entnahmesonde im Abzugsrohr aufgrund eines vorangegangenen Versuches konnte für den Versuch RC_V8 keine Wärmefreisetzungsrate bestimmt werden.

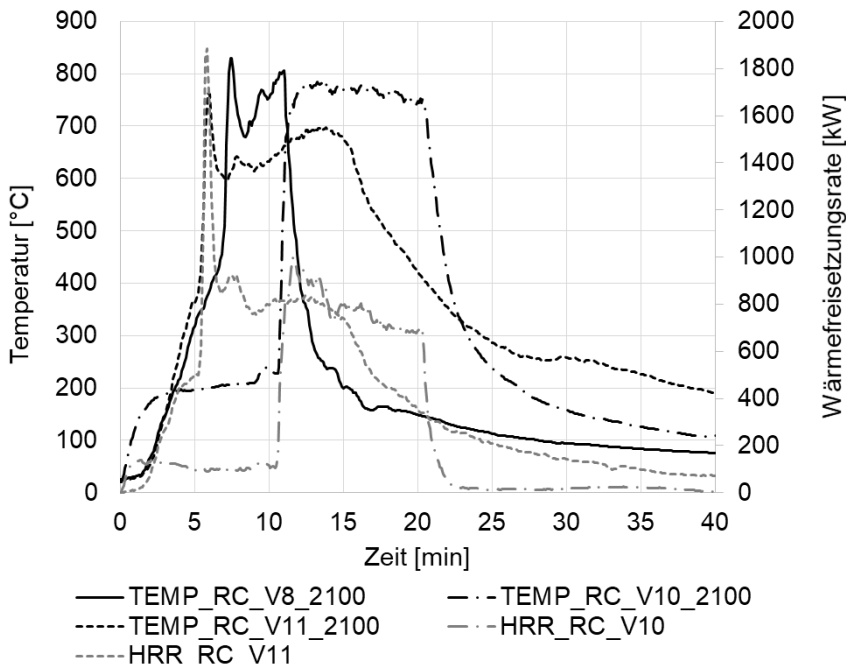


Abbildung 45: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) bei unterschiedlichen Brandquellen

Der Einfluss der Brandquelle zeigt sich neben der per se freigegebenen Brandleistung respektive der Temperatur primär in der Brandentwicklung bis zum Vollbrand. Des Weiteren geht von der Intensität der Brandquelle ein Einfluss auf den Brandübersprung zur strukturellen Brandlast aus. Zudem ist anzumerken, dass die Leistung der Brandquelle in Versuchen mit nur einer ungeschützten Holzfläche in etwa identisch der Leistung der mobilen Brandlast ist. Bei Versuchen mit mehreren ungeschützten Holzflächen dominieren die Brandleistungen der strukturellen Brandlast den Leistungsanteil der Brandquelle. Im Zuge der Untersuchungen zum Selbstverlöschen besitzt in diesen Versuchen die Brandquelle als Stützfeuer eine wesentliche Komponente sofern die Versuche mit nur einer ungeschützten Holzfläche ausgekleidet waren.

Löschmaßnahmen und Löschmittelbedarf

Brandversuche, die das technisch bedingte Abbruchkriterium einer Wärmefreisetzungsrate von mehr als 2000 kW überschritten haben, wurden durch Löschmaßnahmen beendet. Die Durchführung der Löschmaßnahmen erfolgte durch eine Berufsfeuerwehr. Je Versuch wurde ein Löschfahrzeug mit 6 Einsatzkräften als Brandsicherheitswache eingesetzt. Nachfolgend wird für die Brandversuche, welche Löschmaßnahmen erforderten, der durchschnittlich gemessene Löschmittelbedarf inkl. der verwendeten Sprühstöße bis der Flashover abgelöscht war aufgeführt. Ein zusätzlicher Löschmittelbedarf bei Löschmaßnahmen für die mobile Brandlast (Holzkrippen) wird hier nicht genauer betrachtet, da nach ablöschen des Flashover die Gefahr einer Brandausbreitung deutlich reduziert war.



Abbildung 46: Brandraum mit nur einer brennbaren Wand im Vollbrand zu Minute 11 (links) und selbstverloschener Brand zu Minute 38 (rechts) im Room-Corner-Test

In den Versuchen RC_V5, RC_V6, RC_V7 und RC_16 wurde an den Löschwasserschlauch der Berufsfeuerwehr (BF) ein Durchflussmessgerät angeschlossen, welches die Wassermenge in Liter je Sekunde erfasste. Die aufgezeichneten Daten zum Löschwasserdurchfluss (vgl. Abbildung 47 bis Abbildung 50) wurden verwendet, um die Löscharbeit der Holzkonstruktionen in Nutzungseinheiten und Brandabschnitten äquivalent zum nichtbrennbaren Massivbau nachzuweisen.

Wenn in diesen Versuchen nur eine Wandfläche oder die Decke mit unbekleideter Holzoberfläche ausgeführt wurde, ist nach dem Aufbrauchen der mobilen Brandlast ein Abkühlen und Selbstverlöschen der Konstruktion zu beobachten. Wenn die Versuchsräume mit zwei oder mehr brennbaren Oberflächen ausgeführt werden, beispielsweise eine Wand und die Decke, kann ein Selbstverlöschen unmittelbar nach dem Aufbrauchen der mobilen Brandlast nicht garantiert werden.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Löscharbeiten und des Löschmittelbedarfs in den Room-Corner-Tests

Bezeichnung	Durchführung der Löscharbeiten	Löschwassermengen
RC_V1	iBMB	-nicht gemessen- Selbstverlöschen des Flammenbrands mit wenigen Nachlöscharbeiten
RC_V2	iBMB	-nicht gemessen- Selbstverlöschen des Flammenbrands mit wenigen Nachlöscharbeiten
RC_V5	BF	9,35 Liter in ca. 5 s
RC_V6	BF	5,20 Liter in ca. 5 s
RC_V7	BF	9,40 Liter in ca. 20 s
RC_V8	BF	-nicht gemessen- Versuchsabbruch
RC_V9	iBMB	-nicht gemessen- Selbstverlöschen des Flammenbrands nach Ausschalten des Kiesbettbrenners, mit wenigen Nachlöscharbeiten
RC_V10	iBMB	-nicht gemessen- Selbstverlöschen des Flammenbrands nach Ausschalten des Kiesbettbrenners, mit wenigen Nachlöscharbeiten

Bezeichnung	Durchführung der Löscharbeiten	Löschwassermengen
RC_V11	-	Selbstverlöschen
RC_V12	iBMB	-nicht gemessen- Bekleidung versagte lokal, minimale präventive Löscharbeiten
RC_V13	BF	-nicht gemessen-
RC_V14	BF	-nicht gemessen-
RC_V15	BF	-nicht gemessen-
RC_V16	BF	15,07 Liter in ca. 30 s
RC_V17	BF	-nicht gemessen-
RC_V18	BF	-nicht gemessen-
RC_V19	BF	-nicht gemessen- Deckenbekleidung versagt
RC_V20	BF	-nicht gemessen- Deckenbekleidung versagt

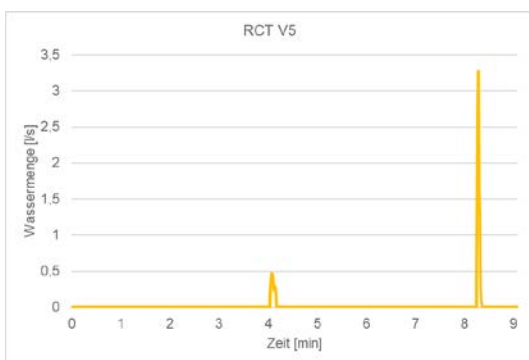


Abbildung 47: Löschwasserverbrauch in RC_V5

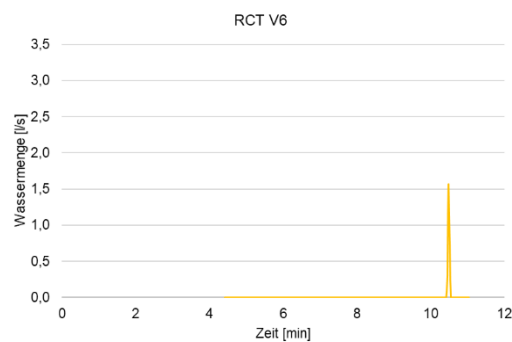


Abbildung 48: Löschwasserverbrauch in RC_V6

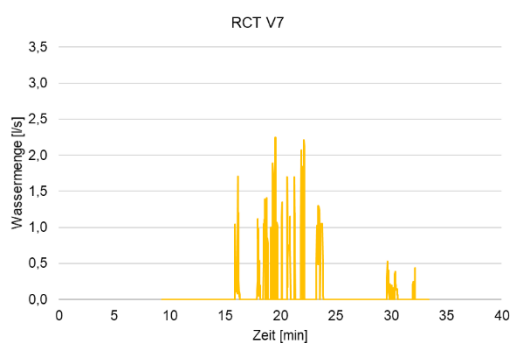


Abbildung 49: Löschwasserverbrauch in RC_V7

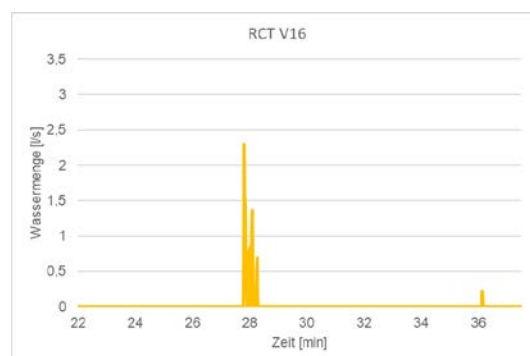


Abbildung 50: Löschwasserverbrauch in RC_V16

Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass im Durchschnitt für den Löschvorgang zum Ablöschen des Flashovers nur bis zu 15 Liter Löschmittel (Wasser) benötigt wurde. Die Anzahl der Sprühstöße richtet sich stark an der Erfahrung der löschenden Einsatzkraft. In Abhängigkeit der Brandraumgröße und der kontrollierten Randbedingungen zeigt sich eine sehr schnelle und hohe Leistungsfähigkeit der Löscharbeiten mit einem Hohlstrahlrohr.

Nachbrandverhalten und Selbstverlöschen

Ein Selbstverlöschen der Flammenbrände während der Abkühlphase der Versuche konnte nur beobachtet werden sofern die Brandquelle abgestellt (Kiesbettbrenner) oder aufgezehrt wurde (ca. 30 % Brandleistung der Holzkrippe verbleibend), wie Abbildung 46 beispielhaft zeigt. Auffällig ist, dass alle Brandversuche mit einer brennbaren Holzoberfläche ein Selbstverlöschen der Flammenbrände mit dem Abstellen bzw. Verzehren der mobilen Brandlast zeigten. Für die Versuche RC_V13 (Decke + Wand C) und RC_V16 (Decke + Wand B) konnte ein Selbstverlöschen bei einem höheren Anteil an brennbarer Holzoberfläche durch Abschalten des Kiesbettbrenners beobachtet werden. Dagegen zeigten die Versuche RC_V6 (Wand B und Wand C), RC_V17 und RC_V18 (jeweils Wand A und Wand C) beim Abschalten des Kiesbettbrenners kein Selbstverlöschen. Dieses kann auf die orthogonale bzw. gegenüberliegende Anordnung der brennbaren Holzoberflächen und die damit einhergehende Wärmestrahlung zurückgeführt werden. Durch die von den brennenden Oberflächen ausgehende Wärmestrahlung und den geringen Abstand der brennenden Oberflächen zueinander führt der einwirkende Wärmestrom zu einer anhaltenden Pyrolyse/Verbrennung der Holzoberflächen.

Im Versuch RC_V11 (Decke) verlosch der Flammebrand selbstständig und die Brandraumtemperatur verringerten sich in der Abkühlphase im Laufe von ca. 45 Minuten auf unter 100 °C.

Einfluss des Versagens der Brandschutzbekleidung auf den Brandverlauf

Ein Vergleich der experimentellen Daten der Versuche RC_V19 und RC_V20 zeigt den Einfluss eines thermischen und/oder mechanischen Versagens der Brandschutzbekleidung bei identischer Ventilationsöffnungen und Auskleidung jedoch unterschiedlicher Brandquelle. Die Messdaten in Abbildung 51 zeigen, dass nach dem ersten Peak in der Wärmefreisetzungsrate (V19 - 11. Versuchsminute; V20 - 3. Versuchsminute), welcher den Brandübersprung auf die strukturelle Brandlast (Flashover) darstellt, ein signifikantes Verringern der Wärmefreisetzungsrate folgt. Dieser Abfall entsteht durch die Ausbildung der Kohleschicht, die eine Reduktion der Abbrandrate zur Folge hat. Mit dem thermischen und/oder mechanischen Versagen der Brandschutzbekleidung wird die anfänglich geschützte Holzoberfläche freigelegt, welches durch den erneuten Anstieg der Wärmefreisetzungsrate (V19 - 34. Versuchsminute; V20 - 5. Versuchsminute) gekennzeichnet wird.

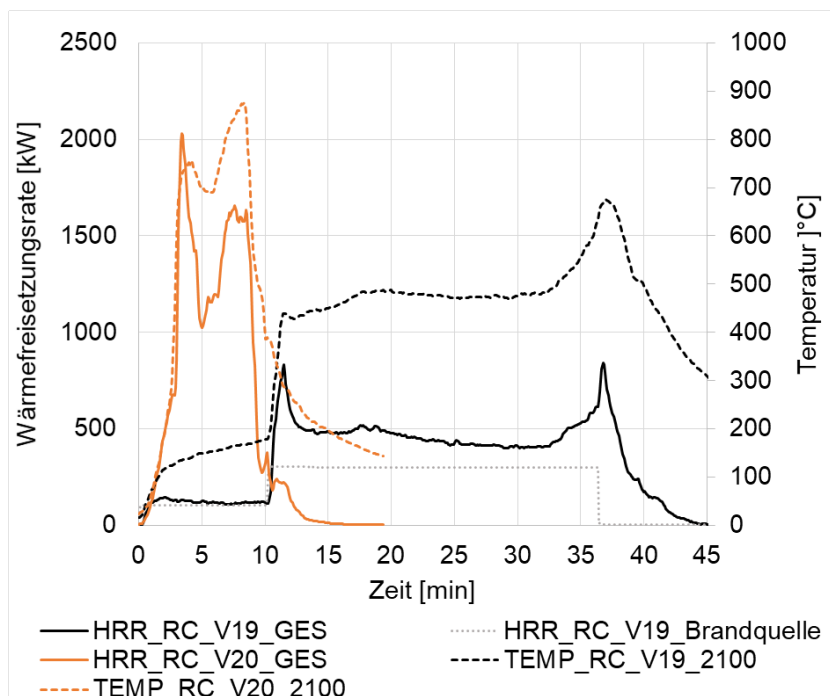


Abbildung 51: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) beim Versagen der Brandschutzbekleidung

In RC_V19 konnte nach dem Flashover, welcher auch die Umsetzung der Kartonlage der Gipsplatten Typ A an der Decke sowie im oberen Viertel der Wand B zur Folge hatte, eine stetig steigende Durchbiegung zwischen den bewusst groß gewählten Verbindungsmittelabständen der Gipsplatten an der Decke beobachtet werden. Aufgrund der Durchbiegung konnten Heißgase zwischen den Stoßfugen in

den entstehenden Hohlraum zwischen Brandschutzbekleidung und Trägerplatte ansammeln. Die Ansammlung der Heißgase führte zu einer Pyrolyse der Trägerplatte, wodurch sich die brennbaren Pyrolysegase entzündeten und Flammen aus den Stoßfugen austreten. Zeitgleich konnte ein Aufzehren der Kartonlage der Gipsplatte auf der brandabgewandten Seite angenommen werden. Die zunehmende Durchbiegung sowie die thermische Beanspruchung im Hohlraum führten zu einer steigenden Rissbildung, woraus in der 35. Versuchsminute ein Abfallen eines größeren Teils (ca. $\frac{1}{2}$ Plattengröße) von der Decke resultierte. Nach ca. einer Minute beteiligte sich die freigelegte Holzfläche am Brandgeschehen. Dementsprechend stieg die Wärmefreisetzungsrate erneut an. Mit dem Abstellen der Brandquelle in der 37. Versuchsminute zeigte sich ein Selbstverlöschen der brennbaren Holzflächen.

An dem Verlauf der Wärmefreisetzungsrate des Versuches RC_V20 kann ein Brandübersprung auf die strukturelle Brandlast zur 3. Versuchsminute festgestellt werden. Der eintretende Flashover kennzeichnet auch die maximale Wärmefreisetzungsrate. Der anschließende starke Abfall der Wärmefreisetzungsrate resultierte zum einen aus dem Grund, dass die Kartonlage der Gipsplatten Typ A an der Decke sowie im oberen Wandviertel umgesetzt wurde und zum anderen an der Reduktion der Abbrandrate durch die Ausbildung der Kohleschicht der ungeschützten Holzfläche. In der 6. Versuchsminute fiel, ohne Vorankündigung, eine $\frac{1}{2}$ Gipsplatte im vorderen Raumbereich (nahe der Öffnung) von der Decke. Nach ca. einer Minute beteiligte sich die freigelegte Holzfläche am Brandgeschehen. Dementsprechend steigt die Wärmefreisetzungsrate erneut an, bis der Versuch in der 8. Versuchsminute aufgrund der ansteigenden Wärmefreisetzungsrate abgebrochen wurde und Löschmaßnahmen eingeleitet wurden.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass bei einem Versagen der Brandschutzbekleidung die anschließend freiliegenden Holzflächen sich am Brand beteiligen. Die Wärmefreisetzungsrate steigt durch den zusätzlichen Beitrag der freigelegten Holzflächen entsprechend an.

Zusammenfassung

Aus den durchgeführten Room Corner Versuchen ist ersichtlich, dass ein Vorhandensein von struktureller Brandlast eine Änderung der Brandraumdynamik bei sonst ausschließlich mobiler Brandlast zur Folge hat. Mit den experimentellen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich durch die strukturelle Brandlast eine kürzere Brandentwicklungsdauer bis zum Eintritt des Flashovers und eine Steigerung der Wärmefreisetzungsrate ergibt. Zudem wird durch die zusätzliche strukturelle Brandlast ein ventilations-gesteuertes Brandregime zu einem früheren Zeitpunkt im Brandverlauf erreicht, welches eine geringere maximale Wärmefreisetzungsrate aber eine längere Branddauer zur Folge hat. Des Weiteren zeigt sich durch die strukturelle Brandlast ein Einfluss auf die Abkühlphase, welche einer Verlängerung dieser Phase bewirkte. In der Versuchsreihe konnte ein Selbstverlöschen immer beim Verlöschen der mobilen Brandlast (Stützfeuer) zuverlässig beobachtet werden, sofern nur die Decke oder eine Wand als ungeschützte Holzoberfläche ausgeführt wurde. Durchgeführte Löschmaßnahmen führten, beim Einsatz einer minimalen Löschmittelmenge, mit 3 – 4 Sprühstößen schnell zum Ablöschen des Vollbrandes. Der durchschnittliche Löschmittelbedarf zum Ablöschen des Vollbrandes wurde dabei mit < 10 l gemessen. Dementsprechend zeigte sich ein, bezogen auf den Brandraum dieser Brandversuche, beherrschbares Brandszenario. Die hier erlangten Erkenntnisse stimmen in der grundlegenden Branddynamik mit den Erkenntnissen aus z. B. [40], [41], [32], [75], [123] und [127] überein. Es bleibt anzumerken, dass die Brandversuche in den angegebenen Quellen zum Teil einen anderen Fokus hatten und somit sich teilweise Unterschiede ergeben.

3.1.2.2 Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung und parametrischer Brandbeanspruchung

Aufbau und Umsetzung der durchgeführten Untersuchungen

Insgesamt wurden 42 Versuchskörper aus neun verschiedenen Materialien im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [54] unter Einbezug der messtechnischen Randbedingungen nach DIN EN 1363-1 [66] untersucht. Es wurde sowohl der einseitige als auch der mehrseitige Abbrand betrachtet. Die jeweiligen Rohdichten und Holzfeuchten sind in Tabelle 6 bis Tabelle 10 aufgeführt. Siehe hierzu auch Anhang IV.4.

Prüfkörper für den eindimensionalen Abbrand

Die Prüfkörper wiesen Abmessungen von $L \times B = 545 \text{ mm} \times 545 \text{ mm}$ auf. Die Dicke der Versuchskörper richtete sich nach dem jeweiligen untersuchten Material, bzw. den verfügbaren Materialdicken und lag zwischen 104 und 200 mm.

Jeder Prüfkörper setzt sich aus zwei Hälften zusammen. Die isolierten Drahtthermoelemente vom Typ K ($2 \times 0,5 \text{ mm}$) wurden in den unteren Teil des Prüfkörpers eingebracht, sodass die Messstellen mittig in der Versuchsfläche lagen, vgl. Abbildung 52. Es wurden in jedem Versuchskörper zwei Messbäume angeordnet. Die Platzierung der Thermoelemente erfolgte vorzugsweise in 6 mm Abständen über die Dicke der Prüfkörper in Bohrungen ($\varnothing 2 \text{ mm}$) parallel zur Isotherme. Die Verklebung der Versuchskörper erfolgte unter Verwendung eines Phenol-Resorcin-Formaldehydklebers. An den Schmalseiten der Prüfkörper wurden Gipsfaserplatten umlaufend angebracht, um seitliche Strömungswege und Durchbrände zu vermeiden [67].

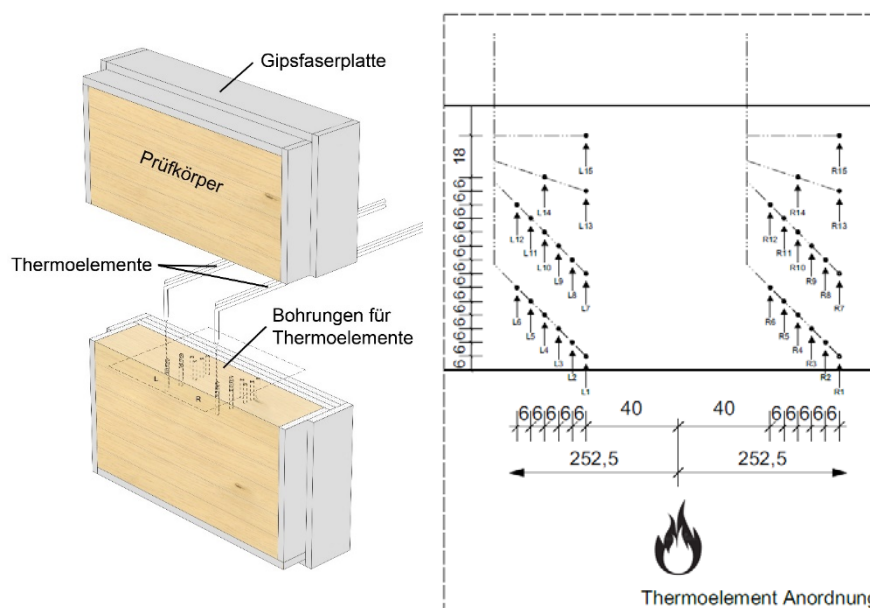


Abbildung 52 Darstellung der Prüfkörper (Sprengisometrie) für eindimensionale Brandbeanspruchung und Anordnung der Thermoelemente

Prüfkörper für den mehrdimensionalen Abbrand

Die Probekörper für die dreiseitige Brandbeanspruchung wurden auf einer Trägerplatte befestigt und ragten in den Brandraum des Prüfofens hinein, vgl. Abbildung 53. Die Maße dieser Trägerkonstruktion entsprach der Geometrie der Versuchskörper zur Untersuchung des eindimensionalen Abbrandes. Die Abmessungen der dreiseitig beanspruchten Versuchskörper betragen $L \times B \times T$ $420 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$.

Auch bei diesen Probekörpern erfolgt die Ermittlung der Temperatur im Versuchskörper mithilfe von Drahtthermoelementen des Typs K. Die Messfühler wurden in 2 mm Bohrungen eingebracht, die parallel zur Isotherme verliefen. Die Messstellen lagen dabei in der Mitte der Versuchskörperlänge. Auch für diese Art der Versuchskörper wurden zwei Stränge mit entsprechenden Messpunkten in unterschiedlichen Tiefen vorgesehen, vgl. Abbildung 53. Diese liefen im 45° Winkel diagonal in 6 mm Abständen von

den äußeren Ecken in Richtung Querschnittsmitte. Die genauen Positionen der Thermolemente werden in Abbildung 53 veranschaulicht.

Die Verklebung der Versuchskörper erfolgte unter Verwendung eines Phenol-Resorcin-Formaldehydklebers. Die Befestigung der Versuchskörper auf der Trägerkonstruktion erfolgte durch Verschraubung, ausgehend von der brandabgewandten Seite der Rückwand. Die Hirnholzflächen wurden während des Brandversuches durch Keramikwolle geschützt [67].

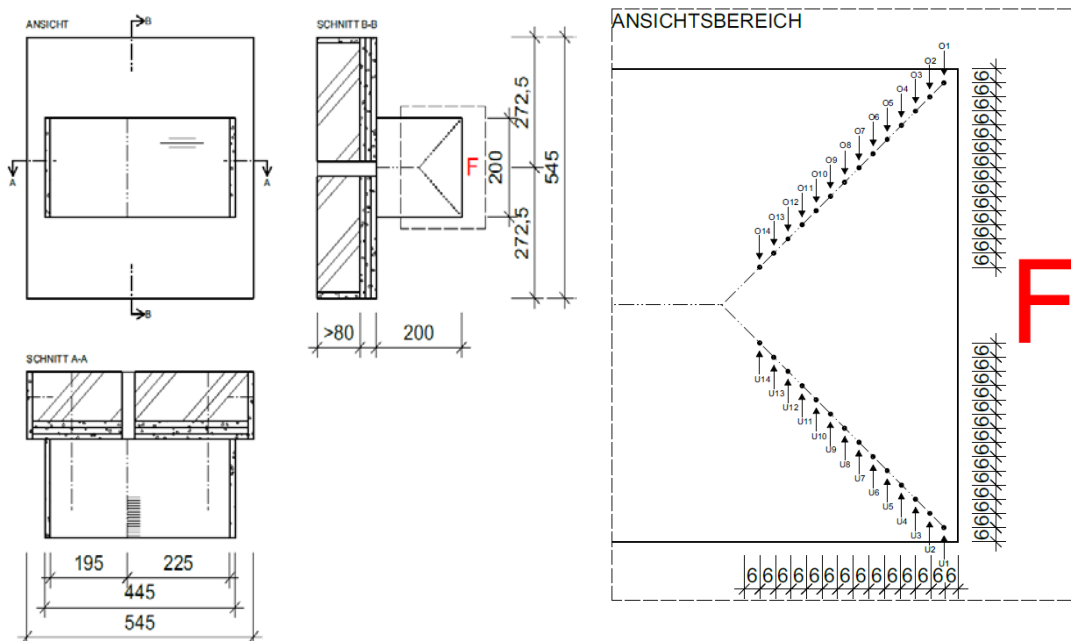


Abbildung 53 Darstellung der Prüfkörper für dreiseitige Brandbeanspruchung und Anordnung der Thermolemente (F= die drei dem Feuer zugewandten Seiten)

Die Prüfkörper für den eindimensionalen sowie den mehrdimensionalen Abbrand wurden im Brandofen mit den in Abbildung 54 dargestellten drei Brandkurven beansprucht, die als repräsentative Einwirksszenarien erarbeitet wurden [68]. Für die ETK [67] wurde eine Branddauer von 90 min gewählt.

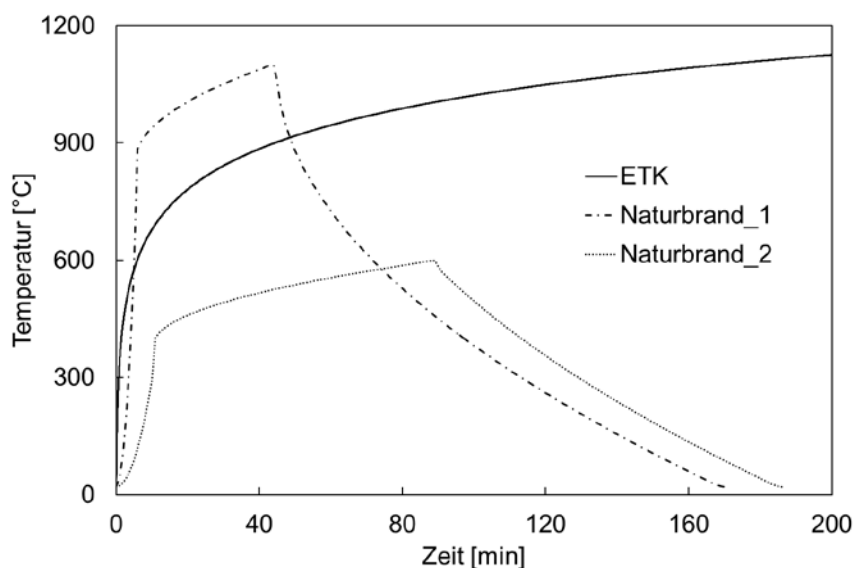


Abbildung 54 Die drei Soll-Brandofen-Temperaturverläufe der Brandversuche

Zur Messung der Temperaturen im Brandofen wurde je ein Platten- (PL) sowie ein Mantel-Thermometer (MT) gemäß DIN EN 1363-1 [66] bzw. DIN 4102-8 [54] vor den Prüfkörpern im Brandraum angeordnet,

vgl. Abbildung 55. Zusätzlich diente ein weiteres Mantelthermoelement (\varnothing 1 mm) zur Erfassung der Temperaturen direkt auf der brandbeanspruchten Oberfläche [67].

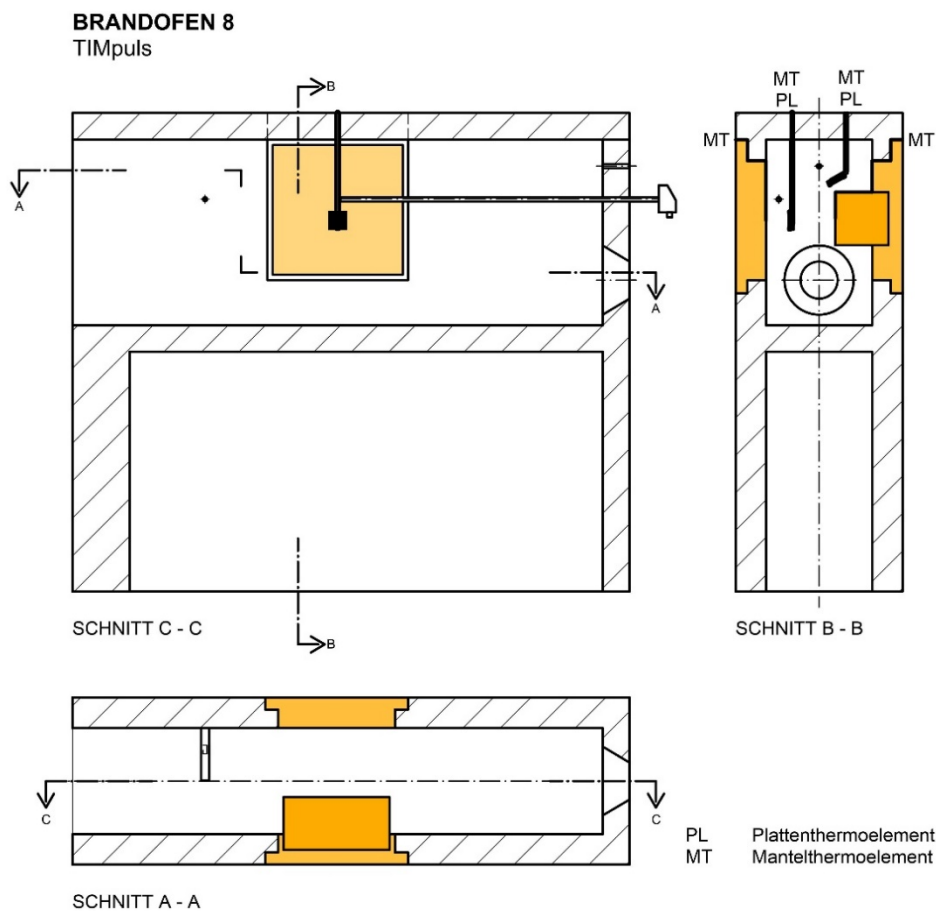


Abbildung 55 Ansicht und Schnitt Brandfengeometrie mit Position der Thermometer

Die Gaskonzentration und der Druck wurden im Brandraum gemessen. Alle Restquerschnitte wurden nach dem Versuchsende messtechnisch und fotografisch erfasst sowie einem Oberflächen-Scanning, zur flächigen Bestimmung der Restquerschnitte unterzogen, vgl. Abbildung 56.



Abbildung 56 Prüfkörper Vollholz Eiche (v.l.n.r.) Holzkohleschicht, gebürstet, 3D-Scan

Versuchsergebnisse

Eindimensionale ETK-Beanspruchung

Durch die Thermolemente in den Prüfkörpern kann der Abbrand über die Versuchszeit ausgewertet werden. Als Lage der Abbrandgrenze wurde bei allen Versuchen die Position der 300°C – Isotherme

gemäß DIN EN 1995-1-2 [42] angenommen. Abbildung 57 und Abbildung 58 stellen den Temperaturverlauf (Mittelwert aus dem rechten und linken Messstrang) im Prüfkörper zur 30. und 90. Minute dar. Zwischen rechten und linken Messstrang traten nur geringfügige Abweichungen auf.

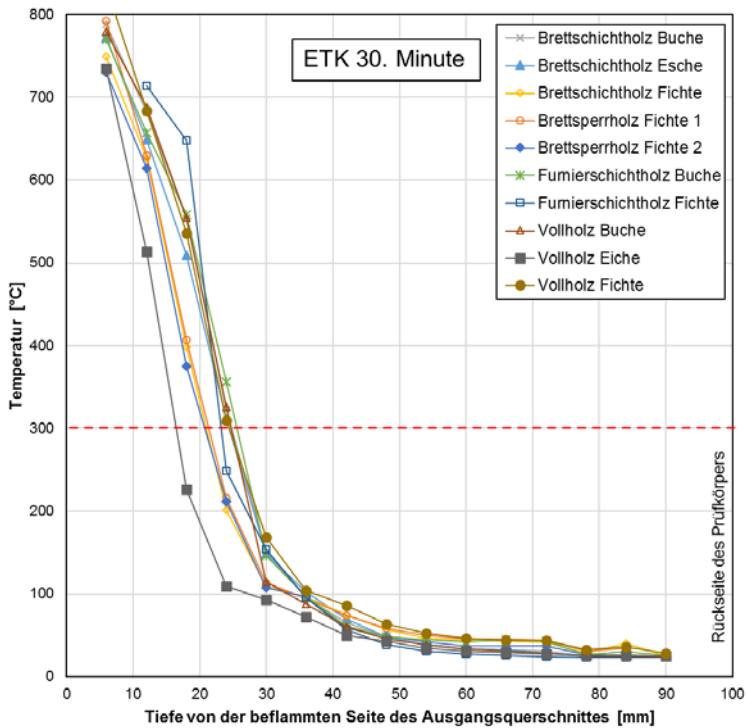


Abbildung 57 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler ETK-Beanspruchung zur 30. Minute

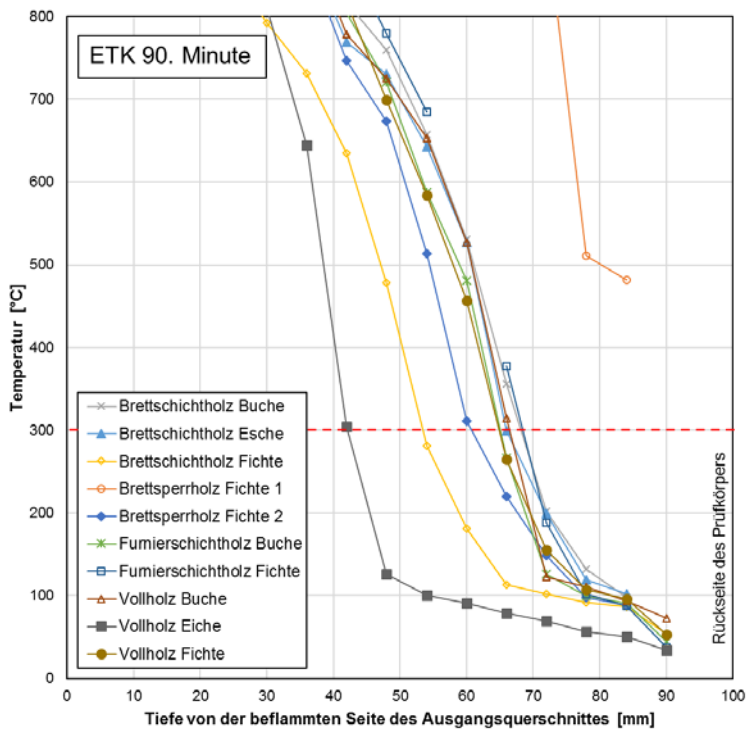


Abbildung 58 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler ETK-Beanspruchung zur 90. Minute

Mit Blick auf die 300°C – Isotherme und die daraus ermittelten Abbrandraten in Tabelle 6 wird deutlich, dass die Abbrandrate keine zeitlich konstante Größe ist und mit zunehmender Beanspruchungsdauer für Vollholz, Brettschichtholz und Furnierschichtholz abnahm. Die maßgebenden Werte für die Abbrandrate ergaben sich somit in der Regel nach 30 Minuten. Anders verhält sich das für Bauteile, bei denen infolge des konstruktiven Aufbaus ein plötzlicher Verlust der anhaftenden Holzkohleschicht (Delamination) und damit einhergehend eine Zunahme der Abbrandrate auftreten kann. Aus diesem Grund werden die ermittelten Werte für Brettspertholz im Kleinprüfstand, der dieses Phänomen nicht berücksichtigt, in diesem Bericht nicht weiter dargestellt.

Vergleicht man die Holzarten untereinander lässt sich festhalten, dass Vollholz (VH) Eiche die geringste Abbrandrate aufweist, gefolgt von Brettschichtholz (BSH) aus Fichte. BSH Buche, BSH Esche, VH Fichte, VH Buche, Furnierschichtholz (FSH) Buche und FSH Fichte liegen bezogen auf die Abbrandrate unter Berücksichtigung der jeweils gewählten Rohdichten (vgl. Tabelle 6) im vergleichbaren Wertebereich von maximal ± 13 Prozent.

Die ermittelten eindimensionalen Abbrandraten über die 300°C Isotherme nach 30 min ETK-Prüfdauer aus den Versuchen fallen im Durchschnitt um ca. 27% höher als die Werte für β_0 (Abbrandrate für eindimensionalen Abbrand) nach DIN EN 1995-1-2 [42] aus. Besonders auffallend ist hierbei das erhöhte Abbrandverhalten von Esche gegenüber den Werten aus [42]. Um die Abweichungen gegenüber [42] weiter zu untersuchen, wurden in einem ersten Schritt die Rahmenbedingungen im Prüfofen genauer untersucht.

Betrachtet man das Temperaturniveau auf den Prüfkörpern, dass durch ein Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche gemessen wurde, wird deutlich, dass dieses über der eigentlichen ETK liegt, vgl. Abbildung 59. Ursächlich dafür ist der Mitbrand des Prüfkörpers während der Versuchszeit, der über das Platten-Thermoelement im Brandraum nicht adäquat erfasst wird und aus dem hohen Sauerstoffgehalt im Brandraum resultiert. Um Abbrandraten unter reiner ETK-Beanspruchung zu erhalten, die sich aus ventilationsgesteuerten Brandverläufen ableiten [68], müssen folglich die Abbrandraten ohne das erhöhte Temperaturniveau ermittelt werden.

Maßgebend im Vergleich zu bereits durchgeführten Versuchen sind insbesondere das verwendete Verfahren und die verwendete Messtechnik, da entsprechende externe Einflussgrößen das Abbrandverhalten beeinflussen können und bisher keine normativen Regelungen zur Vereinheitlichung vorliegen. Unterschiedliche Messtechnik bzw. Messmethoden können zu größeren Ergebnisschwankungen führen [69], [70].

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

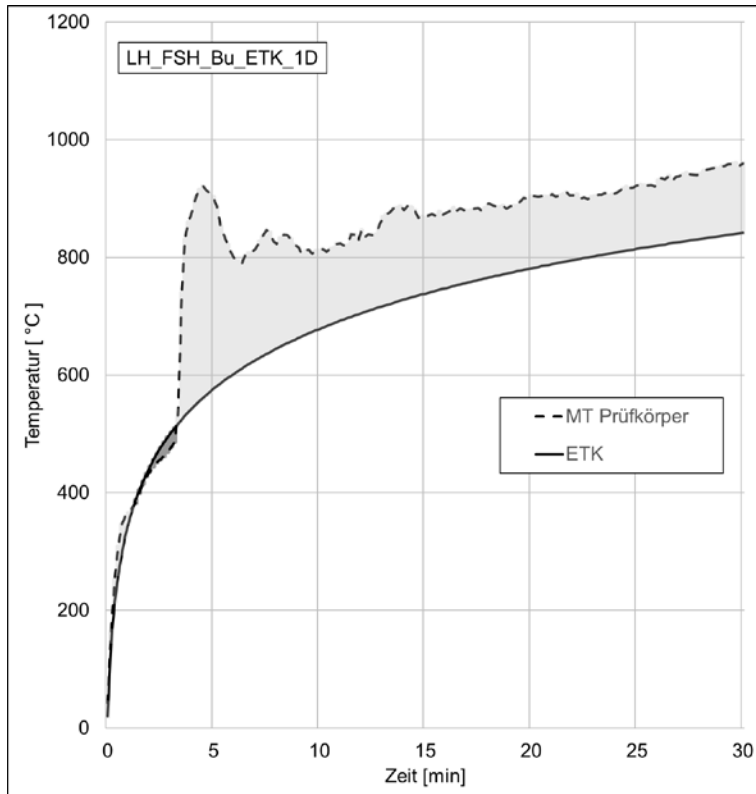


Abbildung 59 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche im Vergleich zur ETK beim Versuch Furnierschichtholz Buche – Temperaturdifferenz

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

Um die Temperatur-Zeit-Kurven der beiden Mantelthermoelemente zu vergleichen, wird die Differenz des Intergrals beider Kurven bestimmt, vgl. Abbildung 60.

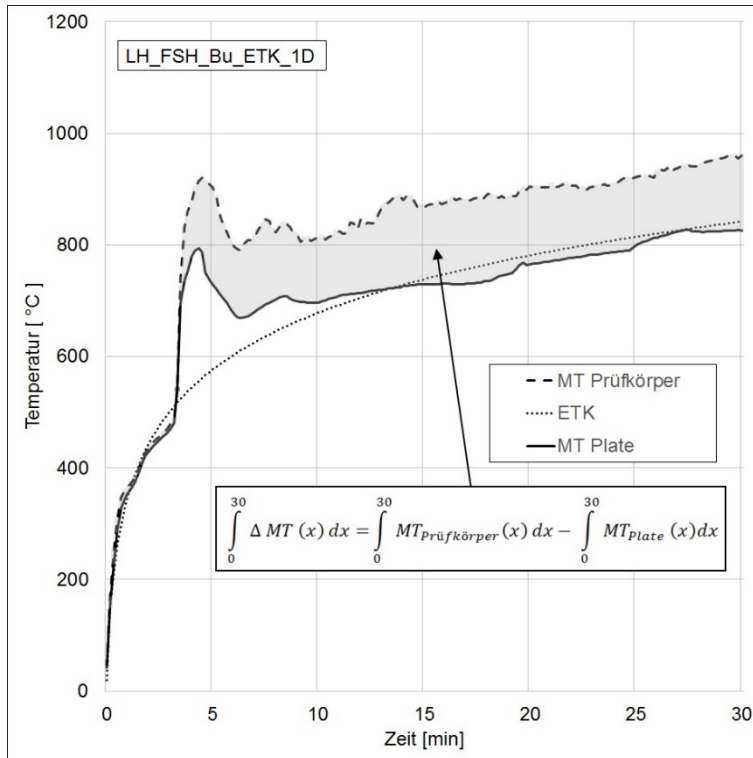


Abbildung 60 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche und für das Mantelthermoelement im Brandraum Versuch Furnierschichtholz Buche – Temperatur-Zeit Differenz beider Kurven

Mit Hilfe der Differenz beider Integrale lässt sich in einem ersten Schritt näherungsweise eine Anpassung der Abbrandrate durch eine Äquivalenzbetrachtung mit der ETK erzielen. Das heißt, die Fläche der Differenz beider Integrale wird mit einer gleich großen Fläche unterhalb der ETK verglichen und dafür der Wert in Minuten auf der x-Achse bestimmt, vgl. Abbildung 61.

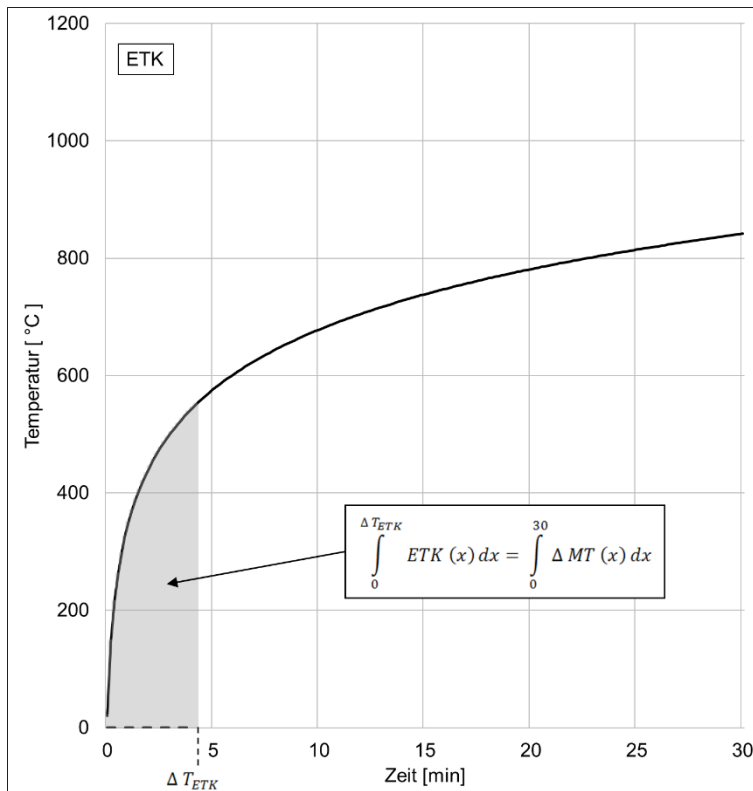


Abbildung 61 Integral unter Einheitstemperatur-Zeitkurve zur Ermittlung ΔT_{ETK}

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

Es ergeben sich folglich die in Tabelle 6 dargestellten Abbrandraten.

Tabelle 6: Abbrandrate für eindimensionale ETK-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme, Abweichung zu β_0 aus DIN EN 1995 und angepasste Abbrandrate

	Rohdichte kg/m ³	Holzfeuchte %	Abbrandrate 300°C Isotherme		β_0 aus 42 mm/min	Max. Abweichung zu β_0 42 %	Abbrandrate angepasst	Abweichung zu β_0 42 %
			30 min	90 min			30 min	
			mm/min	mm/min			mm/min	
BRETTSCHICHTHOLZ BUCHE	767	12,1	0,83	0,76	0,65	28	0,72	11
BRETTSCHICHTHOLZ ESCH	560	12,7	0,83	0,73	0,50	66	0,75	50
BRETTSCHICHTHOLZ FICHTE	507	11,8	0,70	0,59	0,65	8	0,64	- 2
FURNIERSCHICHTHOLZ BUCHE	802	8,3	0,87	0,72	0,65	34	0,72	11
FURNIERSCHICHTHOLZ FICHTE	607	10,0	0,77	0,76	0,65	18	0,65	0
VOLLHOLZ BUCHE	676	16,9	0,83	0,74	0,65	28	0,73	12
VOLLHOLZ EICHE	763	16,8	0,53	0,47	0,50	6	0,46	- 9
VOLLHOLZ FICHTE	485	12,0	0,83	0,72	0,65	28	0,72	11

Mehrdimensionale ETK-Beanspruchung

Abbildung 62 und Abbildung 63 stellen den Temperaturverlauf (Mittelwert aus dem oberen und unteren Messstrang) im Prüfkörper zur 30. und 60. Minute dar. Zwischen oberen und unteren Messstrang traten nur geringfügige Abweichungen auf.

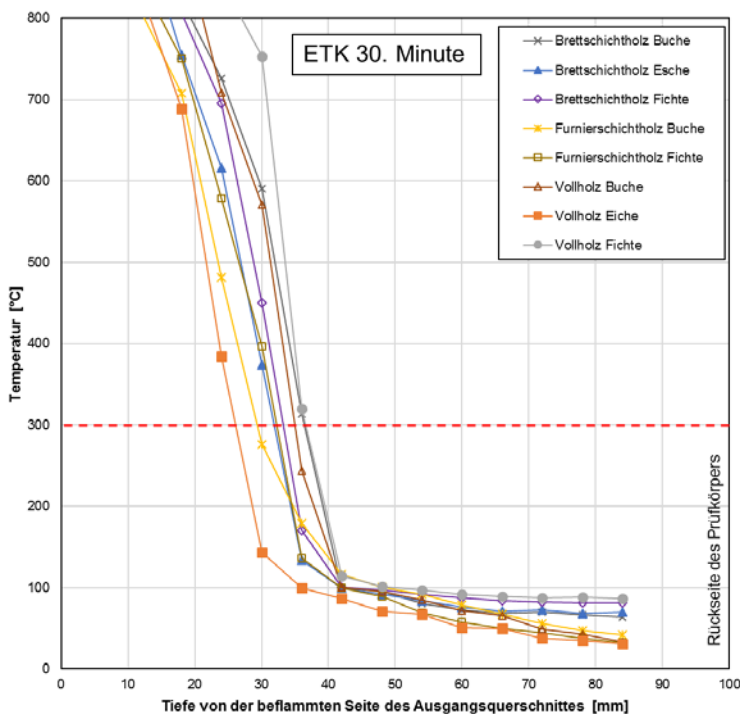


Abbildung 62 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger ETK-Beanspruchung zur 30. Minute

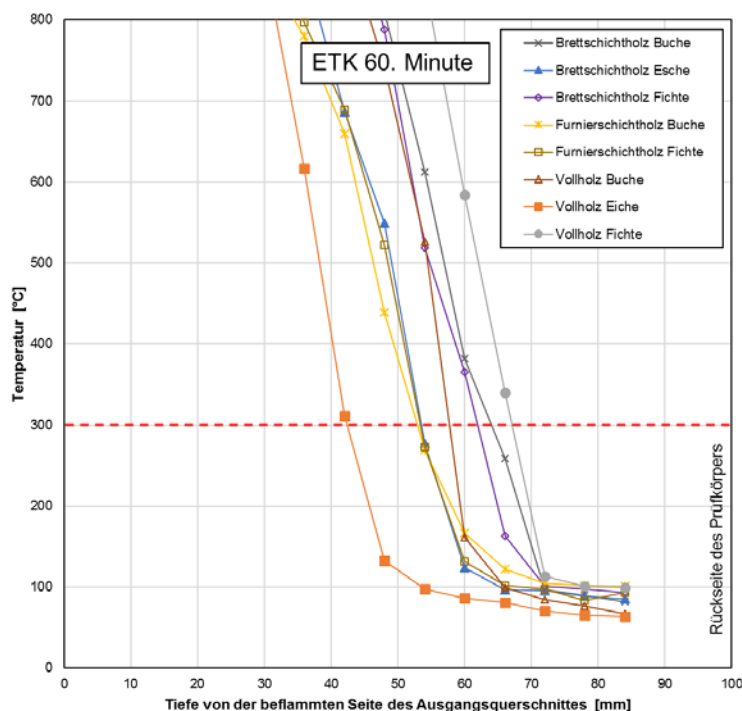


Abbildung 63 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger ETK-Beanspruchung zur 60. Minute

Mit Blick auf die ermittelten Abbrandraten in Tabelle 7 wird erneut deutlich, dass die Abbrandrate mit zunehmender Beanspruchungsdauer für Vollholz, Brett-schichtholz und Furnierschichtholz abnahm. Die maßgebenden Werte für die Abbrandrate stellen hier somit auch die Werte für 30 Minuten dar.

Die Abbrandraten ohne das erhöhte Temperaturniveau, sprich unter reiner ETK-Beanspruchung, werden nach demselben Prinzip wie im Kapitel zuvor ermittelt.

Es ergeben sich folglich die in Tabelle 7 dargestellten Abbrandraten.

Tabelle 7: Abbrandrate für dreiseitige ETK-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme, Abweichung zu β_n aus DIN EN 1995 und angepasste Abbrandrate

	Roh-dichte	Holz-feuchte	Abbrandrate 300°C Isotherme		β_n aus 42	Max. Ab-wei-chung zu β_n 42	Abbrand-rate ange-passt	Ab-wei-chung zu β_n 42
			30 min	60 min				
	kg/m ³	%	mm/min	mm/min	mm/min	%	mm/min	%
BRETTSCHICHTHOLZ BUCHE	767	12,1	1,23	1,03	0,7	76	1,09	56
BRETTSCHICHTHOLZ ESCH	560	12,7	1,07	0,87	0,55	95	0,94	71
BRETTSCHICHTHOLZ FICHTE	769	11,3	1,12	1,02	0,7	60	0,99	41
FURNIERSCHICHTHOLZ BUCHE	802	8,3	0,97	0,87	0,7	39	0,85	21
FURNIERSCHICHTHOLZ FICHTE	607	10,0	1,08	0,87	0,7	54	0,96	37
VOLLHOLZ BUCHE	676	16,9	1,17	0,97	0,8	46	1,03	29
VOLLHOLZ EICHE	763	16,8	0,87	0,7	0,55	58	0,76	38
VOLLHOLZ FICHTE	485	12,0	1,23	1,13	0,8	54	1,09	36

Eindimensionale Naturbrand_1-Beanspruchung

Im Rahmen der Untersuchung wurden zwei mögliche Verläufe von Naturbrandkurven untersucht [71]. Die Naturbrandkurve_1 besitzt zwei Wendepunkte, jeweils nach der Entwicklungsphase und der stationären Phase vor der Abklingphase, bei $x = 5$ min und $x = 44$ min, vgl. Abbildung 64.

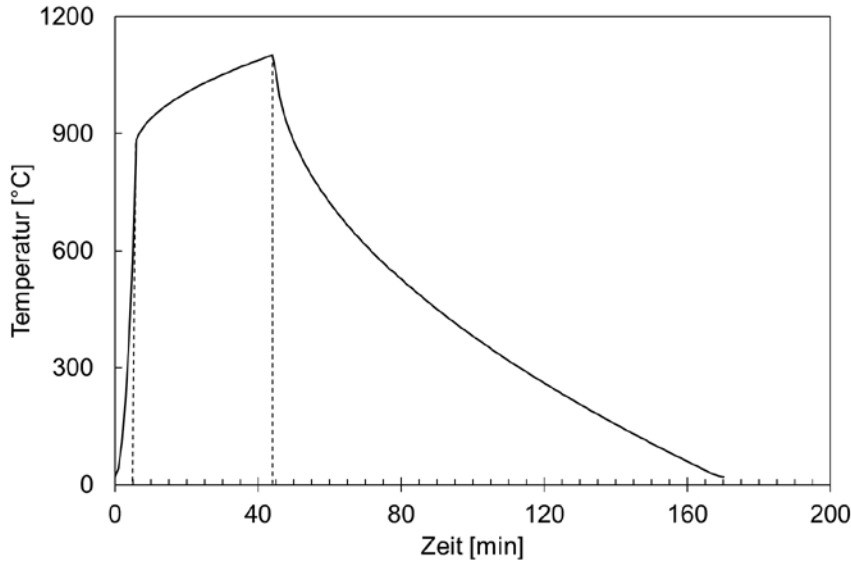


Abbildung 64 Verlauf von Naturbrand_1 mit Wendepunkten

Im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [54] konnte die Abklingphase versuchstechnisch, aufgrund des Mitbrands des Prüfkörpers, nicht über die 120. Minute hinaus korrekt abgebildet werden. Aus diesem Grund werden die Versuche nur bis zur 120. Minute ausgewertet, vgl. Abbildung 65.

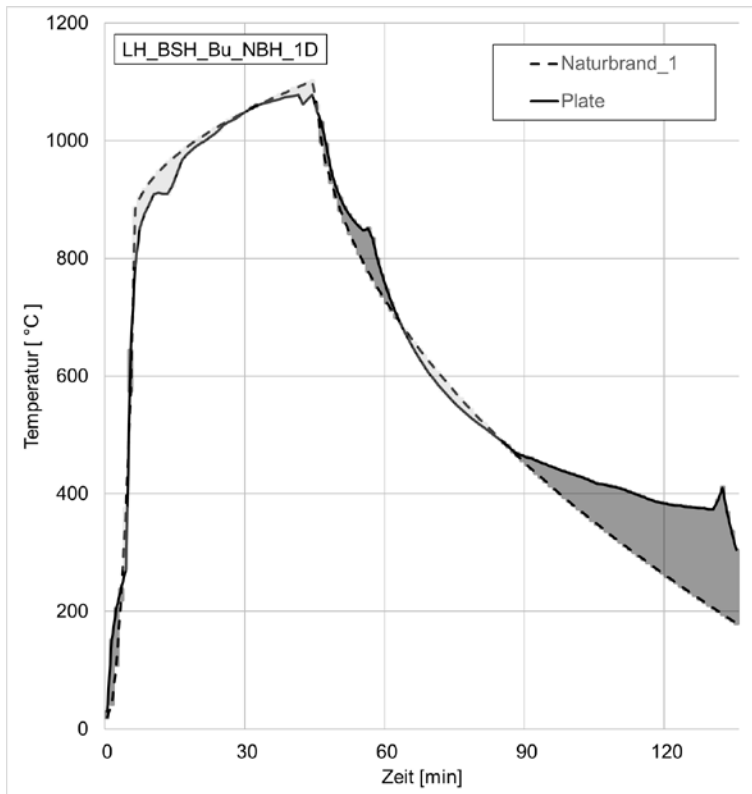


Abbildung 65 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Platethermoelement im Vergleich zum Naturbrand_1-Verlauf beim Versuch Brettschichtholz Buche – Temperaturdifferenz

Abbildung 66 bis Abbildung 68 stellen den Temperaturverlauf (Mittelwert aus dem rechten und linken Messstrang) im Prüfkörper zur 5., 44. und 120. Minute dar. Zwischen rechten und linken Messstrang traten nur geringfügige Abweichungen auf.

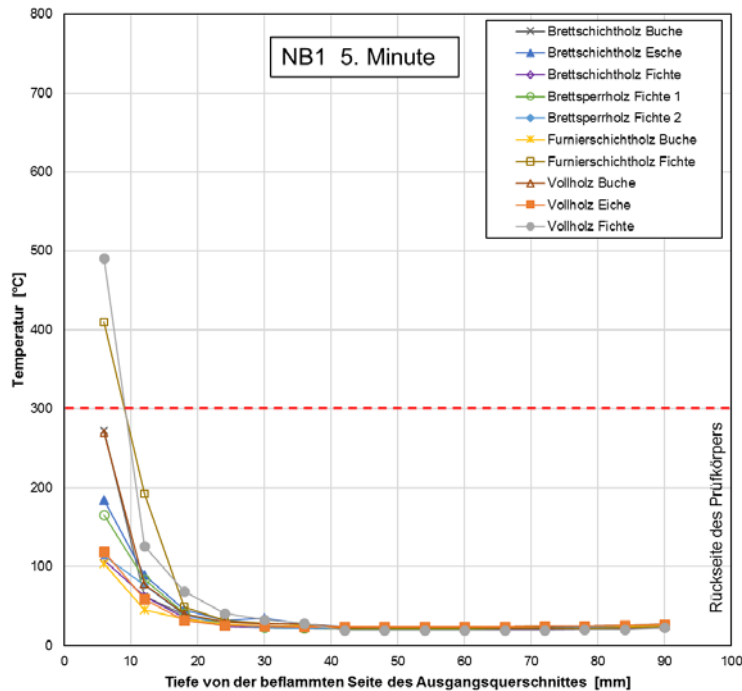


Abbildung 66 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB1-Beanspruchung zur 5. Minute

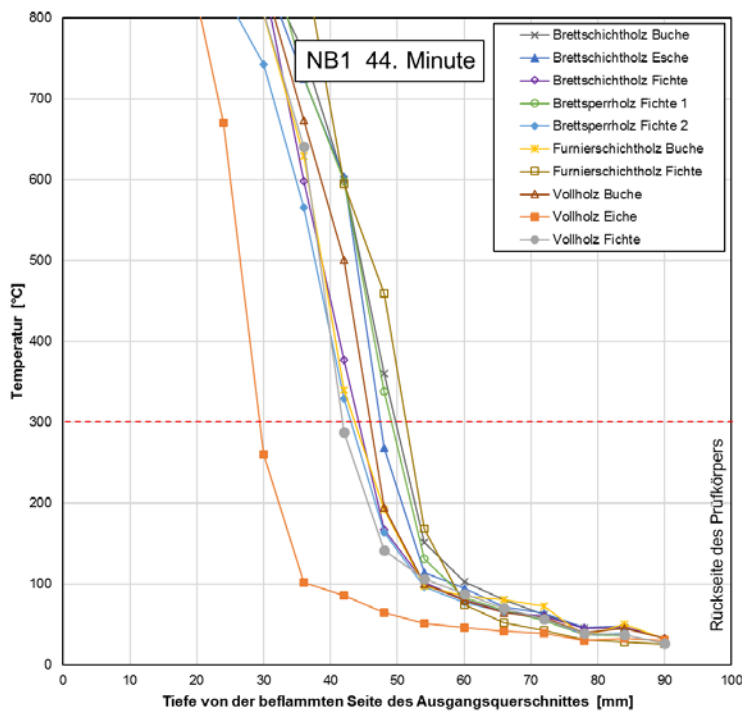


Abbildung 67 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB1-Beanspruchung zur 44. Minute

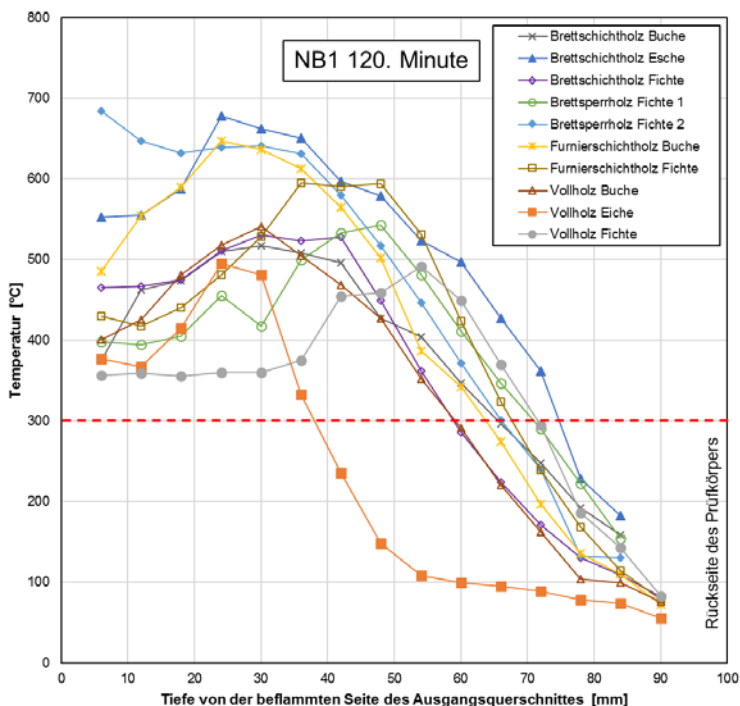


Abbildung 68 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB1-Beanspruchung zur 120. Minute

Es ergeben sich die in Tabelle 8 dargestellten Abbrände und Abbrandraten.

Tabelle 8: Abbrände und Abbrandraten für eindimensionale Naturbrand_1-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme

	Rohdichte kg/m ³	Holzfeuchte %	Abbrand 300°C Isotherme			Abbrandrate 300°C Isotherme		
			5 min mm	44 min mm	120 min mm	5 min mm/min	5. -44 min mm/min	44. -120 min mm/min
BRETTSCHICHTHOLZ BUCHE	767	12,1	5	50	65	1,00	1,15	0,20
BRETTSCHICHTHOLZ ESCH	560	12,7	-	47	75	-	1,07	0,37
BRETTSCHICHTHOLZ FICHTE	507	11,8	-	44,5	59	-	1,01	0,19
FURNIERSCHICHTHOLZ BUCHE	802	8,3	-	44	64	-	1,00	0,26
FURNIERSCHICHTHOLZ FICHTE	607	10,0	9	52	68	1,80	1,10	0,21
VOLLHOLZ BUCHE	676	16,9	5	46	59	1,00	1,05	0,17
VOLLHOLZ EICHE	763	16,8	-	29	38	-	0,66	0,12
VOLLHOLZ FICHTE	485	12,0	9	42	72	1,80	0,85	0,39

Mehrdimensionale Naturbrand_1-Beanspruchung

Abbildung 69 bis Abbildung 71 stellen den Temperaturverlauf (Mittelwert aus dem oberen und unteren Messstrang) im Prüfkörper zur 5., 44. und 90. Minute dar. Zwischen oberen und unteren Messstrang traten nur geringfügige Abweichungen auf. Nach der 90. Prüfminute traten größere Abweichungen vom gewählten Naturbrand_1-Verlauf auf.

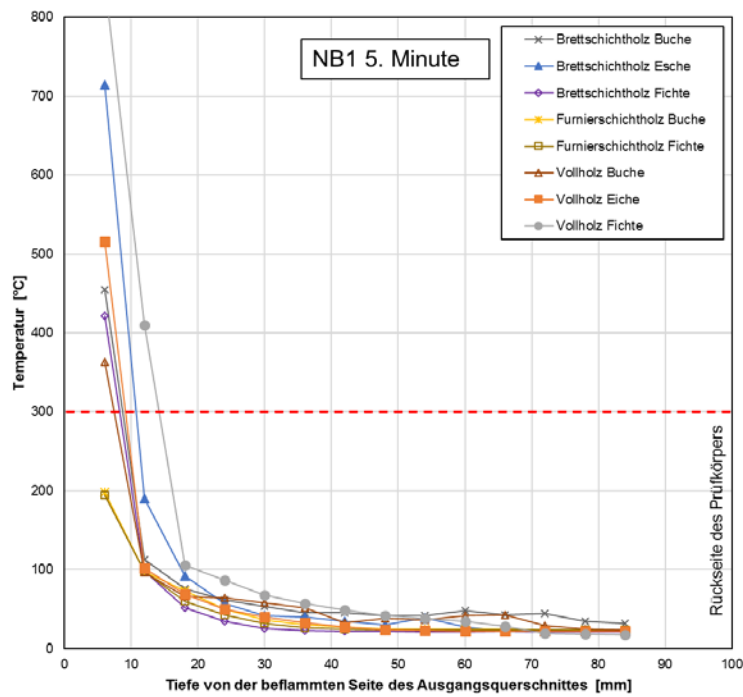


Abbildung 69 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger NB1-Beanspruchung zur 5. Minute

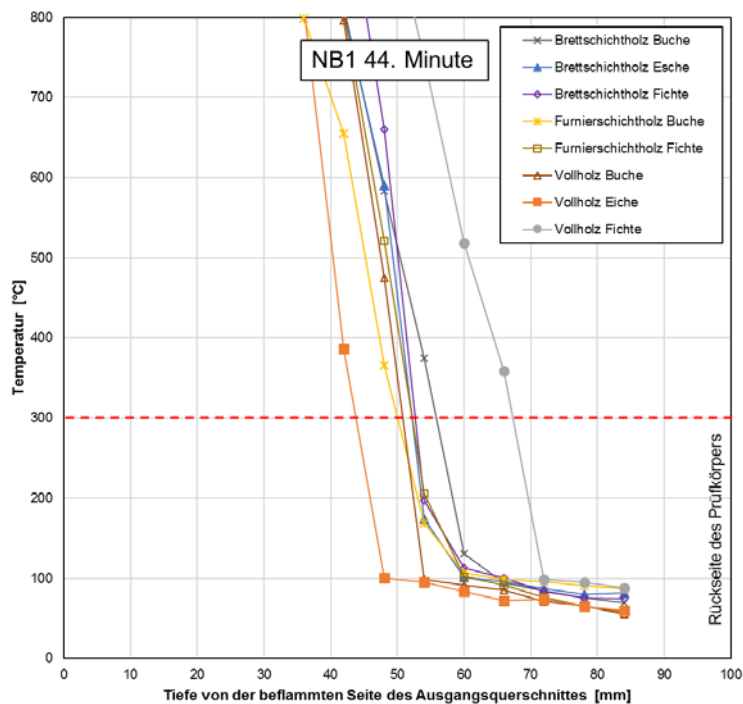


Abbildung 70 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger NB1-Beanspruchung zur 44. Minute

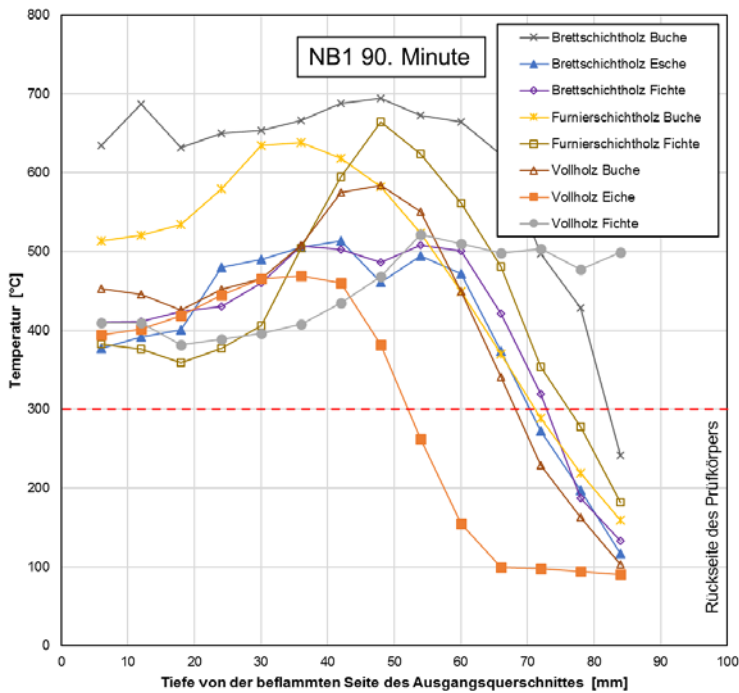


Abbildung 71 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger NB1-Beanspruchung zur 90. Minute

Es ergeben sich die in Tabelle 9 dargestellten Abbrände und Abbrandraten.

Tabelle 9: Abbrände und Abbrandraten für dreiseitige Naturbrand_1-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme

	Roh-dichte kg/m ³	Holz-feuchte %	Abbrand 300°C Isotherme			Abbrandrate 300°C Isotherme		
			5 min mm	44 min mm	90 min mm	5 min mm/min	5. -44 min mm/min	44. -90 min mm/min
BRETTSCHICHTHOLZ BUCHE	767	12,1	8,5	55	82	1,7	1,19	0,59
BRETTSCHICHTHOLZ ESCH	560	12,7	11	52	71	2,2	1,05	0,41
BRETTSCHICHTHOLZ FICHTE	769	11,3	8	52	72	1,6	1,13	0,43
FURNIERSCHICHTHOLZ BUCHE	802	8,3	2,5	50	71	0,5	1,22	0,46
FURNIERSCHICHTHOLZ FICHTE	607	10,0	2,5	52	76	0,5	1,27	0,52
VOLLHOLZ BUCHE	676	16,9	7,5	51	68	1,5	1,12	0,37
VOLLHOLZ EICHE	763	16,8	9	43	52	1,8	0,87	0,20
VOLLHOLZ FICHTE	485	12,0	14	68	-	2,8	1,38	0,55*

* mit Wert bis zu 76. Minute bestimmt

Eindimensionale Naturbrand_2-Beanspruchung

Die Naturbrandkurve_2 besitzt zwei Wendepunkte, jeweils nach der Entwicklungsphase und der stationären Phase vor der Abklingphase, bei x = 11 min und x = 89 min, vgl. Abbildung 72.

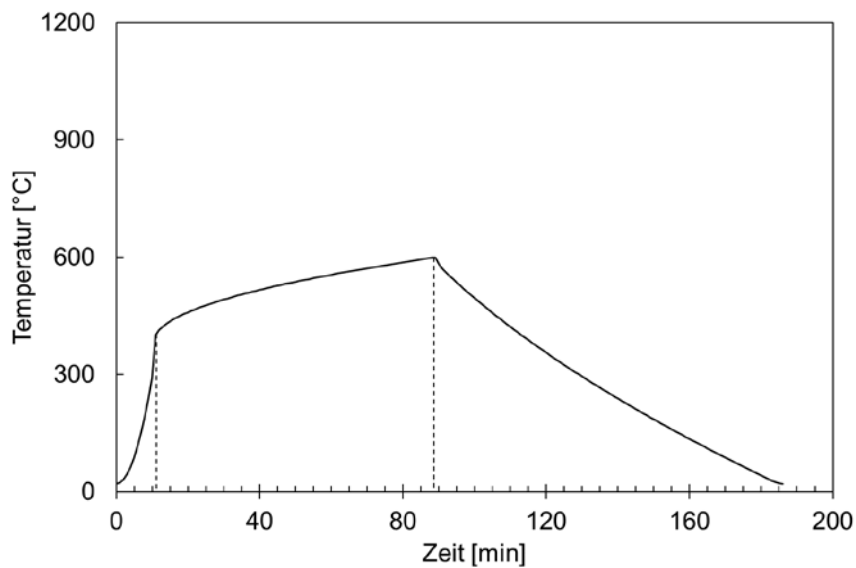


Abbildung 72 Verlauf von Naturbrand_2 mit Wendepunkten

Aufgrund eines softwarebedingten Aufzeichnungsfehler können nur die Werte für die 100. Minute angegeben werden (siehe Abbildung 73).

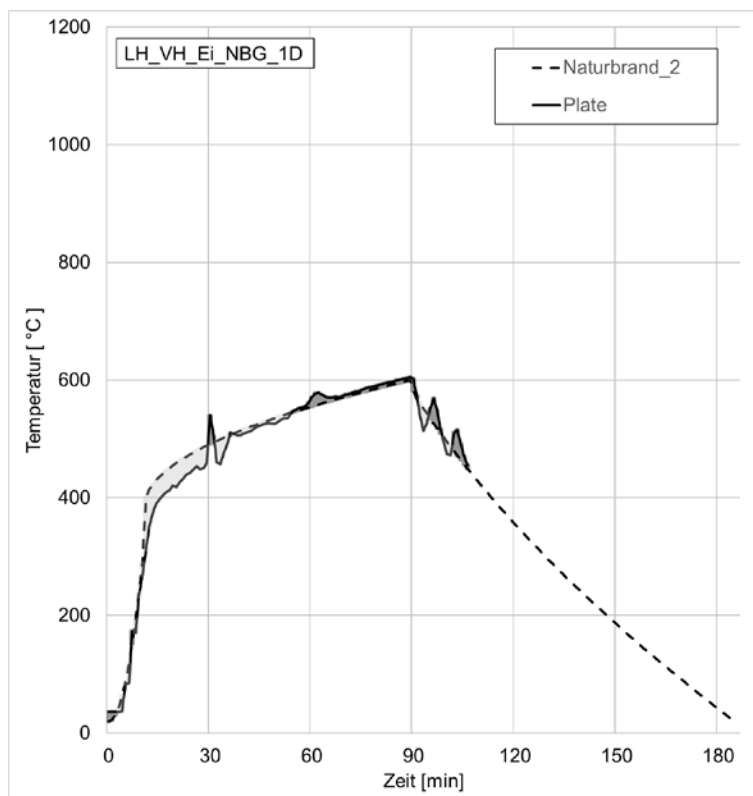


Abbildung 73 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Platethermoelement im Vergleich zum Naturbrand_2-Verlauf beim Versuch Vollholz Eiche – Temperaturdifferenz

Abbildung 74 und Abbildung 75 stellen den Temperaturverlauf (Mittelwert aus dem rechten und linken Messstrang) im Prüfkörper zur 89. und 100. Minute dar. Zwischen rechten und linken Messstrang traten nur geringfügige Abweichungen auf. Nach der 100. Prüfminute traten größere Abweichungen vom gewählten Naturbrand_2-Verlauf auf.

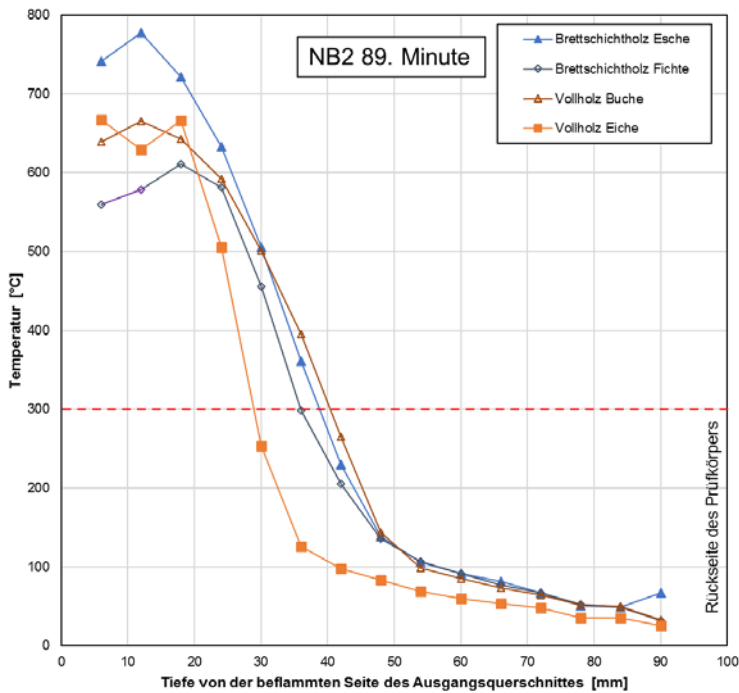


Abbildung 74 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB2-Beanspruchung zur 89. Minute

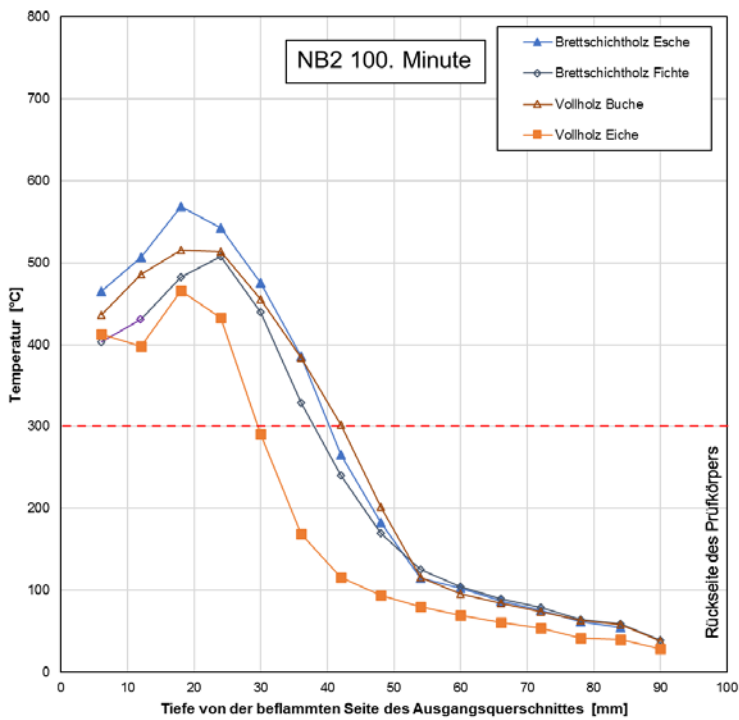


Abbildung 75 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB2-Beanspruchung zur 100. Minute

Es ergeben sich die in Tabelle 10 dargestellten Abbrände und Abbrandraten.

Tabelle 10: Abbrände und Abbrandraten für eindimensionale Naturbrand_2-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme

	Roh- dichte	Holz- feuchte	Abbrand 300°C Isotherme			Abbrandrate 300°C Isotherme		
			11 min	89 min	100 min	11 min	11 -89 min	89 -100 min
	kg/m ³	%	mm	mm	mm	mm/min	mm/min	mm/min
BRETTSCHICHTHOLZ ESCHE	560	12,7	-	38	40	-	0,43	0,18
BRETTSCHICHTHOLZ FICHTE	507	11,8	-	36	38	-	0,40	0,18
VOLLHOLZ BUCHE	676	16,9	-	40	42	-	0,45	0,18
VOLLHOLZ EICHE	763	16,8	-	28	30	-	0,31	0,18

Zusammenfassung

Maßgebend für die Abbrandrate sind, neben Einflüssen wie Holzfeuchte und Einwirkungsszenario der Brandbeanspruchung insbesondere die jeweilige Holzart und die damit einhergehenden Parameter wie die Holzkohleschicht, der anatomische - und der chemische Aufbau [43], [265] - [269].

Für die Abbrandraten von Holz konnten die bisher bekannten normativen Werte für den eindimensionalen Abbrand unter Normbrandbeanspruchung in einem ersten Schritt bestätigt und ergänzt werden. Insbesondere für die Holzart Esche zeigten sich jedoch größere Abweichungen zu den bis dato normierten Abbrandraten. Hintergrund hierfür ist, dass bis dato nur wenige Untersuchungen zum Abbrandverhalten für die Holzart Esche vorliegen. Die Esche ist jedoch eine klimatolerante und damit wichtige Baumart im klimabedingten Waldumbau und kann folglich, sofern sie nicht durch das Eschentriebsterben aus dem zentraleuropäischen Raum vertrieben wird, eine Lösung für die Zukunft darstellen Esche [48].

Für die Abbrandraten von Holz unter dreiseitiger Normbrandbeanspruchung zeigten sich größere Abweichungen zu den normativen Werten. Die normativen Werte beruhen auf einer Reihe internationaler Untersuchungen in unterschiedlichen Prüföfen und Anordnungen. Diverse Untersuchungen zeigen, dass bereits geringe Abweichungen in Bezug auf die Sauerstoffkonzentration im Ofen, die Steuerung der Ofentemperatur und die Anordnung der Prüfkörper im Ofen zu starken Streuungen führen [68], [69], [154], [183]. Ein weiterer Grund für Streuungen sind die jeweils zum Einsatz kommende Messtechnik und die Messverfahren für die Temperaturmessung [68], [70].

Die Werte für den eindimensionalen bzw. dreiseitigen Abbrand unter der Naturbrandkurve_1 Beanspruchung und die die Werte für den eindimensionalen Abbrand unter der Naturbrandkurve_2 Beanspruchung sind näherungsweise als zeitabhängige Abbrandraten bis zu den jeweiligen Wendepunkten der Naturbandkurven dargestellt. Für eine genauere Betrachtung des jeweiligen Abbrandes im Rahmen von Ingenieurmethoden wird auf Anhang 4.5 verwiesen. Zu berücksichtigen bleibt, dass die Naturbandkurve_1 und die Naturbrandkurve_2 lediglich zwei beispielhafte Naturbandkurven repräsentieren und sich die Abkühlphase nicht vollumfänglich abbilden ließ. Dies ist auf die starke Sauerstoffzufuhr zum Abkühlen des Prüfofens und dem daher einhergehenden Mitbrand der Holzwerkstoffe im Prüfofen zurückzuführen und bereits im Rahmen andere Untersuchungen festgestellt worden [154], [183].

3.1.2.3 Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung

Zum Schutz der Entzündung von Holzbauteilen in der Gebäudeklasse 4 wird in [27] die Anordnung einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung (Brandschutzbekleidung) gefordert. Eine Konkretisierung der Anforderungen an die Brandschutzbekleidung erfolgt in [47]. Die nichtbrennbare Brandschutzbekleidung muss nach [47] während eines Zeitraumes von 60 Minuten unter Brandbeanspruchung nach ETK ein Entzünden der tragenden und aussteifenden Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen verhindern und eine K₂60 Klassifizierung gemäß [2] besitzen. Die Grundlagenuntersuchung zur Erarbeitung der Anforderungen und Konstruktionsdetails in [47] erfolgte durch [49] und wurde in [50] weiter konkretisiert.

Die normative Prüfung der Brandschutzfunktion (K) erfolgt separat zu dem Feuerwiderstandsverhalten nach [51] über eine Klassifizierungszeit gemäß [2] von 10, 30 oder 60 Minuten. Als Leistungskriterien dienen gemäß [2] zum einen die Temperaturerhöhung gegenüber der Ausgangstemperatur in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Trägerplatte (Holzoberfläche), welche im Mittel auf 250 K und an beliebiger Stelle auf 270 K begrenzt ist. Zum anderen darf nach der Brandprüfung kein verbranntes oder verkohltes Material an beliebiger Stelle der Trägerplatte oder an beliebiger Stelle der brandabgewandten Seite der Brandschutzbekleidung auftreten. Zur Anforderung „keine Verkohlungen“ liegen keine einheitlichen Bewertungskriterien europäischer Prüfanstalten vor.

Entsprechend [50] wurde für die Erfüllung der Leistungskriterien, über eine Beflammungsdauer von 60 Minuten nach ETK, eine Kombination aus zwei Lagen 18 mm Gipsplatten Typ DF (Typ DF) nach DIN EN 520 [37] als Brandschutzbekleidung empfohlen. Äquivalent dazu ist die Verwendung von Gipsfaserplatten (GF) gemäß DIN EN 15283-2 [52] oder Verwendbarkeitsnachweis z. B. [38] möglich.

In der Regel ist die Anforderung „kein verbranntes/verkohltes Material“ ausschlaggebend für die Klassifizierung und nicht das Kriterium der Temperaturerhöhung. Beispielsweise führt der erhöhte Wärmeeintrag über die stiftförmigen, metallischen Verbindungsmittel (VM), zur Befestigung der Brandschutzbekleidung bereits bei Temperaturen in der Grenzschicht von ca. 200 °C zu Verfärbungen auf der Trägerplatte im Bereich der VM [53]. Des Weiteren sind hier auftretende Verkohlungen im Bereich der Plattenstöße zu nennen [50].

Die orientierenden Brandversuche zur Analyse der Leistungsfähigkeit und Sicherheitsreserven von Brandschutzbekleidungen erfolgten im Brandofen nach DIN 4102-8 [54] (siehe Abbildung 76) an kleinformatigen Versuchskörpern (50 x 50 cm²), mit 45 x 45 cm² beflammt Fläche. Bedingt durch die Ofenkonstruktion können hier zwei Proben parallel getestet werden. Zudem lässt sich eine Brandbeanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve sowie Naturbrandkurve durchführen. Die Versuchsrandbedingungen (Beflammungseinrichtung, Brandraumgröße, Mantelthermoelement und Ofendruck) entsprechen den Angaben in [54].



Abbildung 76: Links: Versuchsaufbau unbeflammte Seite; rechts: Versuchsaufbau beflammte Seite jeweils während des Versuches

Dieser Versuchsofen bietet die Möglichkeit zur Beurteilung der Temperaturentwicklung von anfänglich geschützten Bauteilen unter Normbrandbeanspruchung sowie Naturbrandbeanspruchungen. Es kann hier auch eine Berücksichtigung des Nachbrandverhaltens (Eintreten eines Selbstverlöschens) erfolgen. Außerdem ist hier eine Vergleichbarkeit bezüglich der Versuchsergebnisse infolge der unterschiedlichen Brandbeanspruchungen möglich (Äquivalenzbetrachtung). Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch die Brandraumgröße sowie die Versuchskörpergröße respektive thermisch beanspruchte Oberfläche,

welche nur einen Kleinmaßstab abbildet und aufgrund von Skalierungseffekten nicht direkt auf das realmaßstäbliche Feuerwiderstandsverhalten von Bauteilen übertragbar ist. Durch die Untersuchung von zwei Proben parallel erfolgte beim Versagen oder Erreichen des Versagenskriteriums einer Probe eine Beendigung des Versuches. Hierbei bestand die Möglichkeit, dass die zweite Probe nicht bis zum Erreichen des Versagenskriteriums untersucht wurde und entsprechend Messdaten und Erkenntnisse verloren gingen.

Konzeption

Die Mehrheit der orientierenden Brandversuche erfolgte entsprechend dem Bezug zur normativen Klassifizierung der Brandschutzbekleidung unter normativer Brandbeanspruchung (ETK). Dabei wurden zum einen neben der Temperaturentwicklung die Verkohlungsbilder der Trägerplatte bei verschiedenen Grenztemperaturen in der Grenzschicht und zum anderen die Verkohlungsbilder bei verschiedenen Beanspruchungsdauern (ETK 60 min, ETK 90 min) untersucht.

Mit einem leistungsorientierten Nachweis auf Basis von Ingenieurmethoden, wie sie der Eurocode enthält, ist ein Nachweis der Schutzziele bzw. funktionalen Anforderungen möglich. Hiermit kann eine Gleichwertigkeit der Holzbauweise gegenüber den konventionellen nichtbrennbaren Bauweisen, die normative Leistungskriterien zumeist in Brandprüfungen erfüllen, erbracht werden. Hierzu erfolgten orientierende Brandversuche unter Naturbrandbeanspruchungen, welche eine Abkühlphase enthielten. Das Nachbrandverhalten wurde bei diesen Versuchen mitbetrachtet. Außerdem wurde das Nachbrandverhalten bei Massivholzträgerplatten, die sich entzündet hatten und selbstständig weiterbrannten, analysiert. Dazu waren Probekörper zum Teil mit einer bewusst unterdimensionierten Brandschutzbekleidung ausgeführt.

Die Versuchsergebnisse unter Beanspruchung gemäß ETK im Vergleich zu den Ergebnissen unter Naturbrandbeanspruchung bieten neben der Gleichwertigkeit auch die Möglichkeit für einen Äquivalenznachweis. Der Äquivalenznachweis stellt eine vergleichende Betrachtung der Ergebnisse von identischen Probekörpern bei den beiden unterschiedlichen Brandbeanspruchungen jedoch mit derselben eingebrachten Energieäquivalenz (Integral – ETK zu Integral – Naturbrand_1) dar.

Versuchskörper und Versuchsablauf

Für die orientierenden Brandversuche zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen wurden kleinskalige Versuchskörper hergestellt (Abbildung 77 und Abbildung 78). Die Versuchskörper bestanden aus einem Fichtenholzrahmen (Rahmenhölzer: Höhe 100 mm, Breite 40 mm), welcher umlaufend mit einer Trägerplatte verschraubt war. Als Trägerplatte wurde eine 19 mm Norm-Trägerplatte (Spanplatte) entsprechend EN 14135 [51], eine praxisrelevante 15 mm OSB/3-Platte (Oriented strand board) gemäß DIN EN 300 [35] oder zur Abbildung von Massivholzelementen eine 42 mm Massivholzplatte (SWP) nach DIN EN 13353 [36] verwendet. Eine Hinterlegung des Gefachs mit Mineralwolle zur Erzeugung eines größeren Wärmestaus hinter der Trägerplatte erfolgte optional bei ausgewählten Versuchskörpern. Auf die Trägerplatte wurde eine Brandschutzbekleidung aufgeschraubt. Die Verschraubung fand an zwei Seiten im Randbereich der Brandschutzbekleidung mit handelsüblichen Schnellbauschrauben (innere Lage: 3,9 x 45 mm (linke und rechte Seite) und äußere Lage: 4,5 x 75 mm (obere und untere Seite) statt.

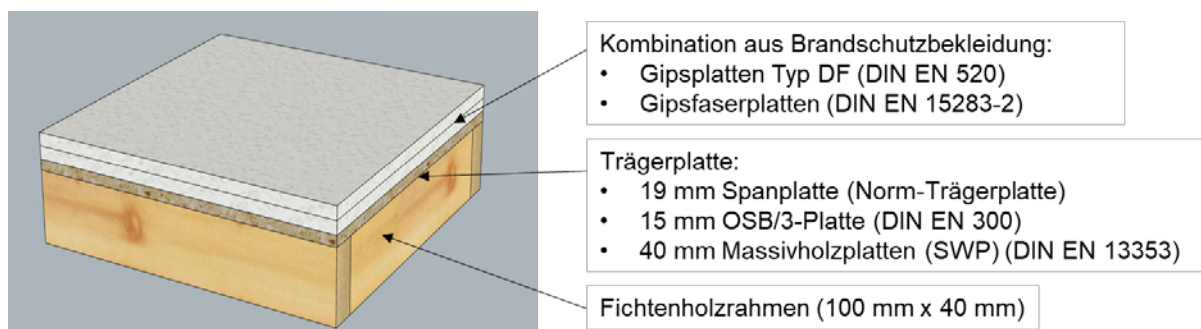


Abbildung 77: Darstellung des kleinskaligen Versuchskörpers

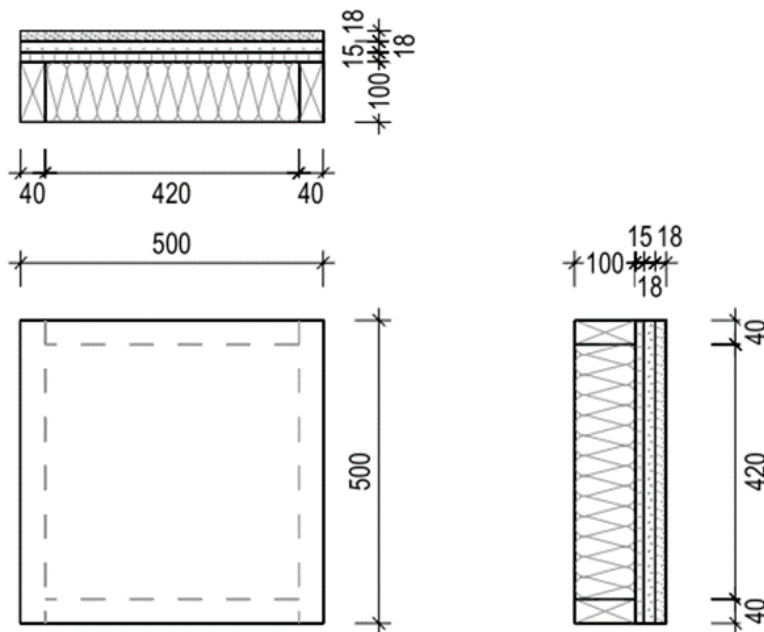


Abbildung 78: Technische Zeichnung eines Versuchskörpers

Messtechnik

Zur Dokumentation der Temperaturentwicklung bei Brandbeanspruchung wurden die Versuchskörper mit Thermoelementen vom Typ K nach [55] ausgestattet. Je Lage erfolgte dabei die Anordnung von vier Thermoelementen. Zusätzlich fand eine Anordnung von Verbindungsmitteln (Indikator-Schraube und Indikator-Klammer) in der beflamten Fläche statt. Diese dienen dazu die Verkohlungen und den Temperatureintrag durch die metallischen VM zu analysieren. Die untere Indikator-Schraube sowie die obere Indikator-Klammer waren in der ersten Bekleidungs-lage und die obere Indikator-Schraube als auch die untere Indikator-Klammer waren in der zweiten Lage der Bekleidung geführt (siehe Abbildung 79). Die VM in der zweiten (brandbeanspruchte) Lage wurden mit Gipsspachtel verschlossen. Bei den Versuchskörpern ohne eine Gefachdämmung waren die aus der Trägerplatte herausstehenden Enden der VM mit einem Würfel Mineralwolle gegenüber einem erhöhten Wärmeabfluss auf der brandabgewandten Seite geschützt. Diese Maßnahme diente dazu die Verkohlungen und den Temperatureintrag durch die metallischen VM vergleichend zu [50] und [53] zu analysieren.

In [53] erfolgte unter anderem die Analyse des Grades der Verkohlungen um die Eintrittsstelle des VM in der Trägerplatte (Spanplatte, Baustoffklasse B2). Für eine Temperatur in der Grenzschicht von 225 °C wurden die auftretenden Verkohlungen als vertretbar eingestuft.

Für die Analyse der Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen wurden die gängigen Materialien Gipsplatte Typ DF (DIN EN 520) und Gipsfaserplatte (DIN EN 15382-2 bzw. ETA-03/0050) als Brandschutzbekleidungen verwendet. Außerdem wurde als Bekleidungs-material eine Gipsplatte Typ A (DIN EN 520) mitbetrachtet. Hinsichtlich der Kombination wurden sechs unterschiedliche Varianten berücksichtigt:

- 1 x 18 mm,
- 1 x 25 mm,
- 2 x 15 mm (30 mm),
- 15 mm + 18 mm (33 mm),
- 2 x 18 mm (36 mm) und
- 3 x 12,5 mm (37,5 mm).

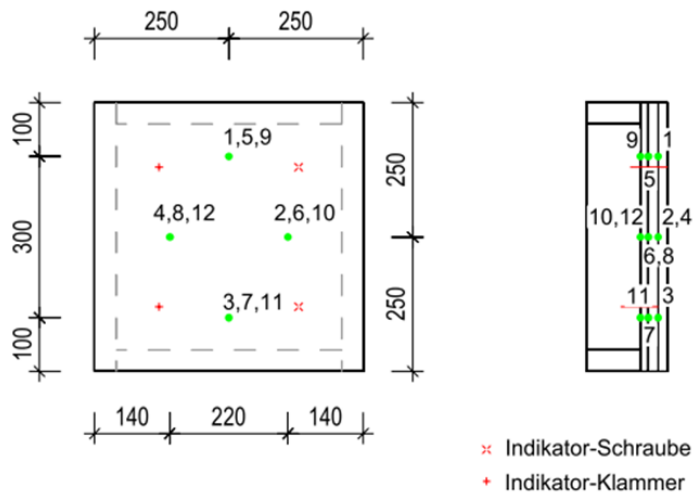


Abbildung 79: Position der Thermoelemente und Indikator-Verbindungsmitel

Grundlegend erfolgte bei der Versuchsdurchführung unter ETK Beanspruchung die Berücksichtigung von zwei Abläufen. Zum einen war ein Temperaturkriterium für die Temperaturen in der Grenzschicht Brandschutzbekleidung – Trägerplatte festgelegt und zum anderen eine Beflammungsdauer definiert worden. Ab Erreichen des Kriteriums, beim Temperaturkriterium wurde der Mittelwert der vier Temperaturmessstellen wurde herangezogen, wurde die Beflammung beendet, der Versuchskörper aus dem Ofen entnommen und in einem Wasserbad abgelöscht. Anschließend wurde die Brandschutzbekleidung demontiert zur Begutachtung des Verkohlungsbildes. Zur Untersuchung des Nachbrandverhaltens folgte ab Erreichen des Kriteriums die Beendigung der Beflammung und der Versuchskörper wurde aus dem Ofen entnommen (vor dem Ofen in der Umgebungsluft abgestellt) und zur Analyse des Nacherwärmungsverhaltens weiter beobachtet (visuell und messtechnisch).

Die Tabelle 11 zeigt die Versuchsmatrix der Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen. Neben dem Aufbau per se ist für jeden Versuch das untersuchte Ziel mit dargestellt.

Tabelle 11: Versuchsmatrix der Brandversuche zur Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung

Bezeichnung	Nr.	Trägerplatte	Konstruktion	Aufbau	Brandbeanspruchung	Ziel
T8_1	1.1	15 mm OSB/3	2-lagig Typ DF	2 x 18	ETK 94 min	Grenztemperatur als Versagenskriterium (225°C, Optimierung K60) Verkohlungsbild
	1.2	15 mm OSB/3	2-lagig GF + Dämmung 100 mm	2 x 18	ETK 88 min	
T8_2	2.1	19 mm Spanplatte	2-lagig Typ DF	2 x 18	ETK 60 min	Status Quo
	2.2	19 mm Spanplatte	2-lagig GF	2 x 18	ETK 60 min	Verkohlungsbild
T8_3	3.1	42 mm SWP Fichte	2-lagig GF	2 x 18	ETK 95 min	Grenztemperatur als Versagenskriterium (225°C, Optimierung K60) Verkohlungsbild
	3.2	15 mm OSB/3	3-lagig GKB	3 x 12.5	ETK 88 min	
T8_4	4.1	42 mm SWP Fichte	2-lagig Typ DF	15 + 18	ETK 90 min	Leistungsfähigkeit bei 15 + 18 mm
	4.2	15 mm OSB/3	2-lagig GF	15 + 18	ETK 90 min	
T8_5	5.1	15 mm OSB/3	2-lagig GF + Dämmung 100 mm	2 x 18	ETK 90 min	Nachbrandverhalten, Selbstverlöschen
	5.2	42 mm SWP Fichte	2-lagig GF + Dämmung 40 mm	2 x 18	ETK 90 min	
T8_6	6.1	15 mm OSB/3	2-lagig GF	2 x 15	ETK 70 min	Grenztemperatur als Versagenskriterium (200°C) Verkohlungsbild
	6.2	15 mm OSB/3	2-lagig Typ DF	2 x 15	ETK (75) min	
T8_7	7.1	15 mm OSB/3	2-lagig Typ DF	2 x 18	Naturbrand_1	Naturbrandbeanspruchung + Nachbrandverhalten / Selbstverlöschen
	7.2	15 mm OSB/3	2-lagig GF	2 x 18	Naturbrand_1	
T8_8	8.1	15 mm OSB/3	2-lagig Typ DF	2 x 18	Naturbrand_2	Naturbrandbeanspruchung + Nachbrandverhalten / Selbstverlöschen
	8.2	15 mm OSB/3	2-lagig GF	2 x 18	Naturbrand_2	
T8_9	9.1	42 mm SWP Fichte	2-lagig GF	2 x 18	ETK 90 min	Nachwärmungsverhalten, Selbstverlöschen; Nachbrandverhalten
	9.2	15 mm OSB/3	3-lagig GKB	3 x 12.5	ETK 90 min	
T8_10	10.1	15 mm OSB/3	2-lagig GF	2 x 15	ETK 90 min	Nachwärmungsverhalten, Selbstverlöschen; Nachbrandverhalten
	10.2	15 mm OSB/3	2-lagig Typ DF	2 x 15	ETK 90 min	
T8_11	11.1	15 mm OSB/3	2-lagig GF	2 x 18	ETK 90 min	Nachwärmungsverhalten, Selbstverlöschen; Nachbrandverhalten
	11.2	40 mm SWP Buche	2-lagig GF	2 x 18	ETK 90 min	
T8_12	12.1	15 mm OSB/3	1-lagig GF	1 x 18	ETK 43 min	direkter VGL. zu T8_5 - Einfluss Dämmung Grenztemperatur als Versagenskriterium (270°C, DIN EN 13501-2) Verkohlungsbild
	12.2	15 mm OSB/3	2-lagig GKB	2 x 12.5	ETK (57) min	
T8_13	13.1	15 mm OSB/3	1-lagig GF	1 x 18	ETK 60 min	Nachwärmung / Selbstverlöschen
	13.2	15 mm OSB/3	1-lagig Typ DF	1 x 18	ETK 60 min	
T8_14	14.1	19 mm Spanplatte	2-lagig Typ DF	2 x 18	ETK 85 min	Grenztemperatur als Versagenskriterium (225°C, Optimierung K60) Verkohlungsbild, 14.2 mit Nachwärmung / Selbstverlöschen
	14.2	19 mm Spanplatte	2-lagig GF	2 x 18	ETK 85 min	
T8_15	15.1	42 mm SWP Fichte	1-lagig Typ DF	1 x 18	Naturbrand_1	Naturbrandbeanspruchung + Nachbrandverhalten / Selbstverlöschen
	15.2	42 mm SWP Fichte	2-lagig Typ DF	2 x 15	Naturbrand_1	
T8_16	16.1	2 x 42 mm SWP Fichte	1-lagig Typ DF	1 x 12.5	Naturbrand_1	Naturbrandbeanspruchung + Nachbrandverhalten / Selbstverlöschen
	16.2	2 x 42 mm SWP Fichte	1-lagig Typ DF	1 x 25	Naturbrand_1	
T8_17	17.1	42 mm SWP Fichte	1-lagig + Fuge Typ DF	1 x 12.5	Naturbrand_1	Naturbrandbeanspruchung + Nachbrandverhalten / Selbstverlöschen
	17.2	42 mm SWP Fichte	1-lagig + Fuge GF	1 x 15	Naturbrand_1	
T8_19	19.1	19 mm Spanplatte	1-lagig + Fuge Typ DF	1 x 25	ETK (53) min	Grenztemperatur als Versagenskriterium (200 °C) Verkohlungsbild - Spanplatte
	19.2	19 mm Spanplatte	1-lagig Typ DF	1 x 25	ETK (50) min	

Mit Verbindungsmittel im Feld (Schraube und Klammer) jeweils in 1. und 2. Lage
Verbindungsmittel an der Austrittsstelle der Trägerplatte mit Dämmstoff vor erhöhtem Wärmeabfluss schützen

Analyse der Versuchsergebnisse

Leistungsfähigkeit unter ETK-Beanspruchung

Im Ergebnis wird die mittlere Temperaturentwicklung sowie das Verkohlungsbild der Trägerplatte unter Beanspruchung nach ETK analysiert. Einen Vergleich der gemittelten Temperaturentwicklung in der Grenzschicht Brandschutzbekleidung – Trägerplatte für unterschiedliche Bekleidungsstärken zeigt Abbildung 80. Der Verlauf zeigt deutlich die Schutzwirkung ab 100 °C infolge der Dehydratation der Gipsplatten, welche die Erhöhung der Grenzschichttemperatur verzögert. Erst ab Überschreiten der Schutzwirkung mit der vollständigen Dehydratation des chemisch und physikalisch gebundenen Wassers ist ein annähernd linearer Anstieg der Temperatur in der Grenzschicht zu verzeichnen. In Abhängigkeit der Dicke der Brandschutzbekleidung ergibt sich eine unterschiedliche Dauer des Dehydratationsvorganges. Unter Beachtung des Temperaturerhöhungskriteriums nach [2] von $\Delta T \leq 250 \text{ K}$ ist eine vergleichende Bewertung der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Kombinationen von Brandschutzbekleidungen bis zu einer Beanspruchungsdauer von 90 Minuten möglich. Die mittlere Ausgangstemperatur konnte versuchs-übergreifend zu $T_0 \approx 20 \text{ °C}$ ermittelt werden. Die Trägerplatten wiesen bei einer maximal gemessenen Temperatur in der Grenzschicht von $270 \text{ °C} \pm 15 \text{ K}$ bereits sichtbare Verkohlungen in vergleichbarer Intensität auf, wie Abbildung 81 zeigt. Eine Entzündung der Trägerplatte konnte bei diesem Grad der Verkohlungen jedoch nicht festgestellt werden.

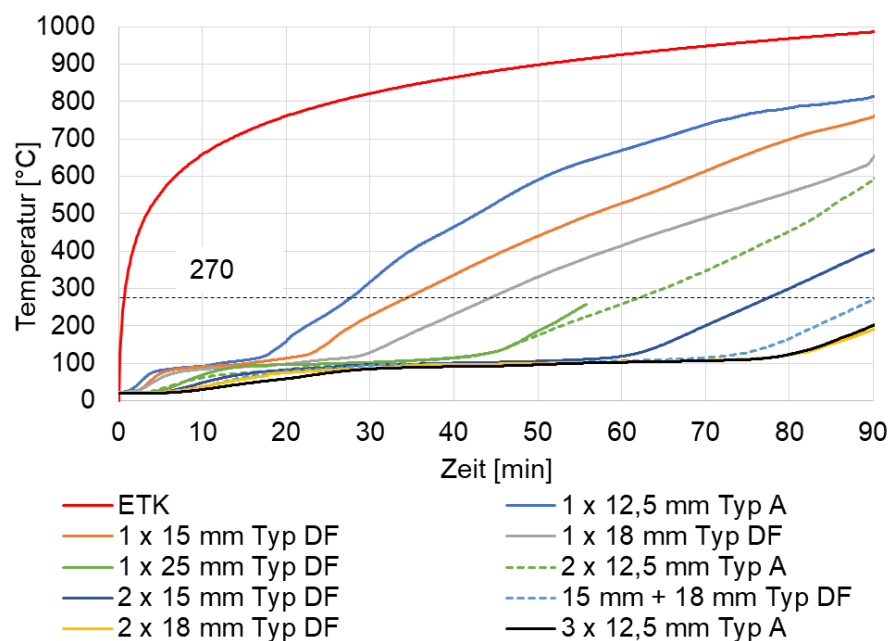


Abbildung 80: Temperaturentwicklung für unterschiedliche Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß ETK

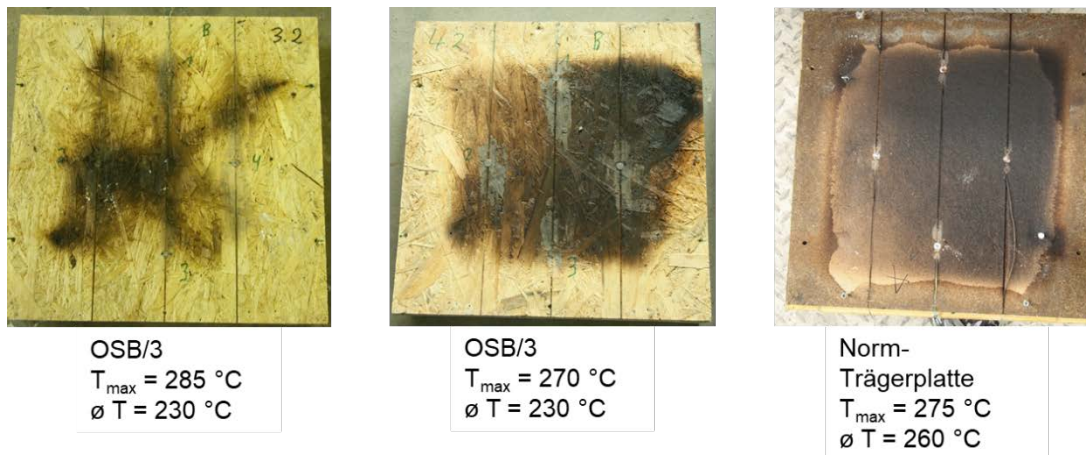


Abbildung 81: Vergleich von Verkohlungsbildern bei unterschiedlicher Trägerplatte nach ETK-Brandbeanspruchung

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse dieser kleinmaßstäblichen Brandversuche aufgrund der Skalierbarkeit und versuchstechnischen Halterung im Brandofen nicht direkt auf den Realmaßstab übertragbar sind. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Großbrandversuche im Realmaßstab sollen vorgenannte Erkenntnisse hierzu bewerten.

Naturbrandbeanspruchung

Gemäß den Eurocodes z. B. DIN EN 1995-1-2 [42] ist bei dem Nachweis unter Naturbrandbeanspruchung die Einhaltung der Leistungskriterien über die gesamte Dauer der Brandbeanspruchungen nachzuweisen. Bei der Beanspruchung durch die Naturbrandkurve ‚Naturbrand_1‘ erfolgte entsprechend die versuchstechnische Betrachtung der Versuchskörper bis alle Messstellen Temperaturen unterhalb 50 °C anzeigten bzw. der Versuch abgebrochen wurde, da kein Selbstverlösch eintrat. Abbildung 82 stellt die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht Brandschutzbekleidung – Trägerplatte für unterschiedliche Bekleidungsstärken dar. Es gilt hier zu beachten, dass ausgenommen die Versuchskörper mit einer Bekleidung aus $2 \times 18 \text{ mm}$ Gipsplatten ein Entzünden der Trägerplatte zugelassen wurde und damit das Selbstverlösch einen stärkeren Untersuchungspunkt darstellt.

Die Umsetzung der Naturbrandkurven im Brandofen nach [54] konnte für die Aufheizphase problemlos erfolgen. In der Abkühlphase musste ein zunehmendes Lösen der Halterung der Versuchskörper stattfinden, um das Auskühlen des Brandraumes zu beschleunigen. Mit dem Lösen der Halterung wurden zusätzliche Heißgase über die Probenöffnung aus dem Brandraum abgeleitet. Sofern die Brandraumtemperatur der Naturbrandkurven $< 100 \text{ °C}$ betrug wurden die Versuchskörper aus der Halterung genommen und vor den Ofen in der Umgebungsluft weiter beobachtet.

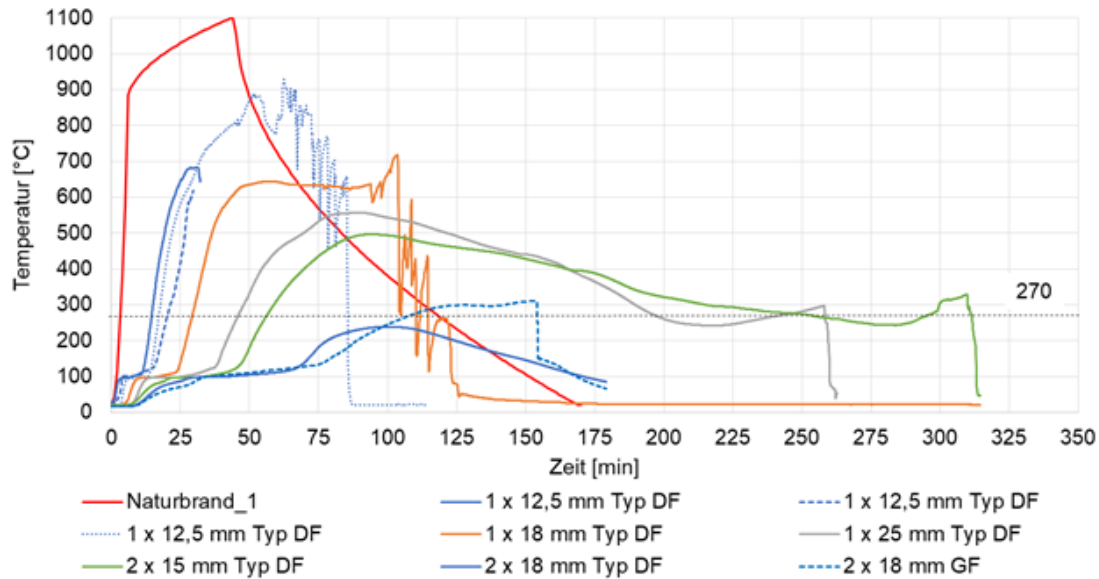
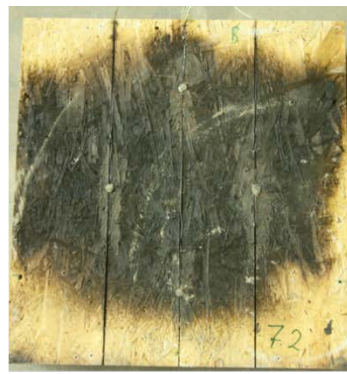


Abbildung 82: Temperaturentwicklung für unterschiedliche Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1



2 x 18 mm Typ DF
 $T_{max} = 250 \text{ °C}$
 $\varnothing T = 240 \text{ °C}$



2 x 18 mm GF
 $T_{max} = 345 \text{ °C}$
 $\varnothing T = 310 \text{ °C}$

Abbildung 83: Vergleich der Verkohlungsbilder bei unterschiedlichen Bekleidungsstärken und Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1

Ein Selbstverlöschen konnte nur für einen Versuchskörper (2 x 18 mm Typ DF) festgestellt werden, siehe Abbildung 83. Die anderen Versuchskörper mussten während der Beobachtungszeit gelöscht werden, da die Trägerplatte sich entzündet hatte und selbstständig weiterbrannte. Als Begründung kann zum einen der Aufbau der Trägerplatte in Massivholzplatte (SWP), welcher einen nicht temperaturbeständigen Kleber verwendete, benannt werden. Dies führte während des Versuches dazu, dass die Stoßfugen der Massivholzplatten sich öffneten. Zum anderen waren die Schmalseiten der Versuchskörper nicht mit Gipsplatten bekleidet. Dadurch konnte kontinuierlich Sauerstoff aus der Umgebungsluft über die geöffneten Fugen und über die Schmalflächen in die Verbrennungszone gelangen.

Mit der Kurve ‚Naturbrand_2‘ wurde nur ein Vergleichsversuch für eine Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm Gipsplatte Typ DF bzw. 2 x 18 mm Gipsfaserplatte durchgeführt. Die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht ist in Abbildung 84 ersichtlich. Infolge der deutlich geringeren Temperaturbeanspruchung sowie thermischen Beanspruchung vergleichend zu Naturbrand_1 (siehe dazu Zeile ‚Integral‘ in Tabelle 2) stellte sich eine mäßige Temperaturerhöhung in der Grenzschicht ein. Die Temperatur in der Grenzschicht lässt zudem darauf schließen, dass die Schutzwirkung der Brandschutzbekleidung bei

dieser Brandbeanspruchung nicht überschritten wurde. Entsprechend waren keine Verkohlungen oder Verfärbungen auf den Trägerplatten erkennbar, wie Abbildung 85 zeigt.

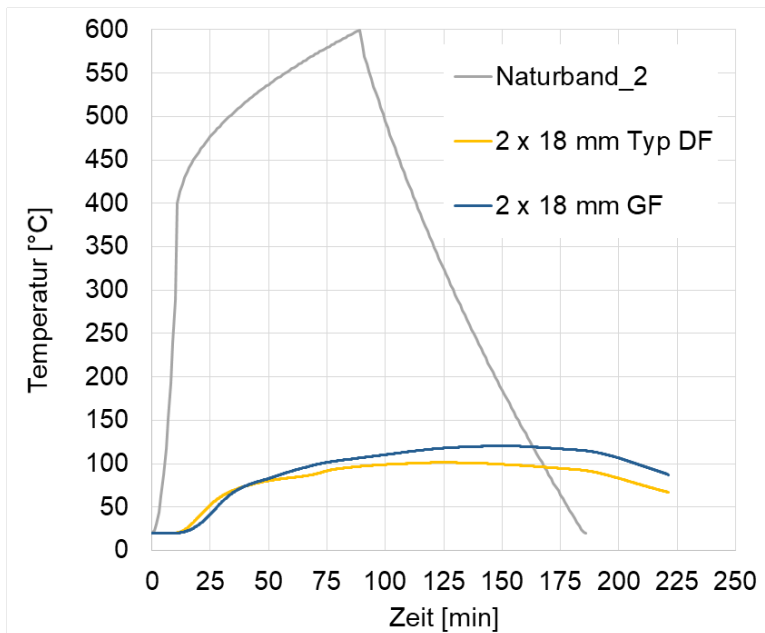


Abbildung 84: Temperaturentwicklung für unterschiedliche Bekleidungstypen in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_2



2 x 18 mm Typ DF
 $T_{max} = 105 \text{ °C}$
 $\varnothing T = 100 \text{ °C}$



2 x 18 mm GF
 $T_{max} = 125 \text{ °C}$
 $\varnothing T = 120 \text{ °C}$

Abbildung 85: Vergleich von Verkohlungsbilder bei unterschiedlicher Bekleidungstypen und Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_2

Abschließend ist zu folgern, dass die Abbildung einer Naturbrandkurve in dem Brandofen nach [54] möglich ist, jedoch mit Abstrichen hinsichtlich der praktikablen Umsetzung in der späten Abkühlphase. Die Größe des Brandraumes führt nach der Beflammung (in der späten Abkühlphase) zu einer sehr starken Einwirkung mittels Wärmestrahlung von den Ofenwänden auf den Versuchskörper, wodurch das Analysieren des Selbstverlöschens technisch bedingt limitiert wird.

Für den selbstverlöschenden Versuchskörper (2 x 18 mm Gipsplatte Typ DF) ist eine Energieäquivalenz hinsichtlich Temperaturentwicklung in der Grenzschicht sowie Grad der Verkohlung der Trägerplatte zu einem identischen Versuchskörper unter 90-minütiger ETK Beanspruchung erkennbar (siehe Abbildung 86 und Abbildung 87). Daraus lässt sich eine Vergleichbarkeit vom Feuerwiderstandverhalten des Bauteils für diese unterschiedlichen Brandbeanspruchungen (ETK – Naturbrand_1) feststellen.

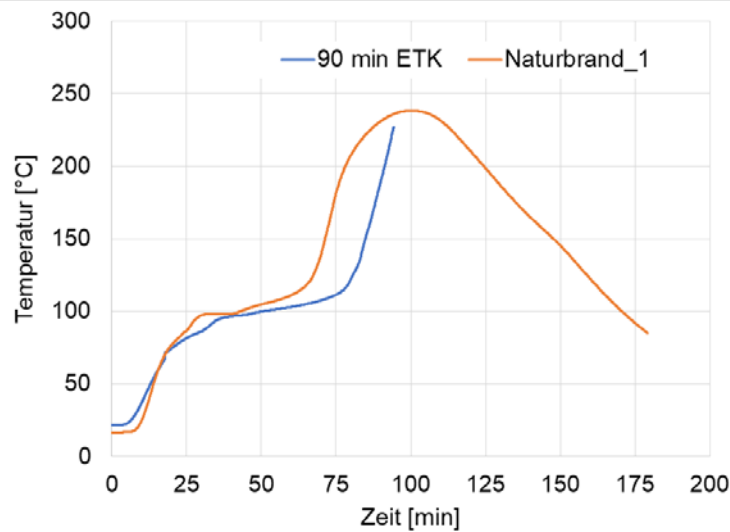


Abbildung 86: Temperaturentwicklung für 2 x 18 mm Typ DF Bekleidungstypen in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1 sowie ETK



2 x 18 mm Typ DF
 $T_{\max} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varnothing T = 225 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 90 min ETK



2 x 18 mm Typ DF
 $T_{\max} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 $\varnothing T = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 Naturbrand_1

Abbildung 87: Vergleich von Verkohlungsbilder für 2 x 18 mm Typ DF Bekleidungstypen in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1 sowie ETK

Vergleich zwischen GF und GKF

Im Folgenden werden die mittlere Temperaturentwicklung sowie das Verkohlungsbild der Trägerplatte unter Beanspruchung durch die ETK analysiert. Die Abbildung 88 zeigt den Vergleich zwischen zwei Kombinationen einer Brandschutzbekleidung aus Gipsfaserplatten als durchgezogene Linien und Gipsplatten Typ DF als gepunktete Linien. Die gemittelte Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutz-bekleidung und Trägerplatte zeigt für beide Bekleidungstypen deutlich die Schutzwirkung infolge der Dehydratation. Ab Überschreiten der Schutzwirkung ist ein annähernd linearer Anstieg der Temperatur in der Grenzschicht zu verzeichnen, welcher für die Gipsfaserplatten (GF) ab diesem Zeitpunkt eine teilweise schnellere Temperaturzunahme zeigt. Dieses ist auf eine größere Neigung zur Rissbildung bei Brandbeanspruchung der GF zurückzuführen, wie die Rissbilder in Abbildung 89 zeigen. Zusammengefasst lässt sich zwischen den Bekleidungsmaterialien Gipsfaserplatten und Gipsplatten Typ DF kein signifikanter Unterschied feststellen, welche eine primäre Verwendung eines bestimmten Bekleidungstypen empfiehlt.

Die Gipsplatte Typ A hingegen zeigte neben einer starken Rissbildung auch ein Herabfallen von Bekleidungsteilen, welches sich negativ auf die Schutzdauer der Bekleidung auswirkt. Entsprechend wird für die Ausbildung einer Brandschutzbekleidung vergleichend zu [50] der Bekleidungstyp Gipsfaserplatte oder Gipsplatte Typ DF empfohlen.

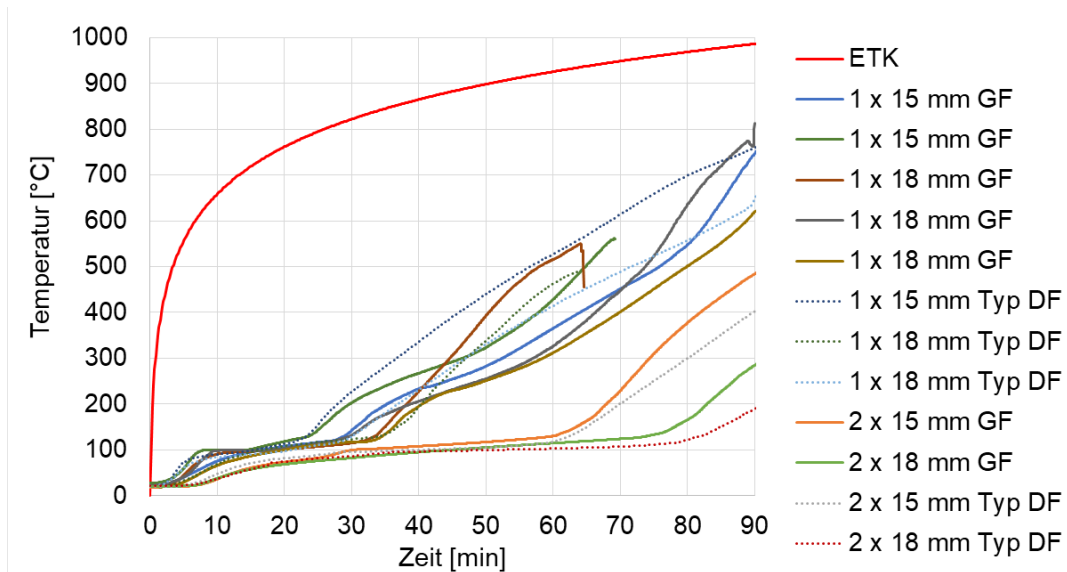


Abbildung 88: Vergleich der Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen GKF und GF

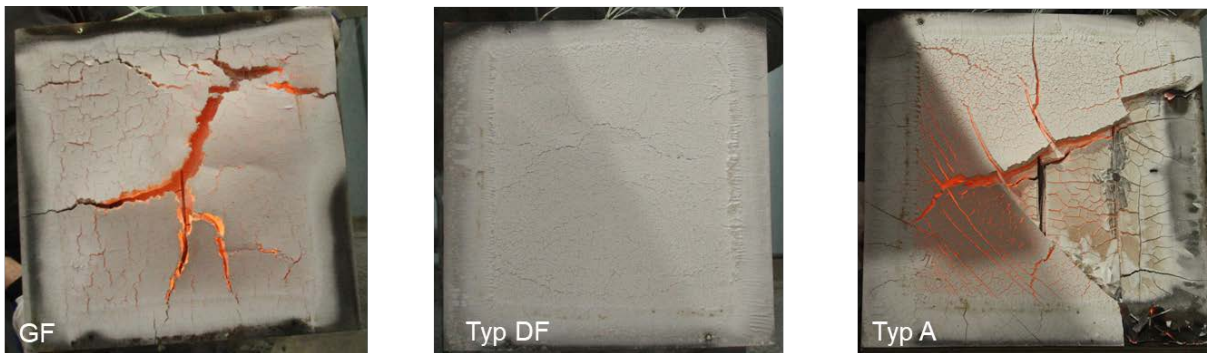


Abbildung 89: Vergleich der Rissbildung unter ETK Beanspruchung kurz nach Beendigung der Beflammung

Temperatureintrag durch Indikator-Schraube / Indikator-Klammer

Erwartungsgemäß ist der Wärmeeintrag durch die Indikator-Schraube höher als durch die Indikator-Klammer, da die Schraube einen größeren Querschnitt vergleichend zur Klammer besitzt. Demnach erfolgte eine Aufzeichnung der Temperaturentwicklung auf der brandabgewandten Seite nur an der Indikator-Schraube die von der beflamnten Lage (2. Lage) bis durch die Trägerplatte verlief. Die Abbildung 90 zeigt den Vergleich der Temperaturentwicklung zwischen der gemessenen Temperatur an der Indikator-Schraube und den Thermoelementen auf der brandabgewandten Seite.

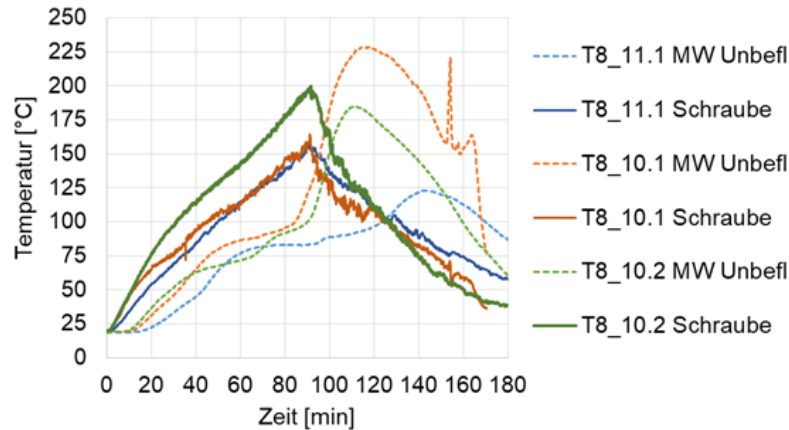


Abbildung 90: Vergleich der Temperaturentwicklung auf der brandabgewandten Seite an der Indikator-Schraube und der Thermoelemente auf der unbeflammten Seite

Anhand der vergleichenden Betrachtung zeigt sich, dass durch die hohe Temperaturleitfähigkeit der Verbindungsmittel (VM) der Temperaturanstieg auf der brandabgewandten Seite schneller erfolgt als der Temperaturzuwachs durch den Versuchskörper. Während der Nacherwärmungsphase, zur 90. Versuchsminute wird die Beflammung beendet, weisen die Temperaturen an der Indikator-Schraube eine deutlich stärker sinkende Temperatur auf. Dagegen steigen die Temperaturen des Versuchskörpers auf der brandabgewandten Seite weiter an.

Die dargestellten Verkohlungsbilder in Abbildung 91 zeigen beispielhaft lokale Verkohlungen bzw. Verfärbungen infolge des Wärmeeintrages durch die Indikator-VM. Im Bereich der Eintrittsstellen auf der Trägerplatte der Indikator-VM waren keine Thermoelemente angeordnet, dementsprechend ist eine Aussage zur Temperaturbeanspruchung, die zu diesen Verkohlungen führt, nicht möglich. Anhand der Verkohlungsbilder aus Abbildung 81, Abbildung 83 und Abbildung 87 lässt sich über den Grad der Verfärbung/Verkohlung ein Temperaturbereich zwischen 200 und 250 °C ableiten.

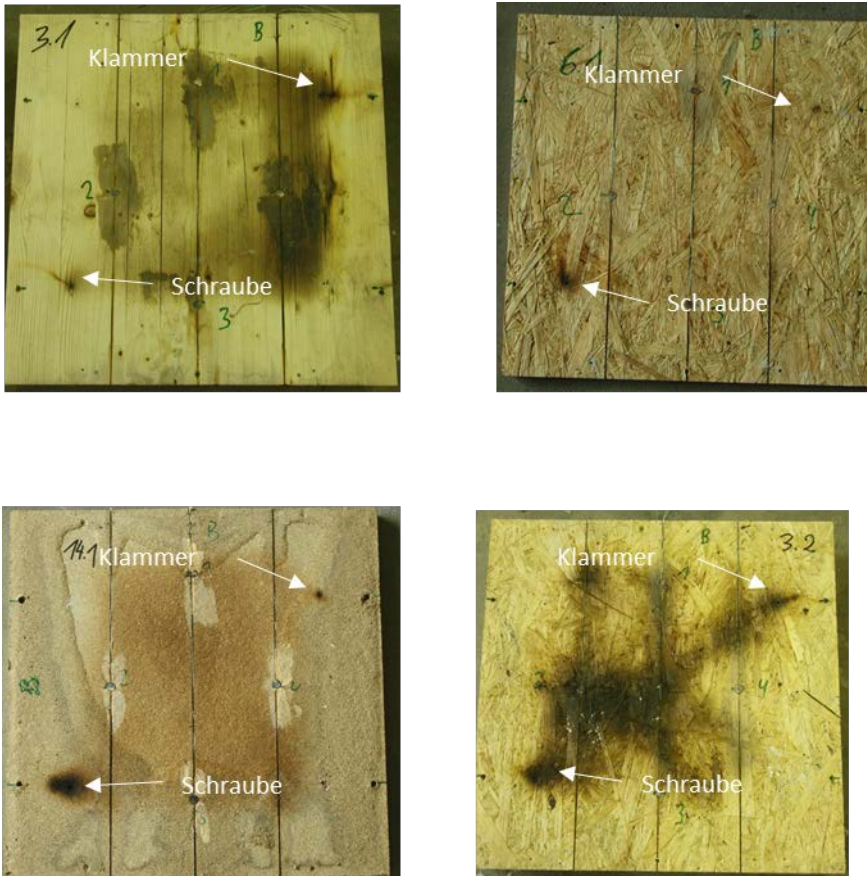


Abbildung 91: Verkohlungsbilder unterschiedlicher Versuchskörper

Vergleichend zu den Untersuchungen [50] und [53] zeigt sich eine Übereinstimmung, dass durch den Wärmeeintrag der VM die Trägerplatte in diesen Bereichen eher zu Verkohlungen führt, gegenüber der ungestörten Fläche bei identischer Intensität der Brandbeanspruchung. Dementsprechend ist bei Anwendung der Klassifizierungskriterien nach [2] aufgrund der lokalen Verkohlung keine Klassifizierung für diese Versuchskörper möglich.

Einfluss der Trägerplatte

Die verschiedenen Trägerplattentypen als auch eine Hinterlegung des Gefachs mit Dämmung zeigen einen Einfluss auf die zeitliche Durchwärmung der Versuchskörper. Mit der Hinterlegung des Gefachs mit Mineralwolle (MiWo, Steinwolleplatten) stellt sich ein Wärmestau ein, welcher den Wärmeabfluss auf die brandabgewandte Seite reduziert. Deutlich sichtbar ist dieser Wärmestau bei den Versuchsdaten für die 15 mm OSB/3 sowie der 42 mm SWP (Fichte) Trägerplatte in Abbildung 92. Die Auswirkung der Stärke der Trägerplatte auf die Durchwärmung ist reziprok proportional dazu zu bewerten, wie in den ersten 30 Versuchsminuten zu erkennen ist. Das Material per se respektive die thermischen Materialeigenschaften sind hierbei nicht von bedeutender Relevanz, da die thermischen Eigenschaften der Trägerplattenarten sich nicht massiv unterscheiden. Als zusätzlichen Einflussfaktor ist das Verhalten der Brandschutzbekleidung (z. B. Rissbildung) in die Betrachtung mit einzubeziehen.

Der Abfall in den Temperaturmessungen in Abbildung 92 zur 90. Minute lässt sich auf das Beenden der Beflammung gemäß ETK und dem Beginn der Nacherwärmungsphase zurückführen. Alle Trägerplatten waren mit einer 2 x 18 mm Gipsfaserplatte geschützt. Die Brandbeanspruchung erfolgte jeweils über 90 Minuten. Hiervon ausgenommen ist ein Versuchskörper ohne Trägerplatte unter 60-minütiger ETK Beanspruchung.

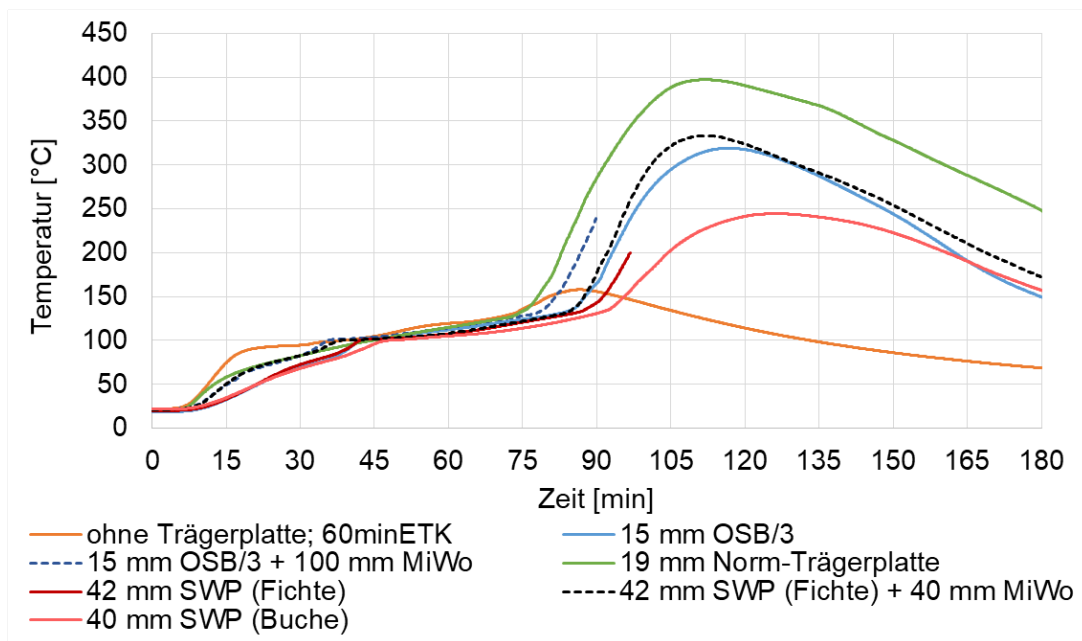


Abbildung 92: Vergleich der Durchwärmung (Grenzschichttemperatur) bei unterschiedlichen Trägerplatten und ggf. Hinterlegung mit MiWo für 2 x 18 mm Bekleidungen unter ETK Beanspruchung

Die in Abbildung 93 dargestellten Verkohlungsbilder für die unterschiedlichen Trägerplatten zeigen einen unterschiedlichen Grad der Verfärbung. Infolge der unregelmäßigeren Oberflächenstruktur der OSB/3-Platte konnte in dieser Versuchsserie eine teilweise stärkere Neigung zur Verfärbung festgestellt werden.

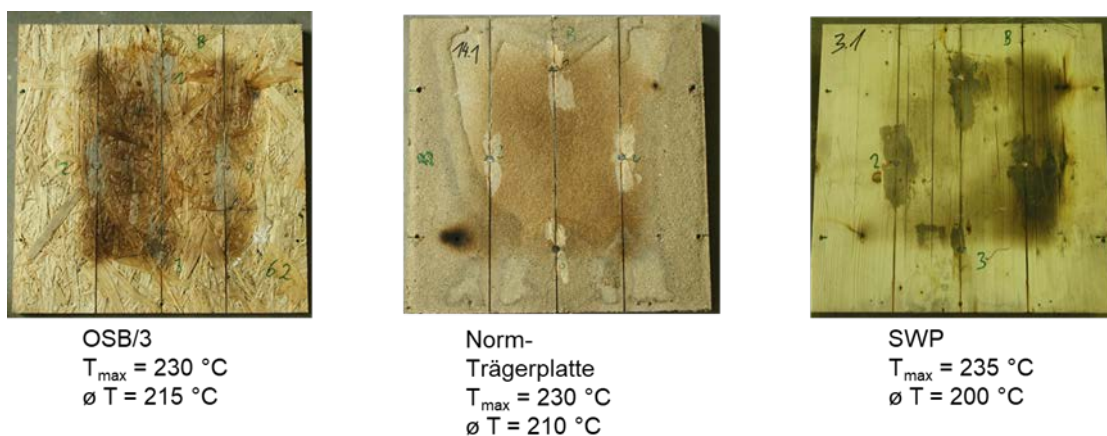


Abbildung 93: Vergleich der Verkohlungsbilder der unterschiedlichen Trägerplatten unter ETK Beanspruchung

Mit der Art der Trägerplatte kann der Wärmeabfluss auf der brandabgewandten Seite beeinflusst werden. Die Verwendung einer Dämmhinterlegung führt zu einer Reduktion der Wärmeabfuhr auf der unbeflammten Seite und zur Bildung eines Wärmestaus aufgrund der deutlich geringeren Temperaturleitfähigkeit gegenüber den Trägerplatte oder Bekleidungsmaterialien. Die Messdaten der Bauteiltemperaturen aus den Großbrandversuchen in Kapitel III 3.1.2.8 und den Belegversuchen in Kapitel III 3.1.2.12 bestätigen diese Erkenntnisse.

Zusammenfassung

Die Schutzwirkung der gipsbasierten Brandschutzbekleidungen, infolge der Dehydratation des chemisch und physikalisch gebundenen Wassers, zeigt in diesem Maßstab keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Gipsfaserplatte und der Gipsplatte Typ DF oder Typ A. Für die Kombination von

mehrlagigen gegenüber einlagigen Brandschutzbekleidungen konnte in diesen Versuchen eine höhere Leistungsfähigkeit ermittelt werden. Als maßgebender Einflussparameter einer Brandschutzbekleidung unter Brandbeanspruchung ist jedoch die Gesamtdicke zu nennen.

In Bezug auf die Rissbildung der Bekleidung konnte ein deutlich unterschiedliches Verhalten der Bekleidungsstypen festgestellt werden. Die Gipsfaserplatte neigte zur massiven Rissbildung und Wölbung der gerissenen Bekleidungsteile in den Brandraum, während die Gipsplatte Typ DF nur gleichmäßig über die beflamnte Oberfläche verteilte Haarrisse aufwies. Die Gipsplatte Typ A hingegen zeigte neben einer starken Rissbildung auch ein Herabfallen von Bekleidungsteilen. Entsprechend wird für die Ausbildung einer Brandschutzbekleidung der Bekleidungsstyp Gipsfaserplatte oder Gipsplatte Typ DF empfohlen. Bei einer Betrachtung des Einflusses der Rissbildung unter Naturbrandbeanspruchung führt eine starke Rissbildung zu einer schnelleren Durchwärmung in der Aufheizphase aber auch zu einer zügigeren Temperaurabgabe in der Abkühlphase.

Unter Beanspruchung durch die ETK konnte für unterschiedliche Kombinationen von Brandschutzbekleidungen die Leistungsfähigkeit, in Form des Schutzes vor einer Entzündung und dem selbstständigen Weiterbrennen der geschützten Trägerplatte, ermittelt werden. Grundsätzlich wurde hierzu festgestellt, dass bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 270 °C sichtbare Verkohlungen, jedoch kein Entzünden der Trägerplatte, auftraten. Für eine Auslegung der Brandschutzbekleidung, mit dem Ziel eine Entzündung der Trägerplatte unter Brandbeanspruchung durch die ETK zu verhindern, konnten folgende Kombinationen festgestellt werden. Für die Bewertung folgte ein Heranziehen der normativen Leistungskriterien der Temperaturbegrenzung nach [2].

- 90 min ETK → 2 x 18 mm (36 mm) bzw. 15 mm + 18 mm (33 mm),
- 60 min ETK → 2 x 15 mm (30 mm) bzw. 1 x 25 mm und
- 30 min ETK → 1 x 18 mm.

Sichtbare Verfärbungen traten bereits ab einer Grenzschichttemperatur von 200 °C in der ungestörten Fläche auf. Im Bereich von Verbindungsmittel waren hier teilweise bereits Verkohlungen festzustellen. Die Art bzw. die Struktur der Trägerplatte weist eine leicht unterschiedliche Neigung zu Verfärbungen und Verkohlungen auf. Die Oberflächenstruktur der OSB/3 Trägerplatte zeigte eine stärkere Neigung zur Verfärbung/Verkohlung gegenüber Norm-Trägerplatte (Spanplatte, Baustoffklasse B2).

Die Untersuchungen bei Naturbrandbeanspruchung zeigten ein Verhindern der Entzündung der Trägerplatte bei einer Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm Gipsplatten, wobei die Trägerplatte hierbei zum Teil Verfärbungen und Verkohlungen aufwies. Eine Äquivalenz hinsichtlich Temperaturentwicklung in der Grenzschicht sowie dem Grad der Verkohlung der Trägerplatte zu einem identischen Versuchskörper unter 90-minütiger ETK Beanspruchung ist erkennbar. Daraus lässt sich eine Vergleichbarkeit vom Feuerwiderstandsverhalten des Bauteils für diese unterschiedlichen Brandbeanspruchungen (ETK – Naturbrand_1) ableiten. Für die weitere Auslegung der Brandschutzbekleidung in den großmaßstäblichen Brandversuchen wird die Kombination von 2 x 18 mm als zielführend angenommen.

Innerhalb des Nachbrandverhaltens bzw. Abkühlphase war ein Selbstverlöschen des Versuchskörpers nur in den Fällen zu beobachten, sofern die Trägerplatte nicht entzündete und selbstständig weiterbrannte. Es sei hierbei anzumerken, dass die Analyse eines Selbstverlöschens in diesen Versuchen technisch bedingt (u. a. Brandraumgröße, Konstruktion der Versuchskörper) limitiert ist. Entsprechend ermöglichen diese Versuchsergebnisse keine zuverlässige Aussage zum Nachbrandverhalten bzw. Selbstverlöschen.

3.1.2.4 Brandversuche zum Nachbrandverhalten und Selbstverlöschen

Zur Untersuchung des Nachbrandverhaltens von Holz wurden zunächst Laborbrandversuche im Cone-Kalorimeter in Anlehnung an ISO 5660-1 [77] durchgeführt. Die Holzprobekörper (100 mm x 100 mm x 50 mm hoch) wurden mit einem elektrischen Heizstrahler erwärmt. Während der Versuchsdurchführung war es möglich kontinuierlich die Probekörpertemperaturen und -massen sowie die Rauchgaszusammensetzung aufzuzeichnen. Eine gleichzeitige Aufzeichnung der Probekörpermasse und -temperaturen ist nicht möglich, da die Steifigkeit der Drähte der Thermolemente die Massenaufzeichnung beeinflusst. Die folgenden dargestellten Temperatur- und Masseverläufe basieren auf mehreren Durchführungen mit identischen Versuchsparametern und -abläufen. Entsprechend der möglichen Einbausituationen von Holz wurden

- ungeschützte Holzprobekörper (Abbildung 94) und
- anfänglich durch eine Gipsfaserplatte geschützte Holzprobekörper (Abbildung 98)

unterschieden.

Ungeschützte Holzprobekörper

Die ungeschützten Holzprobekörper wurden aus Konstruktionsvollholz Fichte/Tanne (mittlere Dichte 406 kg/m^3 , $u = 12 \text{ M.-%}$) zugeschnitten und mit unterschiedlichen Wärmestromdichten zwischen 5 kW/m^2 bis 60 kW/m^2 direkt bestrahlt. Die angegebenen Wärmestromdichten sind die Kalibrierungswerte auf der Probekörperoberfläche. Bei ausreichender Bildung von Pyrolysegasen wurde durch einen elektrischen Zündfunken ein Flammenbrand ausgelöst. Nach einer vorher festgelegten Begrenzung der Massenabnahme um 10, 30 oder 50 M.-% des Holzprobekörpers wurde die Wärmebestrahlung beendet und der weitere Verlauf des Brandes untersucht. Dabei wurden die Rauchgase (Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid, Kohlenstoffdioxid) analysiert und der Massenverlust des Probekörpers aufgezeichnet. Außerdem wurden fünf Temperaturmessstellen in der vertikalen Mittelachse des Probekörpers in 5, 15, 25, 35 und 45 mm Tiefe im Holz angeordnet.

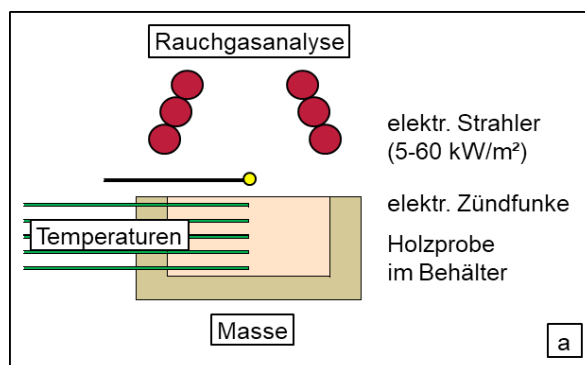


Abbildung 94: Versuchsaufbau (links) und Durchführung (rechts) ungeschützter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter

Ein typischer Versuchsverlauf ist in Abbildung 95 dargestellt. Auf allen Probekörpern fanden Flammenbrände statt, welche entweder aufgrund einer sich bildenden Holzkohleschicht oder innerhalb von 1 bis 2 Minuten nach Abschalten des Heizstrahlers selbstständig erloschen. Bereits 2 bis 3 Minuten nach Abschalten des Heizstrahlers betrug die Massenänderungen des Holzes weniger als 1 g/min , das entspricht weniger als $0,5 \text{ M.-%/min}$. Da die Temperaturaufzeichnung zu diesem Zeitpunkt noch Temperaturen über 300°C feststellte, wurde die Massenänderung als ungeeignetes Kriterium zur Bewertung eines Selbstverlöschens identifiziert. Die Temperaturaufzeichnungen dokumentieren außerdem ein Abkühlen der Probekörper auf unter 50°C nach 78 bis 113 Minuten. Trotz dieser langen Abkühlphase ist der nachträgliche Holzabbrand, nach dem Abschalten des Heizstrahlers, bei allen Versuchen geringer als 13 mm.

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

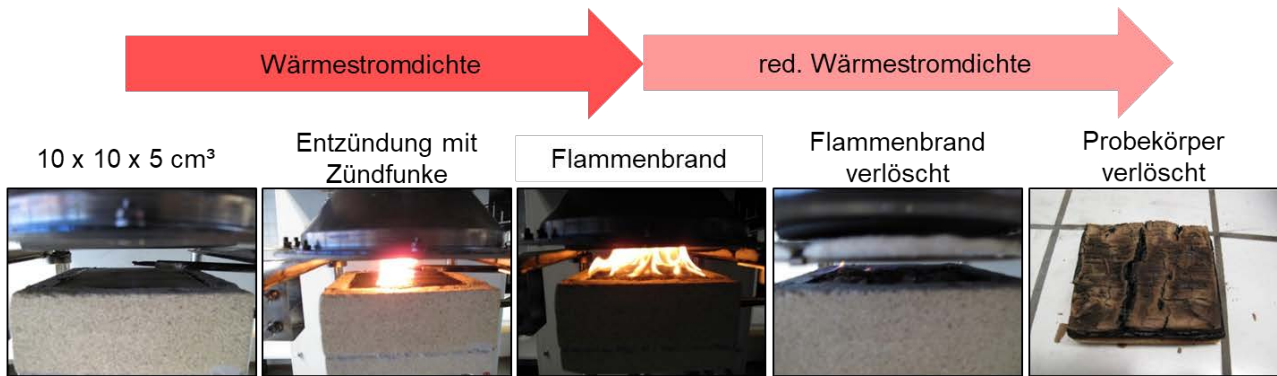


Abbildung 95: Versuchsverlauf eines ungeschützter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter

In Abbildung 96 werden wesentliche Erkenntnisse dieser Untersuchungen dargestellt. Verschiedene Probekörper wurden mit Wärmestromdichten von 20 kW/m² (dunkelblau), 40 kW/m² (orange) oder 60 kW/m² (hellblau) beansprucht. Wenn die Probekörpermasse von 100 M.-% auf 70 M.-% abgenommen hat, wurde die thermische Beanspruchung abgeschaltet (red. Wärmestromdichte = 0 kW/m²). Dieser Zeitpunkt ist jeweils mit einer senkrechten Strichlinie markiert. Die Kohleschichtbildung betrug zum Zeitpunkt der Abschaltung jeweils circa 2 cm, daher werden zur besseren Übersicht nur die Temperaturen der Messstellen in 15 mm und 25 mm Tiefe im Probekörper dargestellt. Die Temperaturaufzeichnungen dokumentieren ein vergleichbares Abkühlen dieser Probekörper auf unter 50 °C nach 80 Minuten, beziehungsweise unter 30 °C nach 130 Minuten.

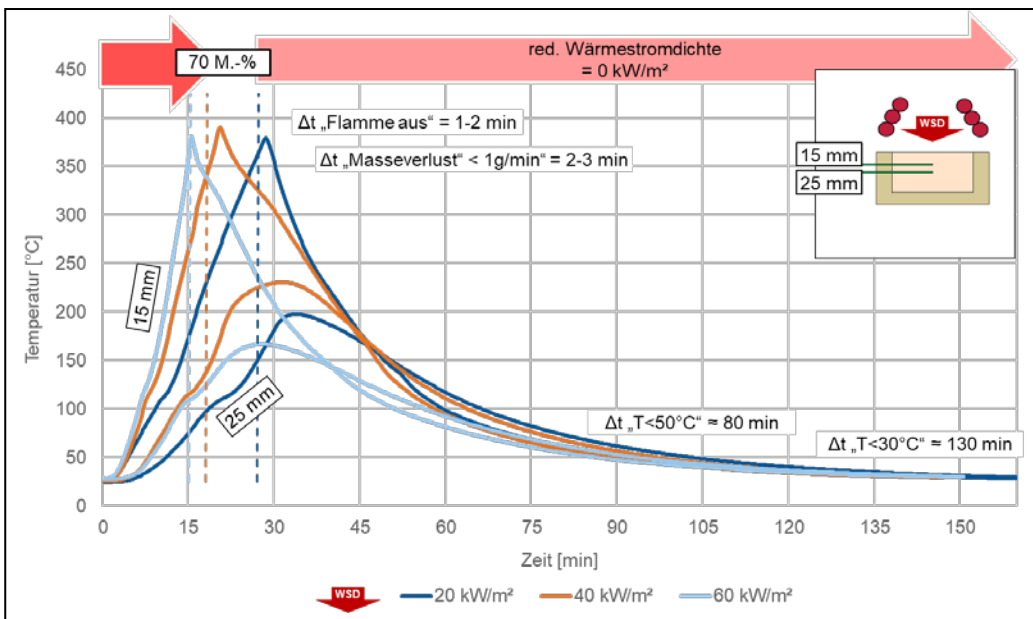


Abbildung 96: Temperaturverlauf der offenen Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter, Messstellen 15 mm und 25 mm im Probekörper, verschiedene Wärmestromdichte bis jeweils 70 M.-% Holzprobe, anschließend keinen weiteren, reduzierten Wärmestrom

Alle nach diesem Schema durchgeführten Brandversuche verlöschten selbstständig. In weiteren Versuchen wurde nach dem Abbrand auf 70 M.-% Holz, anstelle der vollständigen Abschaltung der Wärmestromdichte (0 kW/m²), eine reduzierte Wärmestromdichte von 5 kW/m² bzw. 10 kW/m² eingestellt, um den Einfluss eines reduzierten Wärmeintrags auf das Selbstverlöschten zu untersuchen. In Abbildung 97 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Die reduzierte Wärmestromdichte (5 bis 60 kW/m²), anstelle der vollständigen Abschaltung (0 kW/m²), unterstützt den Flammen- oder Schmelbrand und verzögert ein Selbstverlöschten der Holzprobekörper. In keinem Versuch mit reduzierten Wärmestromdichten ab 5 kW/m² konnte ein Abkühlen der Probekörper auf < 50°C festgestellt werden. Die Versuche wurden stets 60 Minuten nach dem Unterschreiten der vorher festgelegten Masseänderung von < 1g/min (entspricht ca. < 0,5 M.-%) abgebrochen.

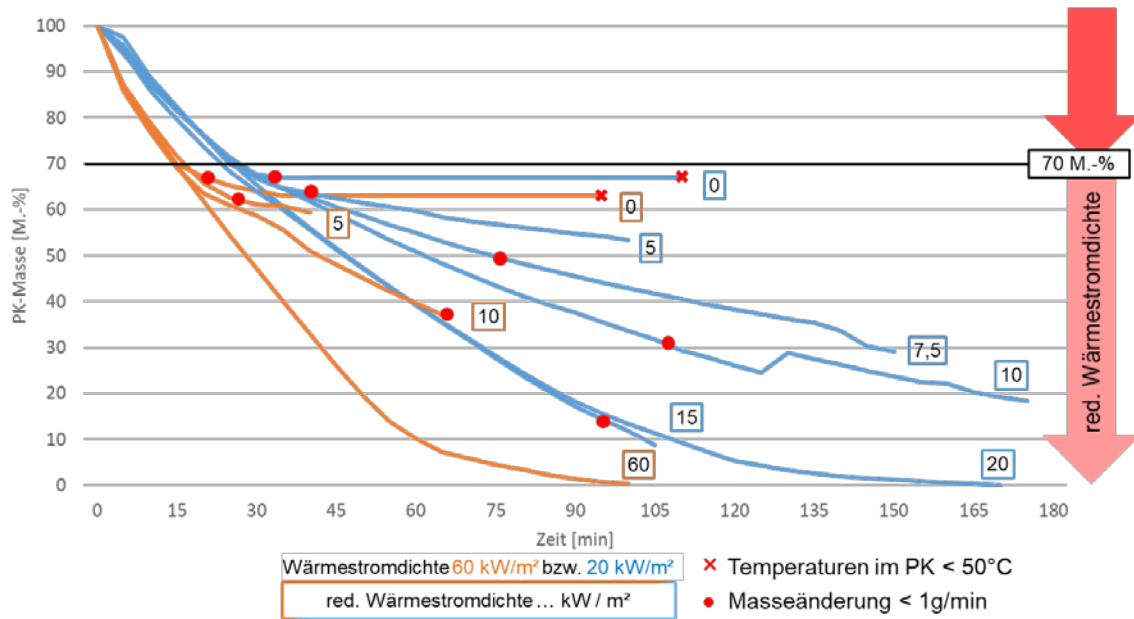


Abbildung 97: Probekörpermasse nach dem Abschalten (0 kW/m²), bzw. Reduzieren der Wärmestromdichte

Anfänglich geschützte Holzprobekörper

Der unter einer 12,5 mm Gipsfaserplatte anfänglich geschützte Holzprobekörper wurde mit einer Wärmestromdichte von 75 kW/m² auf der Oberseite der Gipsfaserplatte für 60 Minuten bestrahlt, der Versuchsaufbau ist in Abbildung 98 dargestellt. Aufgrund des Einflusses der Gipsfaserplatte wurde auf die Rauchgas- und Massenaufzeichnung verzichtet, die Anordnung der Temperaturmessstellen im Holz entspricht denen der ungeschützten Holzprobekörper. Untersucht wurden in dieser Anordnung das Nachbrandverhalten von Nadel- und Laubvollhölzer sowie OSB und Spanplatten.

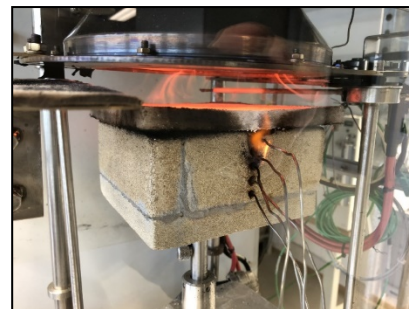
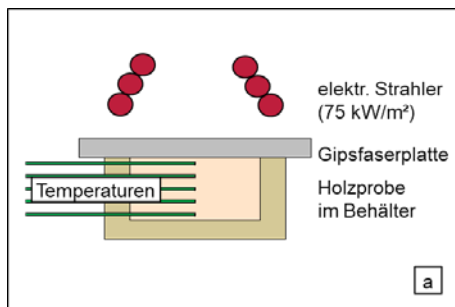
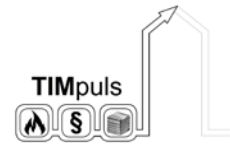


Abbildung 98: Versuchsaufbau (links) und Durchführung (rechts) bekleideter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter

Das Abschalten des Heizstrahlers erfolgte nach 60 Minuten. Die oberste Temperaturmessstelle, 5 mm tief im Holz unter der Gipsfaserplatte, zeichnete zu diesem Zeitpunkt Temperaturen von 550 bis 620 °C auf. Die Oberflächen der Holzprobekörper waren zu diesem Zeitpunkt bereits stark verkohlt. Auf das Abschalten des Heizstrahlers folgte stets eine kurze Nacherwärmung des Holzprobekörpers, aufgrund der Wärmespeicherung in der Gipsfaserplatte und Holzkohleschicht und der verzögerten Durchwärmung des Probekörpers. Diese Nacherwärmung verlief bei einlagig abgedeckten Probekörpern über 10 bis 15 Minuten. Anschließend kühlten alle Probekörper vollständig ab. Die vollständige Abkühlung der Probekörper auf unter 50 °C erfolgt nach 119 bis 176 Minuten. Der nachträgliche Holzabbrand, bzw. die weitere Verkohlung der Holzprobe in der Abkühlphase, nach dem Abschalten des Heizstrahlers, war bei keinem Versuch größer als 10 mm.



Nach dem Abschalten des Heizstrahlers wurden keine Flammen- oder Glimmbrände unter den Gipsfaserplatten festgestellt. Die Versuchsergebnisse im Labormaßstab deuten somit darauf hin, dass flächige Holzwerkstoffe unterhalb einer Bekleidung infolge ihrer Entzündung zum Selbstverlöschen ohne Glimmbrände neigen. Diese Untersuchungen sind für realmaßstäbliche Holztafelelemente, aufgrund ihrer vergleichsweise aufwändigen Branddetektion und -bekämpfung, von besonderem Interesse. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Untersuchungen im Cone-Kalorimeter im Labormaßstab nicht alle Einflussgrößen eines realen Brandes berücksichtigen. Die Beobachtungen werden daher in großmaßstäblichen Brandversuchen, unter Berücksichtigung weiterer konstruktiver Einflüsse, beispielsweise den Plattenfugen der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidungen und der Holzwerkstoffplatten, weiter untersucht.

Die derzeit in der Gebäudeklasse 4 erforderliche, brandschutztechnisch wirksame Bekleidung hat die Anforderung zu erfüllen, dass eine Entzündung, Verkohlung und thermische Verfärbung der tragenden Holzbauteile nicht auftreten darf. Infolge dieser Schutzfunktion werden in der Praxis Feuerwiderstandsdauern von mehr als 90 Minuten erreicht. Dies bedeutet für die GK 4 eine deutliche Überbemessung hinsichtlich der Tragfähigkeit im Brandfall. Die positiven Erfahrungen der letzten Jahre und bei Nachweis einer ausreichenden Rauchdichtigkeit der Bauteile und Bauteilanschlüsse kann diese Anforderung durchaus reduziert werden und wird in weiterführenden Auswertungen aus den Projektergebnissen durchgeführter Brandversuche genauer bewertet

3.1.2.5 Experimentelle Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens von Holz

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse der Literaturrecherche werden weitere Untersuchungen im Rahmen von Versuchen zum thermomechanischen Verhalten von Holz durchgeführt. Hierbei sollen neue Erkenntnisse -besonders zur Reversibilität – gewonnen werden, da hier ein großes Potenzial für die Bewertung der Tragfähigkeit von Holzbauteilen gesehen wird, welche ein reales Brandereignis erfahren haben und sich dann die Frage der Tragfähigkeit des durchwärmten, aber nicht abgebrannten Bereiches stellt.

Kurzbeschreibung der Versuche

Bei der Beschaffung und Herstellung der Probekörper wird auf eine möglichst repräsentative Streuung der Rohdichte und die damit einhergehende Festigkeit geachtet. Die ausgewählte Holzart für die Versuche ist Fichte. Das für die Probekörper verwendete Holz soll möglichst homogen sein. Besonders Unstetigkeitsstellen, wie z.B. Äste und Einschlüsse, sollen vermieden werden. Eine visuelle Prüfung der Probekörper auf Fehlstellen wird vor der Prüfung durchgeführt.

Die zu untersuchenden, mechanischen Eigenschaften sind die Biege- und Druckfestigkeit. Die vorgesehenen Versuche sind in Anlehnung an die DIN EN 408 [153] geplant, vgl. Abbildung 99 und Abbildung 100. Für die thermische Beanspruchung werden mehrere Temperaturstufen bis annähernd 200°C für verschiedene Versuchsreihen vorgesehen. Die Erwärmung der Holzproben erfolgt im Ofen ohne mechanische Beanspruchung. Zur Kontrolle der Temperatur im Probekörper werden vorab Erwärmungsversuche durchgeführt und die erforderliche Erwärmungszeit ermittelt.

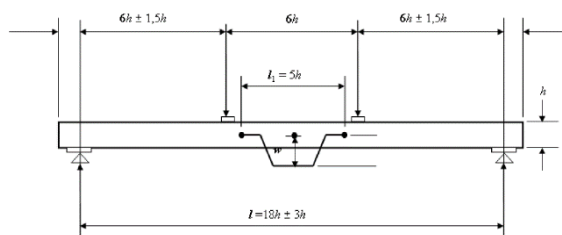


Abbildung 99: Schematischer Aufbau der Biegeprüfung nach DIN EN 408

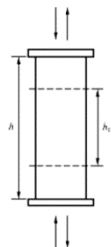


Abbildung 100: Schematischer Aufbau der Druckprüfung nach DIN EN 408

Je nach Versuchsreihe werden die Probekörper entweder im warmen oder im abgekühlten Zustand im Prüfstand auf deren mechanische Eigenschaften geprüft. Für die Prüfung im warmen Zustand muss der Erhalt der Temperaturstufe für den Zeitraum der Prüfung sichergestellt werden. Hierfür wird eine entsprechende Vorrichtung um den mechanischen Prüfaufbau errichtet, vgl. Abbildung 101.



Abbildung 101: Aufbau des Prüfstandes mit der Thermobox

Für den Druckversuch werden Probekörper mit einem Querschnitt von 35 mm auf 35 mm und einer Länge von 210 mm benutzt. Ein Stabilitätsversagen sollte hierbei ausgeschlossen sein. Für die Biegeversuche ist der Querschnitt der Probekörper mit 35 mm auf 70 mm und einer Länge von 630 mm gewählt. Die Biegeversuche werden als Vier-Punkt-Biegung durchgeführt. Bei allen Versuchen soll das Versagen bei annähernd 300s erfolgen. Gemessene Werte sind die aufgebrachte Kraft bis zum Versagen und der zurückgelegte Maschinenweg.

Auswertung der Druckversuche

Wie in Tabelle 12 ablesbar, ist bei den durchgeführten Versuchen die festgestellte Abminderung der Druckfestigkeit bei steigenden Materialtemperaturen deutlich geringer als die angegebenen Werte der DIN EN 1995-1-2 [42]. Weil bei der Herstellung der Probekörper besonders auch ein nahezu fehlerfreies Holz geachtet wurde, kann dies zu den besseren Werten führen. Die Werte der abgekühlten Probekörper weisen nach 24 Stunden sogar eine erhöhte Festigkeit gegenüber der Referenztemperatur von 20 °C auf. Dies scheint sich auf dem Einfluss der Trocknung des Holzes zu ergeben.

Tabelle 12: Ergebnisse der Druckprüfungen in Abhängigkeit der Temperatur

Temperatur °C	Prüfung bei Temperatur		Prüfung nach 24h Abkühlung	
	Mittlere Druckfestigkeit N/mm ²	Prozentuales Verhältnis zur Referenztemperatur	Mittlere Druckfestigkeit N/mm ²	Prozentuales Verhältnis zur Referenztemperatur
20	36,54	100 %	-	-
60	30,38	83 %	-	-
90	28,17	77 %	-	-
105	30,59	84 %	-	-
120	33,34	91 %	41,30	113 %
150	32,75	90 %	40,93	112 %
180	28,48	78 %	37,95	104 %
210	27,31	75 %	39,83	109 %

In Abbildung 102 und Abbildung 103 sind die Verläufe der Mittelwerte der gemessenen Druckfestigkeit für die einzelnen Temperaturstufen dargestellt. Der Mittelwert wurde immer anhand von Messungen an 10 Prüfkörpern je Messstufe ermittelt. In Abbildung 102 sind die Prüfungen bei der entsprechenden

Zieltemperatur durchgeführt worden, also erfolgte die Messung im warmen Zustand. In Abbildung 103 sind dagegen die Prüfungen nach einer 24-stündigen Abkühlung enthalten. Hier werden die Probekörper auf die gewünschte Materialtemperatur erhitzt, danach bei Raumtemperatur abgekühlt und nach 24 Stunden im kalten Zustand getestet.

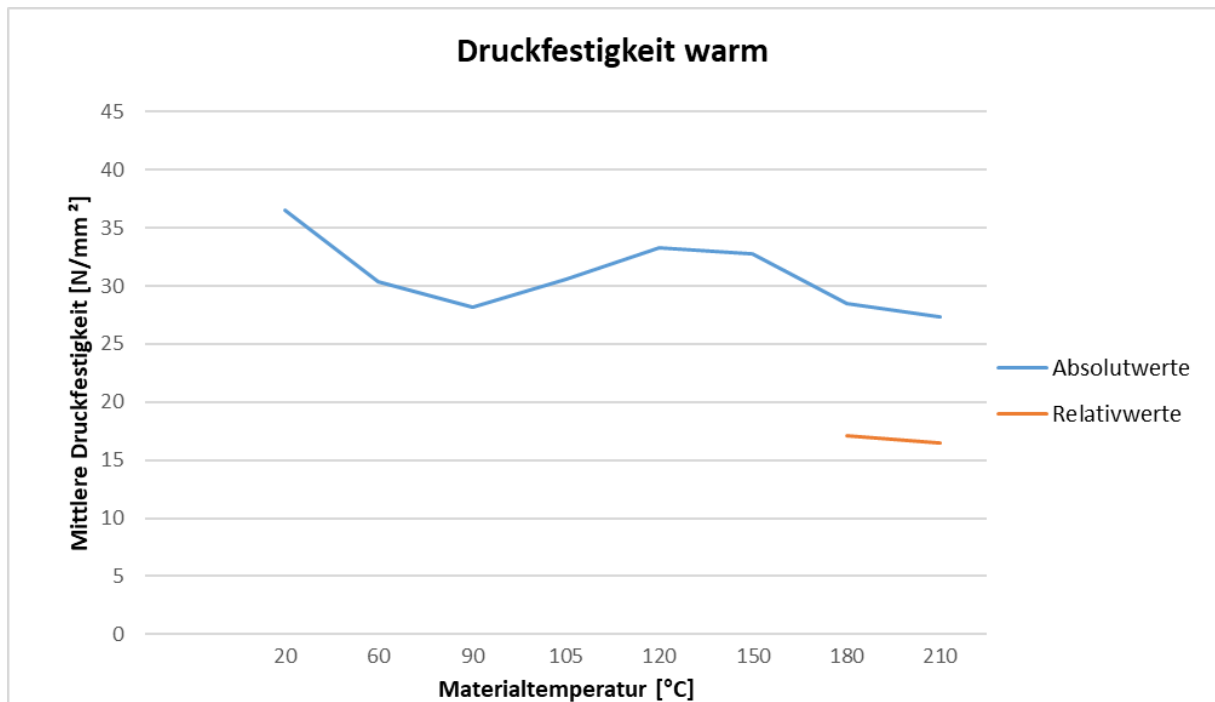


Abbildung 102: Darstellung der gemessenen Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur

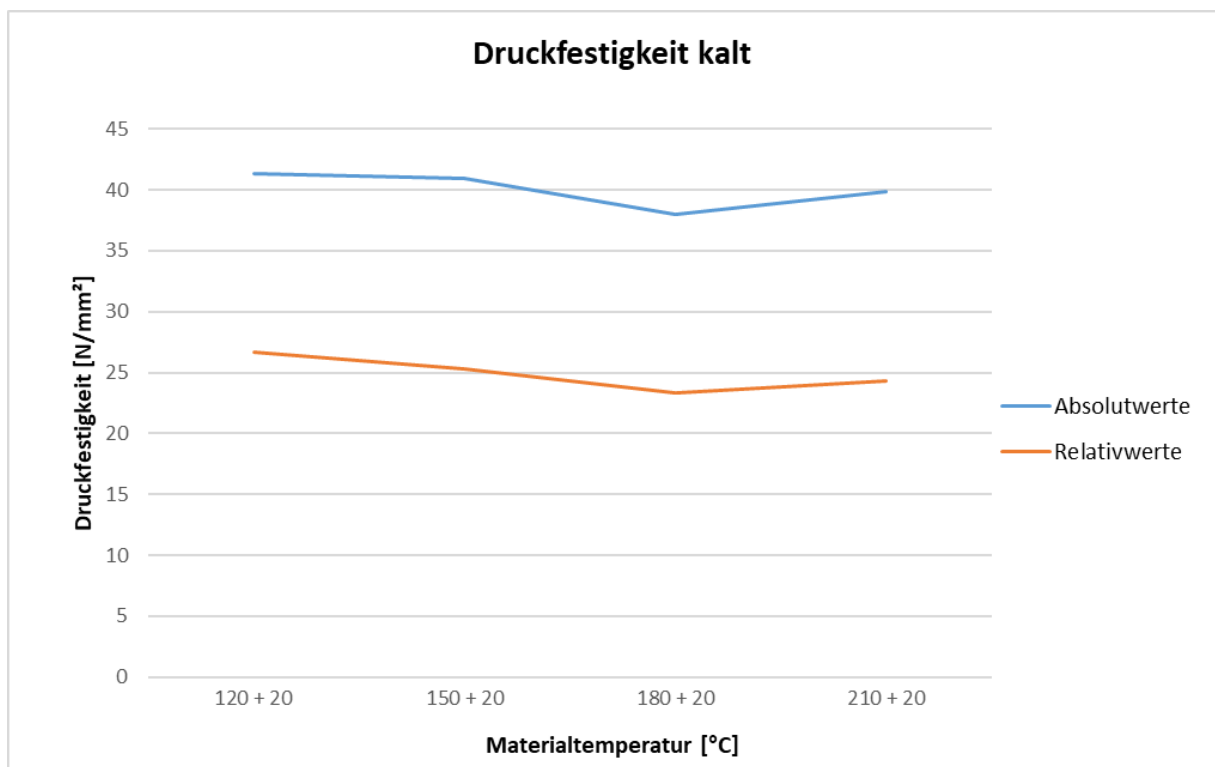


Abbildung 103: Darstellung der gemessenen Druckfestigkeit für die wiederabgekühlten Probekörper in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung

Auswertung der Biegeversuche

In Tabelle 13 sind die gemessenen Mittelwerte der Biegeprüfungen zusammengefasst. Bei steigenden Materialtemperaturen ist eine Reduzierung der Biegefestigkeit erkennbar. Kühlt sich der erwärmte Bereich wieder ab, ist ein teilweise reversibler Prozess erkennbar.

Tabelle 13: Ergebnisse der Biegeprüfungen in Abhängigkeit der Temperatur

Temperatur °C	Prüfung bei Temperatur		Prüfung nach 24h Abkühlung	
	Mittlere Biegefestigkeit N/mm ²	Prozentuales Verhältnis zur Referenztemperatur	Mittlere Biegefestigkeit N/mm ²	Prozentuales Verhältnis zur Referenztemperatur
20	62,4	100 %	-	-
60	47,7	76 %	-	-
90	46,4	74 %	66,1	100 %
105	44,7	72 %	64,8	98 %
120	40,1	64 %	56,8	86 %
150	36,2	58 %	50,2	76 %
180	38,8	62 %	51,5	78 %
210	26,9	43 %	44,3	67 %

In Abbildung 104 und Abbildung 105 sind die Verläufe der Mittelwerte der gemessenen Biegefestigkeit für die einzelnen Temperaturstufen dargestellt. In Abbildung 104 sind die Prüfungen bei der entsprechenden Zieltemperatur durchgeführt worden, also erfolgte die Messung im warmen Zustand. In Abbildung 105 sind dagegen die Prüfungen nach einer 24-stündigen Abkühlung enthalten. Hier werden die Probekörper auf die gewünschte Materialtemperatur erhitzt, danach bei Raumtemperatur abgekühlt und nach 24 Stunden im kalten Zustand getestet.

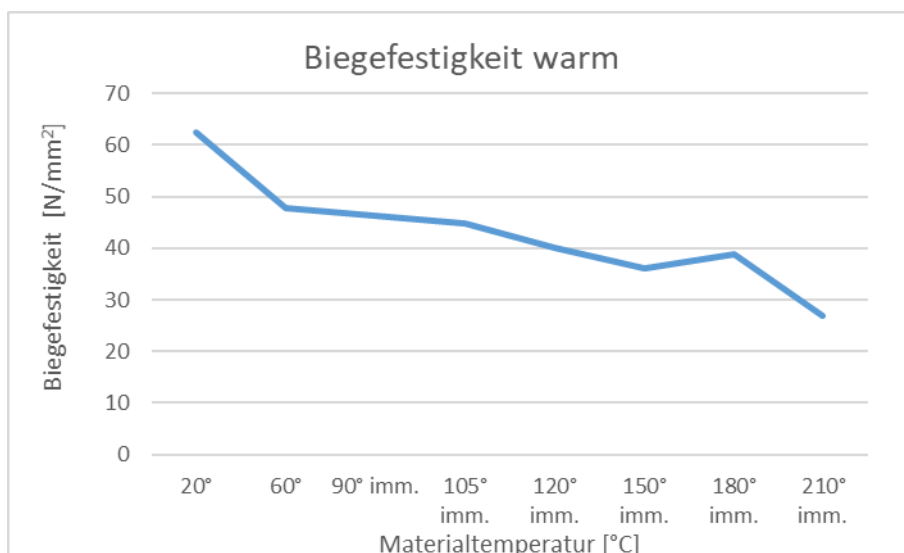


Abbildung 104: Darstellung der gemessenen Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur

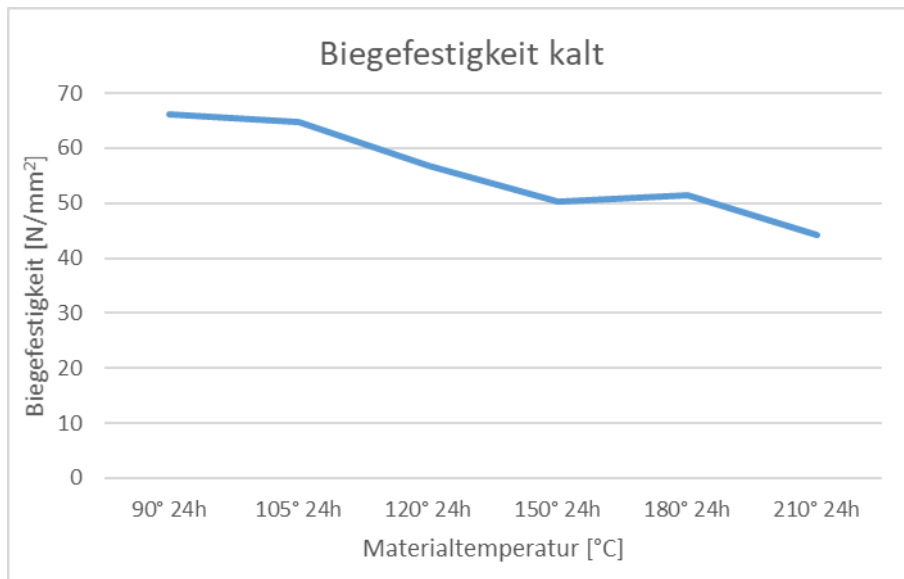


Abbildung 105: Darstellung der gemessenen Biegefestigkeit für die wiederabgekühlten Probekörper in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung

Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen

Aus den durchgeführten Versuchen zum thermomechanischen Verhalten der Druck- und Biegefestigkeit von Holz haben sich folgende Punkte als Erkenntnis herausgestellt.

- Grundsätzlich führt die Erhöhung der Materialtemperatur des Baustoffes Holz zu einer Reduzierung der Festigkeit.
- Im betrachteten Temperaturbereich sind die Verluste an Festigkeit zum größten Anteil reversibel.
- Die gewonnenen Ergebnisse stimmen mit den Erkenntnissen aus der Literatur überein.
- Bei steigenden Materialtemperaturen wird das Versagen des Holzes immer spröder und schlagartiger. Dies gilt auch für wieder abgekühlte Probekörper.
- Mit der Durchführung der Versuche in Anlehnung an die DIN EN 408 konnte ein sinnvoller und replizierbarer Versuchsablauf geschaffen werden.

3.1.2.6 Brandgefahr durch elektrische Leitungsanlagen in Holzbauelementen

Ziele der Untersuchung

Das Ziel der Untersuchungen war es nachzuweisen, ob der Baustoff Holz eine Brandentstehung innerhalb der Konstruktion bzw. des Bauteils begünstigt und ob folglich Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen, auch Arc Fault Detection Device (AFDDs) genannt in modernen Standardgebäuden in Holzbauweise über den bisherigen Sachstand hinaus zu einer weiteren signifikanten Erhöhung des brandschutztechnischen Schutzniveaus beitragen.

Versuchskonzeption

Zur konstanten Lichtbogenerzeugung in diesen Versuchen wurde eine isolierte Kupferader durchtrennt und die beiden Kontaktstellen mit Hilfe von Schraubklemmen mit Graphitstäben verbunden, vgl. Abbildung 106. Auf die Graphitelektroden wurde zurückgegriffen, da sich die Ionisierung bei einem in der Praxis auftretenden Lichtbogen über einen längeren Zeitraum (teilweise Tage – Wochen) ziehen kann. Dies ist jedoch im Versuchsaufbau nur schwer nachzustellen bzw. zu steuern [95]. Die Graphitelektroden erwärmen sich auf rund 3.000 °C und das dazwischen entstehende Plasma (Lichtbogen) erreicht dabei Temperaturen bis 10.000 °C [96]. Dies entspricht der Temperatur der in der Praxis auftretenden Lichtbögen.



Abbildung 106: Graphitelektroden zur planmäßigen Lichtbogenerzeugung [95]

Der Schaltkreis der Versuchsanordnung wurde aus den nachfolgenden Komponenten gebildet, vgl. Abbildung 107 [95].

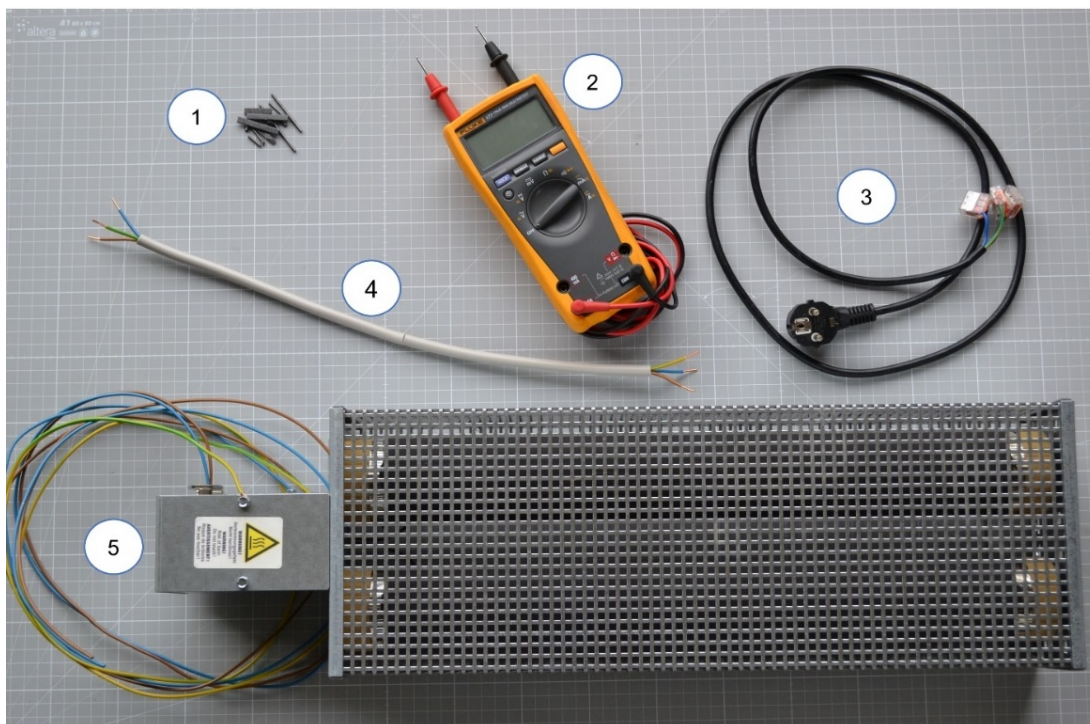


Abbildung 107: Einzelkomponenten des grundlegenden Schaltkreises zur Versuchsdurchführung [95]

Komponente 1: Graphitelektroden

Bleistiftminen mit dem Härtegrad 2B.

Komponente 2: Multimeter Fluke 177

Prüfung des geschlossenen Stromkreises.

Komponente 3: Anschluss an den Hausstrom

Hausstromanschluss maximale Spannung $230\text{ V} \pm 23\text{ V}$ und Stromstärke von 16 A je Stromkreis. FI-Schalter mit 30 mA Auslösegrenzwert und LS-Schalter im Stromkreis vorhanden.

Komponente 4: elektrische Installationsleitung

Dreiadrige elektrische Installationsleitung des Typs NYM-J nach VDE 0250 Teil 204 (Leitermaterial: Kupfer, Leiterquerschnitt: $1,5\text{ mm}^2$, Mantelmaterial: Polyvinylchlorid (PVC)) mit Außenleiter, Neutralleiter und Schutzleiter, nachfolgend als PVC-Kabel bezeichnet.

Alternativ wurde bei den Versuchen eine dreiadrige elektrische Installationsleitung des Typs NHXMH-J (Leitermaterial: Kupfer, Leiterquerschnitt: $1,5\text{ mm}^2$, Mantelmaterial: Außenmantel aus halogenfreiem Polymer) verwendet, nachfolgend als halogenfreies Kabel bezeichnet.

Komponente 5: Widerstand bzw. Verbraucher

Externer Bremswiderstand des Typs AX2090-BW80-1600 mit einer Leistung von ca. 1.600 W und einen Widerstand von $33\ \Omega$. Daraus ergibt sich eine Stromstärke von $6,97\text{ A}$.

Aus diesen Komponenten wurden die zwei nachfolgenden Schaltkreise konzipiert [95]:

Einfacher Schaltkreis

Zur Lichtbogenerzeugung wurde nur ein einzelner Leiter verwendet. Der Neutralleiter und der Schutzleiter sind nicht vom Einfluss des Fehlerlichtbogens betroffen. Diese beiden Leiter (PE und N) wurden direkt vom Hausanschluss zum externen Bremswiderstand geführt. Der Außenleiter L wurde durchtrennt und mit den beiden Graphitelektroden versehen, vgl. Abbildung 108. Durch diese Versuchsanordnung konnte der Lichtbogen längere Zeit aufrechterhalten werden, da weder der FI-Schalter noch der LS-Schalter auslösen.

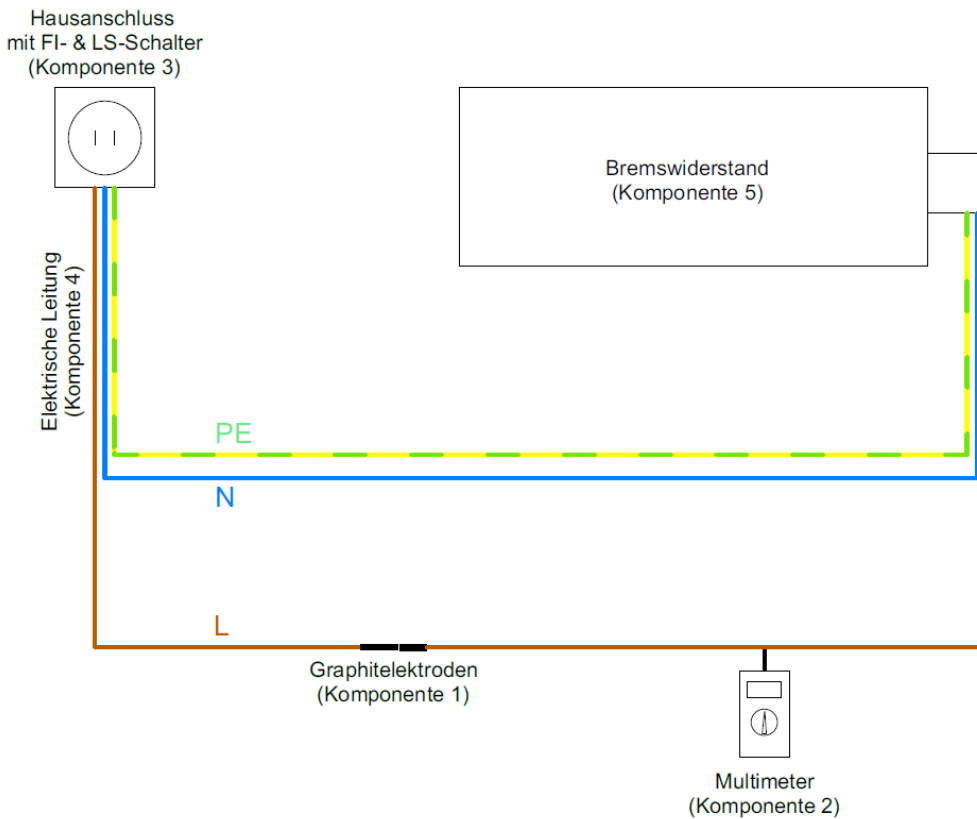


Abbildung 108: Schaltkreis zur Lichtbogenerzeugung mit einem Leiter [95]

Dreiadriger Schaltkreis

Bei dieser Anordnung wird der äußere Mantel der Installationsleitung geöffnet und die drei einzel-isolierten Adern (L, N und PE) freigelegt. Die Kupferader des Außenleiters wird durchtrennt und somit ein Elektrodenabstand in L hergestellt, vgl. Abbildung 109.

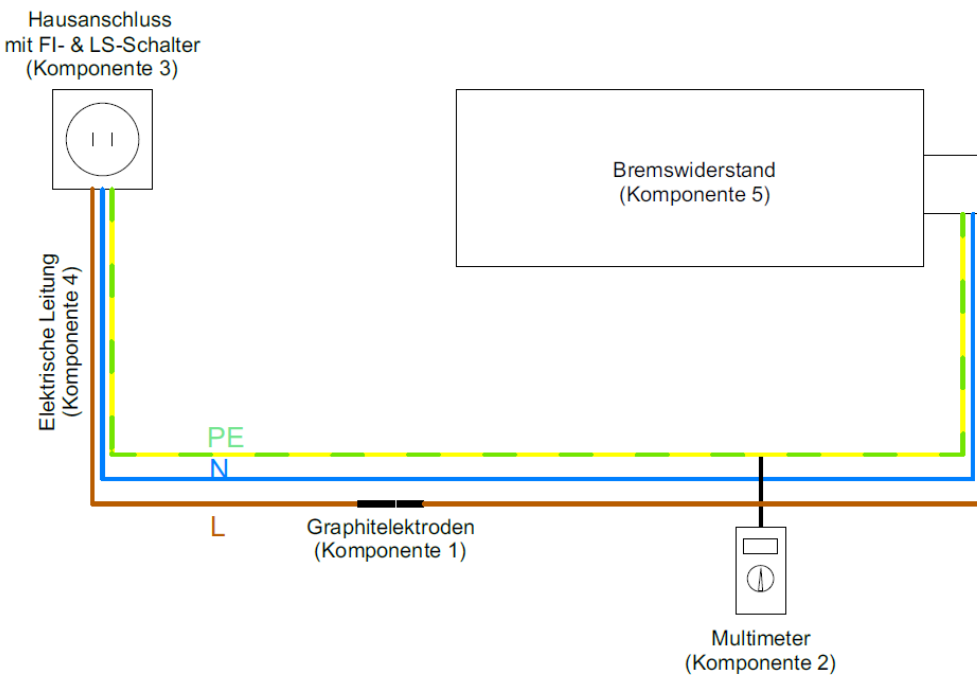


Abbildung 109: Schaltkreis zur Lichtbogenerzeugung mit einer dreiadrigen Installationsleitung [95]

Zur Erzeugung des seriellen Fehlerlichtbogens wurde Graphit in die Lücke zwischen den beiden Elektroden des Außenleiters eingebacht, vgl. Abbildung 110. Nach dem Einfügen des Graphits wurde der Kabelmantel durch Zusammenschieben wieder geschlossen. Der Lichtbogen tritt hier direkt in der dreiadrigen Installationsleitung auf. Folglich wurden auch der Schutz- bzw. Neutraleiter beschädigt, was zu einem Auslösen der Schutzeinrichtungen des Hausanschlusses führt. Mit diesem Aufbau kann die Dauer des seriellen Lichtbogens im Außenleiter (L) nachgewiesen werden.

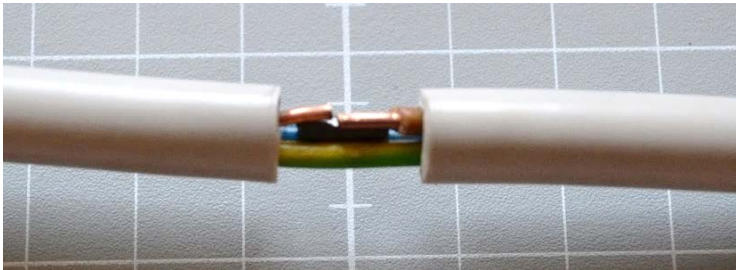


Abbildung 110: Anordnung der Graphitzugabe zwischen den beiden Kontaktstellen des Außenleiters [95]

Prüfkörper

Im Rahmen der Versuche kamen folgende Materialien als anliegende bzw. umgebende Baustoffe zur Installationsleitung hin zum Einsatz [95]:

Konstruktionsvollholz: KVH Fichte (Querschnitt 60 × 120 mm, Länge 400 mm) mit einer mittleren Rohdichte von 460 kg/m³ und einer mittleren Holzfeuchte von 12 %

Holzwerkstoffplatte: OSB-3-Platte mit einer Stärke von 15 mm, einer Rohdichte von 600 kg/m³ und einer mittleren Holzfeuchte von 9 %

Dämmstoff 1: Mineralwolle-Dämmstoff (Glaswolle) nach DIN EN 13162 (200 × 200 × 100 mm) klassifiziert als A1 nichtbrennbar ohne Neigung zum kontinuierlichen Schwelen

Dämmstoff 2: Mineralwolle Dämmstoff nach DIN EN 13162 (200 × 200 × 100 mm) klassifiziert als A1 nichtbrennbar ohne Neigung zum kontinuierlichen Schwelen und einem Schmelzpunkt von ≥ 1.000 °C

Versuchsdurchführung

Erzeugung des Lichtbogens und Temperaturnachweis

Im einfachen Schaltkreis wurde ein versuchstechnischer Fehlerlichtbogen mit den Graphitelektroden erzeugt und im indirekten Temperaturnachweis unter Betrachtung des Erreichens der Schmelzpunkttemperatur von Kupfer (1.084 °C) und Wolfram (3.422°C) Temperaturen von über 3.400 °C nachgewiesen [95].

Dauer eines seriellen Lichtbogens innerhalb des Außenleiters

Ziel dieses Versuches war es, die Dauer eines seriellen Lichtbogens innerhalb eines Außenleiters zu ermitteln. Dafür wurde der Lichtbogen direkt am dreiadrigen Kabel (Typ NYM-J) erzeugt. Durch die dabei entstehende Temperatur wird nach einer gewissen Zeit die Isolierung des Neutral- und/oder Schutzleiters beschädigt und die entsprechenden Schutzeinrichtungen des Hausanschlusses (FI- und LS-Schalter) unterbrechen den Stromfluss. Als Ergebnis der Versuche wurde die Einwirkdauer des Fehlerlichtbogens in den nachfolgenden Versuchen auf 20 Sekunden bestimmt, vgl. Tabelle 14 und Abbildung 111 [95].

Tabelle 14: Dauer des seriellen Lichtbogens [95]

Lfd. Nr.	Dauer bis zum Auftreten des ersten Lichtbogens s	Dauer des seriellen Lichtbogens ab auftreten s	Gesamtdauer bis zum Auslösen der Schutzvorrichtung s	Schutzvorrichtung
1	19,5	12,4	31,9	LS-Schalter
2	1,3	13,0	14,3	FI-Schalter
3	1,1	18,4	19,4	LS-Schalter
4	1,7	3,2	4,8	LS-Schalter

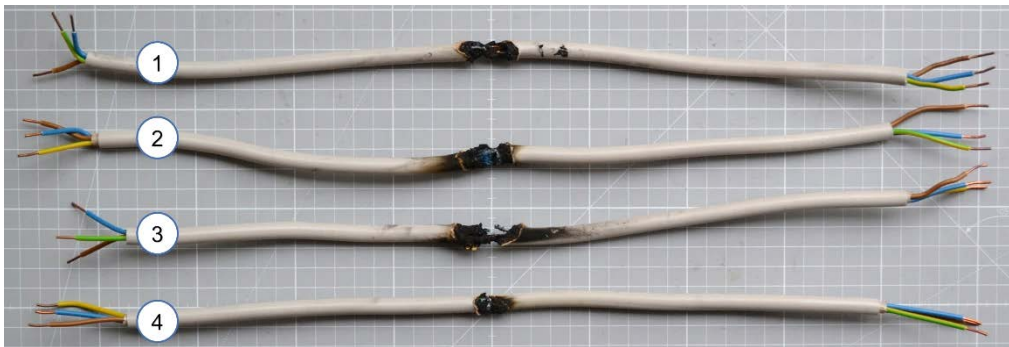


Abbildung 111: Elektrische Installationsleitungen nach Beendigung des Versuches [95]

Einwirkung des Lichtbogens auf das KVH, die Holzwerkstoffplatte und die Dämmung

In dieser Versuchsanordnung wurde die Entzündbarkeit der in Kap. 2.3 beschriebenen Bestandteile (KVH, OSB, Dämmung 1 und 2) einer Holztafelkonstruktion separat unter Einwirkung eines Fehlerlichtbogens mit der zuvor abgeleiteten maximalen Einwirkungszeit konservativ für einen Wert von 20 Sek. überprüft. Für die Durchführung des Versuches wurde der einfache Schaltkreis verwendet.

Bei der Einwirkung des Lichtbogens auf die unterschiedlichen Prüfkörper wurden drei unterschiedliche Anordnungen gewählt, vgl. Abbildung 112.

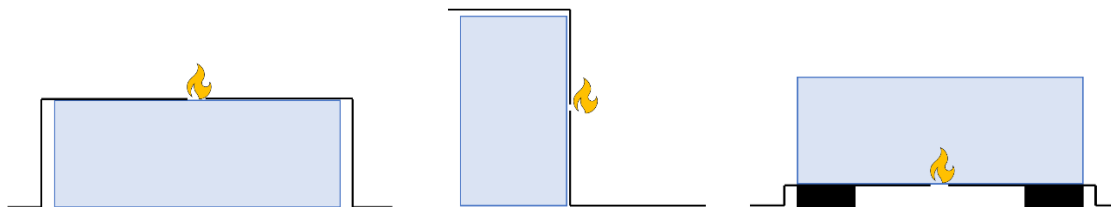


Abbildung 112: Anordnung der Prüfkörper (v.l.n.r.): Prüfkörper waagrecht – Lichtbogenerzeugung an der Oberseite des Prüfkörpers, Prüfkörper senkrecht – Lichtbogenerzeugung parallel zum Prüfkörper; Prüfkörper waagrecht – Lichtbogenerzeugung an der Unterseite des Prüfkörpers [95]

Alle Prüfkörper wiesen zwar nach den Versuchen Verkohlungsflächen (KVH und OSB) bzw. Schmelzbereiche (Dämmstoff 1&2) auf, verhielten sich jedoch insgesamt nach Ende der Einwirkung des Lichtbogens und einer Beobachtungszeit als selbstverlöschend. Die kurzzeitige Entzündung während der Einwirkung beschränkte sich auf eine sehr begrenzte Fläche um das Zündinitial, vgl. Abbildung 113 [95]. In diesem Zusammenhang darf angemerkt werden, dass der gewählte Versuchsaufbau bezüglich des freien Zugangs von Luftsauerstoff als kritischer Fall anzusehen ist, da in der praktischen Anwendung innerhalb von Bauteilen abgeschlossenen Bedingungen vorliegen.



Abbildung 113: Prüfkörper nach Versuch: (v.l.n.r.): KVH, OSB bei Anordnung senkrecht und Dämmung 1 und 2 [95]

Lichtbogenerzeugung im dreiadrigen Kabel befestigt auf KVH

In diesem Versuch wurde ein Lichtbogen direkt in der dreiadrigen Elektroinstallationsleitung (vgl. Abbildung 109), die an einem KVH-Prüfkörper mit entsprechenden Befestigungsklammern angebracht war,

erzeugt. Die Elektroinstallationsleitung selbst stellt somit eine weitere Brandlast auf der Einwirkungsseite dar. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 114 und Abbildung 115 dargestellt. Der Neutral- bzw. Schutzleiter wurde räumlich getrennt vom Prüfkörper angeordnet, somit wurde gewährleistet, dass die Sicherungseinrichtungen des Hausanschlusses die Stromversorgung nicht unterbrechen und gleichzeitig die zusätzliche Brandlast der Leitung zur Verfügung stand. Als Installationsleitungen kamen bei diesem Versuch sowohl PVC-Kabel, als auch halogenfreie Kabel zum Einsatz. Die Versuche endeten jeweils, wenn kein Strom mehr durch den Außenleiter (L) floss, sprich das jeweilige Kabel durch die Einwirkung punktuell zerstört war, vgl. Tabelle 15. Die Prüfkörper nach Ende des Versuchs sind in Abbildung 116 dargestellt. Die PVC-Kabel zeigten im Gegensatz zu den halogenfreien Kabeln eine höhere Entzündbarkeit und eine damit einhergehende stärkere Rauchentwicklung. Im Gegensatz dazu hielt der Fehlerlichtbogen bei den halogenfreien Kabeln deutlich kürzer an und die Entflammungszeit und die Rauchentwicklung war deutlich geringer. Alle Prüfkörper wiesen nach den Versuchen Verkohlungsflächen auf, verhielten sich insgesamt aber als selbstverlöschend. [95]



Abbildung 114: Versuchsanordnung senkrecht mit einer PVC-Elektroinstallation [95]

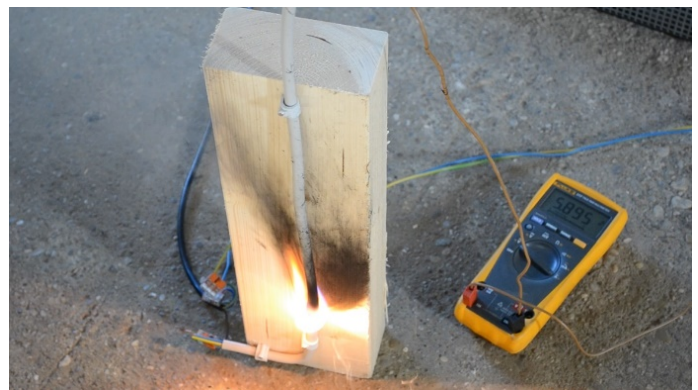


Abbildung 115: Lichtbogen bei der senkrechten Anordnung des PVC-Kabels [95]

Tabelle 15: Dauer der Versuche und Lichtbögen am KVH [95]

Lfd. Nr.	Kabeltyp	Anordnung	Dauer des Lichtbogens s	Selbständiges Erlöschen des Prüfkörpers nach einer Gesamtzeit von s
1	PVC	waagrecht	46	171
2	PVC	senkrecht	83	174
3	halogenfrei	waagrecht	17	24
4	halogenfrei	senkrecht	12	Keine Entzündung

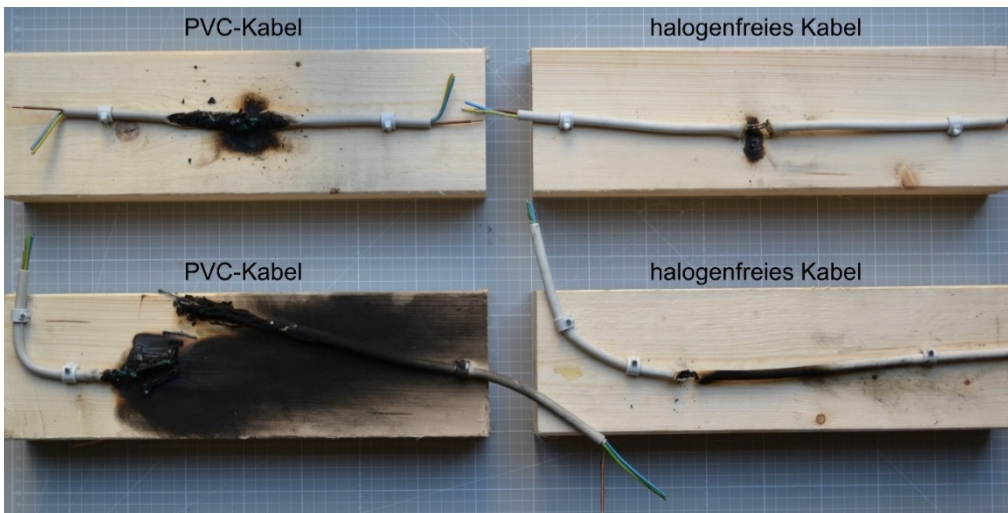


Abbildung 116: Prüfkörper nach Lichtbogenerzeugung (oben waagrechte, unten senkrechte Anordnung) [95]

Wirkung von Lichtbögen in einem geschlossenen Holztafelelement

Abschließend wurde die Wirkung von Lichtbögen innerhalb einer Holztafelbaukonstruktion geprüft. Hierzu wurde eine Holztafelbaukonstruktion (Abmessungen: Höhe 125 cm, Breite 74,5 cm, Tiefe 17,5 cm) aus den unter der Überschrift Prüfkörper im vorigen Abschnitt genannten Komponenten gefertigt, vgl. Abbildung 117. Auch in diesem Versuch wurde der Neutral- bzw. Schutzleiter getrennt vom Prüfkörper angeordnet, um zu gewährleisten, dass die Sicherungseinrichtungen des Hausanschlusses die Stromversorgung nicht unterbrechen. Die Holztafelelemente wurden aufrechtstehend als Wand während der Versuche angeordnet. Es wurden folgenden drei Varianten untersucht [95]:

- PVC-Kabel mittig zwischen den beiden KVH-Ständern auf der Dämmung
- PVC-Kabel direkt entlang des KVH-Ständers
- Halogenfreies Kabel direkt entlang des KVH-Ständers.

Die Versuchsdauer ist in Tabelle 14 und die geöffneten Prüfkörper nach dem Versuch in Abbildung 118 - Abbildung 120 dargestellt.

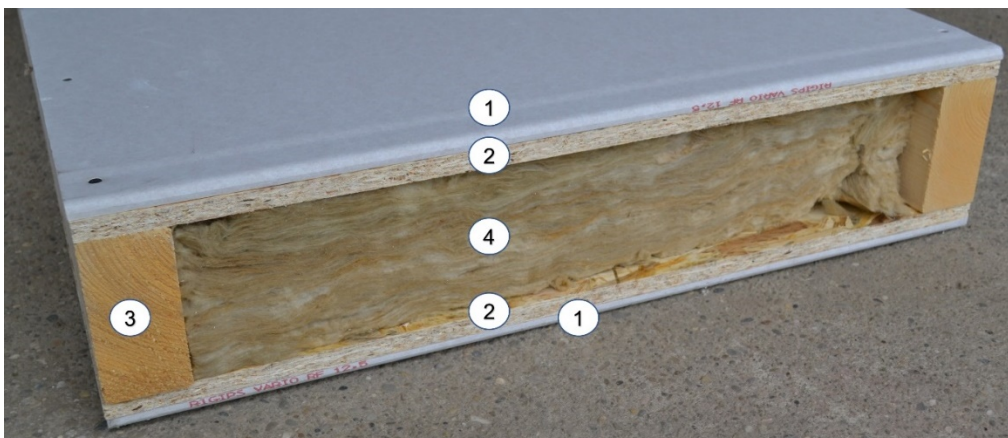


Abbildung 117: Aufbau der Holztafelbauwand: (1) Gipskartonplatte 12,5 mm, (2) OSB 15 mm, (3) KVH 60 x 120 mm, (4) Mineralwolle Dämmstoff [95]

Tabelle 16: Dauer der Versuche und Lichtbögen in der Holztafelbauwand [95]

Lfd. Nr.	Kabeltyp	Anordnung des Kabels	Auftreten von Lichtbögen bis Prüfsekunde s	Versuchsdauer s	Ist der Prüfkörper selbsterloschen, folglich keine Löschmaßnahmen notwendig
1	PVC	mittig	1200.	Abbruch nach 1200	ja
2	PVC	am Ständer	1200.	Abbruch nach 1200	ja
3	halogenfrei	am Ständer	22.	Kein Stromfluss mehr ab 22	ja, keine Verkohlung sichtbar



Abbildung 118: Prüfkörper mit mittig verlegtem PVC-Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [95]



Abbildung 119 : Prüfkörper mit am Ständer verlegtem PVC-Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [95]



Abbildung 120: Prüfkörper mit am Ständer verlegtem halogenfreien Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [95]

Bei beiden Varianten mit PVC-Kabel wurde eine Versuchsdauer von 20 Minuten erreicht, bis der Versuch abgebrochen wurde. Die lange Versuchsdauer im Vergleich zu Tabelle 14 lässt sich damit begründen, dass durch die PVC-Mantel- und Litzen-Schmelze eine leitende Schicht innerhalb der Holztafelbaukonstruktion entstand. Die Prüfdauer von 20 Minuten ist ein rein versuchstechnischer und extrem auf der sicheren Seite liegender Umstand. In der Praxis wäre durch Auslösen einer Sicherungseinrichtung des Hausanschlusses der Stromkreis weit früher unterbrochen worden, vgl. Tabelle 14. Innerhalb der Holztafelbaukonstruktion kam es zu Verkohlungen, ein Mitbrand nach Ende der Einwirkung trat jedoch nicht auf. Nach Ende der Stromzufuhr verhielt sich der Prüfkörper in der geprüften Konstellation selbstverlöschend.

Der Lichtbogen am halogenfreien Kabel trat nur rund 22 Sekunden auf. Im Anschluss fand kein Stromfluss mehr innerhalb des Schaltkreises statt, da sich keine durch Schmelze entstandene leitende Schicht bildete. Nach Versuchsende konnten nur geringfügige lokale Verkohlungen am KVH festgestellt werden.

Fazit und Ableitung von Maßnahmen

Circa ein Drittel aller Brände sind auf Elektrobrände zurückzuführen. Ein Großteil dieser Brände geht jedoch von Elektrogräten aus bzw. wird durch überlastete Mehrfachsteckdosen oder beschädigte Kabel innerhalb der Nutzungseinheit ausgelöst. In diesen Fällen trägt insbesondere die mobile Brandlast zur Raumbrandentwicklung bei. Immobile Brandlasten, wie z.B. sichtbare Wände oder Decken aus Holz, können dies zwar begünstigen, erhöhen aber nicht das Brandentstehungsrisiko.

Anders könnte sich dies bei Elektrobränden innerhalb einer brennbaren Konstruktion verhalten. Spätestens seit Einführung der DIN VDE 0100-420 wird die Frage, welchen Einfluss ein brennbarer Baustoff bei Elektrobränden innerhalb der Konstruktion einnimmt, stark diskutiert.

Im Rahmen der Untersuchung wurde diese Fragestellung für mehrgeschossige Gebäude (Gebäudeklasse 4-5) aus Holz ohne brennbare Dämmstoffe untersucht. Der hier beschriebenen Versuchskonzeption folgenden wurden Untersuchungen mit brennbaren Dämmstoffen im Rahmen des Forschungsvorhabens „Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo-Dämmstoffe)“ [264] durchgeführt.

Im Rahmen der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass das Risiko eines Auftretens von Elektrobränden innerhalb der Konstruktion verhältnismäßig gering ist. Weiter decken die vorhandenen Schutzmaßnahmen eines Hausanschlusses einen Teil möglicher Defekte bereits ab. Entscheidend ist die Frage, wie sich ein brennbarer Baustoff bei Auftreten eines Lichtbogens innerhalb der Konstruktion verhält. Bei allen durchgeführten Versuchen, die mit konservativ anzusehenden Einwirkungszeiten durchgeführt wurden, trat immer ein Selbstverlösch auf. Es entstand kein weiterführender Brand um den Initialbereich der Entzündung nach Ende der Einwirkung in oder an der brennbaren Konstruktion.



AFDDs sind wichtige Bestandteile um den Brandschutz in Gebäuden mit besonderen Schutzniveau (Sonderbau wie Krankenhaus oder Pflegeheim) oder Gebäuden mit Kulturschätzen zu verbessern. Eine Notwendigkeit für Standardgebäude lässt sich mit Blick auf die Versuche jedoch nicht ableiten.

Eine weitere entscheidende Erkenntnis war, dass halogenfreie Installationsleitungen bei Lichtbögen, auf Grund des Nichtvorhandensein von PVC Schmelze, deutlich gutmütiger reagieren. Da diese Leitungen nur geringfügig teurer sind, eröffnet dieser Sachverhalt ein weiter zu untersuchendes Feld für die Zukunft. Auch die Reaktion von Kabelbündeln, anstelle von Einzelkabeln wie in dieser Untersuchung, sollte in weiterführenden Untersuchungen nochmals betrachtet werden.

3.1.2.7 Nachbrandverhalten und Selbstverlöschen von Holz-Beton-Verbunddecken im Naturbrand

Zur Bestimmung des Brandverhaltens von Holz-Beton-Verbunddecken (HBV) bei Naturbrandbeanspruchung wurden zwei Deckenprobekörper in einem Brandofen zur Feuerwiderstandsprüfung in Anlehnung an DIN EN 1363-1 [66] (Bauteilofen) untersucht.

Die Versuche dienten insbesondere dem Erkenntnisgewinn für die Auslegung eines realmaßstäblichen Großbrandversuchs im Brandofen (Abschnitt 3.1.2.8). Eine Erläuterung der Untersuchungsziele, der Relevanz von HBV-Decken und ihrer Bemessung erfolgt im Abschnitt 3.1.3.4.

Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus, mit den Temperaturmessstellen in den Bewehrungslagen und der Grenzschicht zwischen Beton und Holz, ist in Abbildung 121 dargestellt.

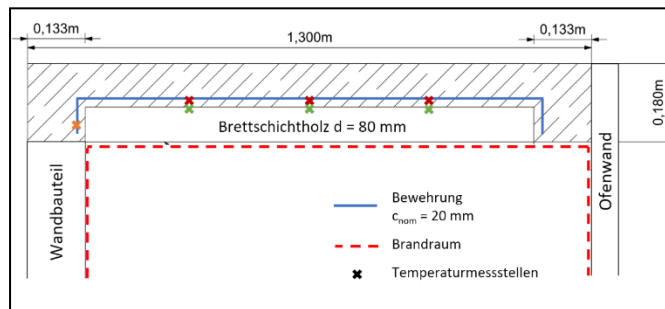


Abbildung 121: Versuchsaufbau der HBV-Deckenbauteile im Bauteilofen

Die Holzschicht bestand aus 80 mm Brettschichtholz (Fichte/Tanne), mit einer Rohdichte von ca. 490 kg/m³ und einer Holzfeuchte von 12 M.-%. Die Klebefugen verliefen senkrecht zum Querschnitt (von Auflagernocke zu Auflagernocke) in Abbildung 121. Der Überbeton wurde mit 100 mm Schichtdicke als C 20/25 gemäß DIN EN 206 [199] ausgeführt. Die Betonüberdeckung der Bewehrung betrug 2 cm. Zwischen Holz- und Betonschicht war eine PE-Folien angeordnet, um den Entzug von Wasser aus dem Frischbeton in das Holz zu unterbinden. Der Verbund zwischen Beton und Holz wurde mit 4,5 mm x 100 mm Holzschrauben hergestellt, welche mit einem Abstand von 200 mm zueinander, 35 mm tief in das Holz verschraubt wurden. Die Probekörper wurden im Bauteilofen auf einer Fläche von 1,00 m x 1,17 m von unten beflammt. Im Auflagerbereich war der Betonteil bis auf das Wandbauteil herunter geführt. Dieser Untersuchungsschwerpunkt ist für das Kapitel „Auflagerdetails“ im Abschnitt 3.1.3.4 relevant und wird dort detailliert ausgeführt.

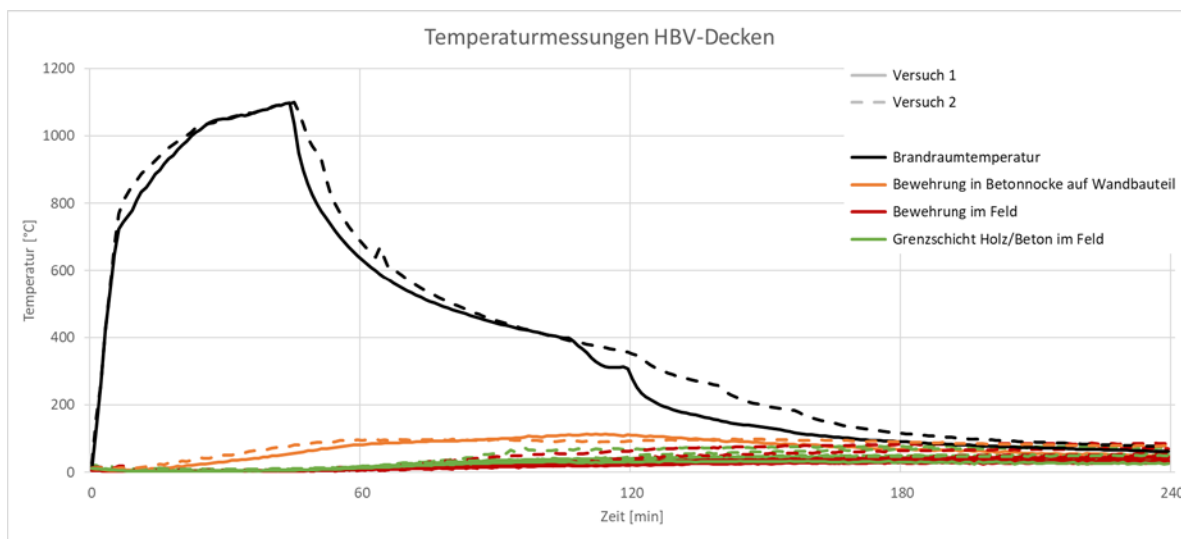


Abbildung 122: Temperaturmessungen der Brandversuche mit HBV-Deckenbauteilen

In Abbildung 122 sind die Temperaturaufzeichnungen der Brandversuche dargestellt, die Linienfarben entsprechen den Positionen der Temperaturmessstellen in Abbildung 121. Als Temperatur-Zeit-Bearbeitung (Brandraumtemperaturen in Abbildung 122) wurde ‚Naturbrand_1‘ (siehe Abschnitt 3.1.1.5) verwendet. Die im Bauteilofen gemessenen Brandraumtemperaturen weisen zum Teil Abweichungen voneinander auf, da die Steuerung der Abkühlphase (ab ca. Versuchsminute 45) in ETK-Brandöfen eine erhebliche Herausforderung darstellt. Die Temperaturen in der Grenzschicht zwischen Beton und Holz erreichen maximal 78 °C. In der Feldbewehrung der Betonschicht wurden maximal 73°C gemessen.



Abbildung 123: Unter-/Holzseite des Probekörpers vor (links) und unmittelbar nach dem Brandversuch (rechts)

In Abbildung 123 ist die Holzschicht unmittelbar nach Öffnung des Bauteilofens dargestellt. Die Öffnung erfolgt in beiden Versuchen bei einem Abfallen der Brandraumtemperatur unter 300 °C nach ungefähr 120 Minuten. Zu diesem Zeitpunkt waren die Oberflächen der Probekörper vollständig verkohlt. Es waren keine Flammenbrände mehr erkennbar, sondern lediglich kleine Glimmnester, die innerhalb weniger Minuten verlöschten. Die Restholzdicken nach den Brandversuchen betragen im Mittel 45 mm und belegen ein insgesamt gutmütiges Abbrandverhalten der Holz-Beton-Probekörper. Es wurde kein Abplatzen des Betons festgestellt, was wahrscheinlich auf das im Brandversuch vorhandene Restholz und seine Schutzwirkung zurückzuführen ist. Inwiefern ein Abplatzen von Beton bei vollständigem Holzabbrand stattfindet, muss infolge weiterer Brandversuchen beurteilt werden.

Bei beiden Probekörpern wurde jeweils am Folgetag der Brandversuche die Restholzdicke dokumentiert. Die Holzkohleschicht wurde vor der Messung abgetragen. Eine schematische Darstellung der Messpunkte erfolgt in Abbildung 124, die Ergebnisse sind in Tabelle 17: Dicken des Restholzes und der Holzkohleschicht der Brandversuche mit HBV-Decken im Bauteilofen zusammengefasst. Die Restholzdicke und die Holzkohleschicht in Summe entsprachen zumeist der ursprünglichen Holzdicke von 80 mm, d.h. die Holzkohleschicht wurde im Verlauf der Brandversuche kaum abgetragen, siehe Abbildung 123 rechts. Das teilweise Fehlen der Holzkohleschicht in Abbildung 124 (links) ist auf den Ausbau und Transport des Probekörpers vor der Messung und Fotodokumentation zurückzuführen.



Auflager auf Wandbauteil		
6	1	7
	2	
	3	
	4	
8	5	9
Auflager im Ofen hängend		

Abbildung 124: Decke V1 nach dem Brandversuch und schematische Darstellung der Messpunkte für die Restholzdicke/Holzabbrand

Tabelle 17: Dicken des Restholzes und der Holzkohleschicht der Brandversuche mit HBV-Decken im Bauteilofen

Messpunkte	V1		V2	
	Restholz	Holzkohleschicht	Restholz	Holzkohleschicht
1	35 mm	45 mm	45 mm	35 mm
2	40 mm	40 mm	45 mm	35 mm
3	40 mm	40 mm	55 mm	25 mm
4	40 mm	40 mm	50 mm	30 mm
5	40 mm	40 mm	0 mm	80 mm
6	35 mm	45 mm	50 mm	30 mm
7	40 mm	40 mm	45 mm	35 mm
8	35 mm	45 mm	55 mm	25 mm
9	50 mm	30 mm	55 mm	25 mm

die Naturbrandbeanspruchungen fand eine Beflammung über die Brenner bis zum Erreichen der Maximaltemperatur statt. Die anschließend einsetzende Abkühlphase (vgl. Abbildung 133) sollte sich unter den definierten, vereinfachten Ventilationsbedingungen und der Menge der ungeschützten Holzflächen selbst einstellen. Es gilt hierbei jedoch zu beachten, dass die Versuche unter den Randbedingungen eines abgeschlossenen Brandofens stattfanden, die versuchstechnisch keine natürlichen Ventilationsbedingungen ermöglichten. Die Abbildung einer Ventilation erfolgte vereinfacht über eine kontrollierte Zuluftströmung über die vier Brenner inkl. der Abluftabsaugung über die beiden Ofenabzüge (Füchse), welche sich allesamt im unteren Drittel des Brandraumes befanden (siehe Abbildung 125).

Aus [86] ist bekannt, dass der Sauerstoffgehalt in einem Brandofen bei ETK-Beanspruchung und ungeschützten Holzflächen sehr schnell bis unterhalb 5 % absinkt. Selbiges wurde bei Durchführung der Brandversuche unter Naturbrandbeanspruchung im Brandofen innerhalb der Aufheizphase erwartet. Dieses liegt zum einen an den ölbetriebenen Brennern, die ein optimal abgestimmtes Brennstoff-Sauerstoff-Gemisch zur Verbrennung in den Brandraum blasen. Zum anderen an den bei der Pyrolyse von Holz freiwerdenden brennbaren Pyrolysegasen, welche mit dem im Brandraum verbleibenden Sauerstoffanteil bzw. dem Sauerstoff aus dem Brennergemisch oxidieren. Für die Verbrennung ist gemäß der Verbrennungslehre ein Sauerstoffgehalt von mindestens 13 Vol-% erforderlich. Zur Steigerung der Oxidation der Pyrolysegase im Brandraum erfolgt die Verwendung eines externen Gebläses, das mit einer definierten Strömungsrate Umgebungsluft in den Brandraum fördert.

Als Abbruchkriterien, die den Beginn von Löschmaßnahmen durch die Brandsicherheitswache bedeuten, wurden zum einen die Temperaturentwicklung in der Abkühlphase sowie das Eintreten eines Durchbrandes von einem Bauteil oder einer Anschlussfuge festgelegt. Ließ die Temperaturentwicklung in der Abkühlphase nicht auf ein Selbstverlöschen schließen bzw. ist ein Temperaturanstieg der Brandraumtemperaturen innerhalb der Abkühlphase zu erkennen, war das Abbruchkriterium erreicht und Löschmaßnahmen wurden eingeleitet.

Die Ausbildung der Brandschutzbekleidung für die anfänglich geschützten Holzbauteile erfolgte auf Basis der Untersuchungsergebnisse zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen (Kapitel III 3.1.1.4). Der Aufbau der einzelnen Holzbauteile sowie die Ausbildung der Brandschutzbekleidung sind nachfolgend in Tabelle 18 dargestellt. Die Anordnung der Wände im Versuchsaufbau zeigt Abbildung 126. Nur die Bauteile aus Brettschichtholz wurden herstellungsbedingt mit einem Elementstoß in Form einer dreifachen Nut-Feder Verbindung mit einem Stoßbrett auf der brandabgewandten Seite ausgeführt (siehe Abbildung 128). Die Bauteile in Holztafelbauweise bzw. Brettspertholzbauweise wurden als ein Element hergestellt.

Analog zu den Untersuchungen im Room Corner Versuchsstand zeigt Spalte α_{bb} das prozentuale Verhältnis der Fläche an ungeschützten Holzoberflächen zu Versuchsbeginn (t_0) zur maximal möglichen Fläche an ungeschützten Holzoberflächen A_{TIM} .

Tabelle 18: Versuchsmatrix der Großbrandversuche im Brandofen

Bez.	Wand 01	Wand 02	Wand 03	Wand 04	Decke Spannweite = 4,0 m	Brandbeanspr.	α_{bb} [%]	Ziel	Übergreifende Ziele
V01	Brettspertholz (100 mm 20/20/20/20/20) 2 x 18 GF	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung + 15 mm OSB/3) 2 x 18 mm GF	Brettschichtholz (110 mm) 2 x 15 mm GF	Brettspertholz (100 mm 20/20/20/20/20) 18 mm + 15 mm GF	Brettschichtholz (160 mm) ungeschützt	ETK 90 min	24	Brandverhalten über 90 min ETK; Referenzversuch bei einer ungeschützten Holzfläche	Entwicklung der Brandraumtemperatur in der Abkühlphase; Äquivalenzbetrachtung der Brandbeanspruchungen; Dokumentation der Temperaturen im Bauteil; Dokumentation der Temperaturen der Anschlussbereiche (Element- und Anschlussfugen); Vergleich der Bauteilaufbauten (Trägerplatten) im Großmaßstab; Vergleich der Brandschutzbelegungen im Großmaßstab; Analyse der Schutzwirkung ohne Trägerplatte; Brandverlauf beim Versagen der Brandschutzbelegung; Verhalten der Anschluss- und Elementfugen unter Naturbrandbeanspruchung
V02	Brettspertholz (100 mm 40/30/40/30/40) 2 x 18 GF	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung + 15 mm OSB/3) 2 x 18 mm GF	Brettschichtholz (110 mm) 2 x 15 mm GF	Brettspertholz (100 mm 20/20/20/20/20) 18 mm + 15 mm GF	Brettschichtholz (160 mm) ungeschützt	Naturbrand_1	24	Brandverhalten über Naturbrand; Äquivalenzbetrachtung zu V01 und V07; Nachbrandverhalten	
V03	Brettspertholz (180 mm 40/30/40/30/40) ungeschützt	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung + 15 mm OSB/3) 2 x 18 mm GF	Brettschichtholz (160 mm) ungeschützt (3 m Hoch)	Brettspertholz (100 mm 20/20/20/20/20) 18 mm + 15 mm GF	Brettschichtholz (110 mm) 2 x 18 mm GF	Naturbrand_1	28	Brandverhalten über Naturbrand; Einfluss Menge mehrerer ungeschützter Flächen; Nachbrandverhalten	
V04	Brettspertholz (100 mm 20/20/20/20/20) 2 x 18 GF	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung + 15 mm OSB/3) 2 x 18 mm GF	Brettschichtholz (160 mm) ungeschützt (3 m Hoch)	Brettspertholz (100 mm 20/20/20/20/20) 18 mm + 15 mm GF	Brettschichtholz (160 mm) ungeschützt	Naturbrand_1	42	Brandverhalten über Naturbrand; Einfluss gegenüberliegender ungeschützter Flächen; Nachbrandverhalten	
V05	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung + 15 mm OSB/3) 20 mm + 25 mm Typ DF	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 120 KVH / 120 mm Mineralwolleämmung + 15 mm OSB/3) 15 mm + 25 mm GKF	Brettschichtholz (100 mm) 18 mm + 25 mm GKF	Brettspertholz (120 mm 40/40/40) 2 x 25 mm GKF	½ HBV (100 mm – Beton- / Holzlage) ½ BSH (160 mm) ungeschützt	Naturbrand_V3	24	Nachbrandverhalten bei einem ungeschützten Holz-Beton- Verbundbauteil (selbstverfündendes Bauteil); Leistungsfähigkeit von stärkeren Brandschutzbelegungen	
V06	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung) 2 x 18 mm GKF (mit Haustechnik)	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung) 2 x 18 mm GF	Brettschichtholz (120 mm) 2 x 18 mm GKF (mit Haustechnik)	Brettspertholz (80 mm 30/20/30) 2 x 18 mm GKF	Brettspertholz (160 mm 40/20/40/20/40); (3 Elemente a 1,4 m) ungeschützt	Naturbrand_1	24	Nachbrandverhalten bei einem ungeschützten Holzbauteil; Brandverhalten von Brettspertholz - Delaminieren (Abfallen von Lamellen); Brandschutzmaßnahmen bei Hohlwanddosen unter Naturbrand	
V07	Brettspertholz (80 mm 30/20/30) 2 x 18 GF	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung + 15 mm OSB/3) 2 x 18 mm GF	Brettschichtholz (100 mm) 2 x 15 mm GF	Brettspertholz (80 mm 30/20/30) 18 mm + 15 mm GF	Brettschichtholz (160 mm) ungeschützt	Natur rand_2 1250 MJ/m²	24	Brandverhalten bei deutlich abweichender Naturbrandbeanspruchung	
V08	Holztafel (15 mm OSB/3 + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung + 19 mm Spanplatte) 2 x 18 mm GKF	Holztafel (2 x 18 mm GF + 60 x 100 KVH / 100 mm Mineralwolleämmung) 1 x 18 mm GKF	Brettschichtholz (160 mm) ungeschützt (3 m Hoch)	Brettspertholz (100 mm 40/20/40) 1 x 18 GKF	Brettschichtholz (100 mm) 2 x 18 mm GKF	Natur rand_1	18	Brandentwicklung bei Versagen der Brandschutzbelegung (anfänglich geschütztes Bauteil / Hohlraumbrand)	

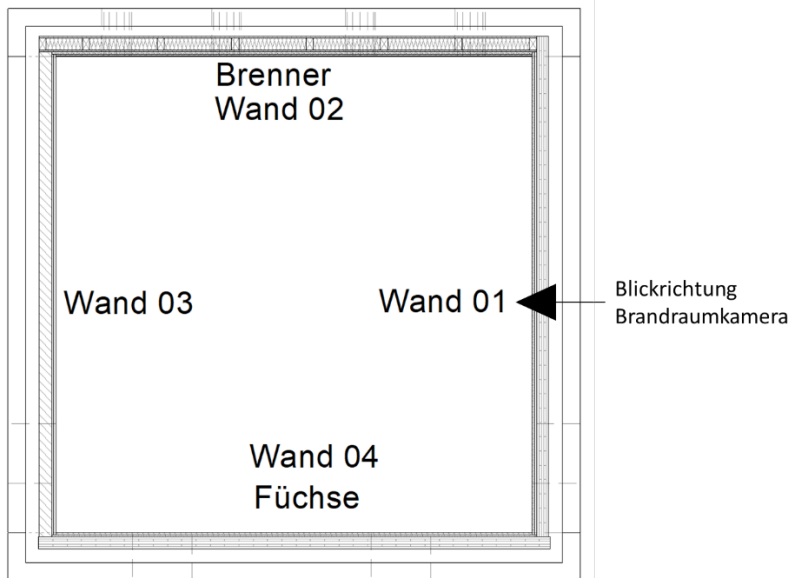


Abbildung 126: Draufsicht auf den Versuchsaufbau mit Bezeichnung der Wände und Blickrichtung der Brandraumkamera



Abbildung 127: Ansicht eines Versuchsaufbaues im Brandofen

Alle Bauteilfugen waren stumpf gestoßen und mit Teilgewindeschrauben im Abstand von 500 mm kraftschlüssig verschraubt. Außenseitig fand eine luftdichte Abklebung aller Bauteilfugen sowie aller Elementfugen unbedeckter Bauteile statt, wie in Abbildung 127 erkennbar. In den Versuchen V05, V06 und V08 wurde in der Kontaktfläche der tragenden Teile der Wand-Decken Anschlüsse ein Elastomerlager angeordnet.

Bei den Brandschutzbekleidungen aus zwei Lagen Gipsplatten Typ DF nach [37] wurden zur Befestigung die in Tabelle 19 angegebenen Schnellbauschrauben unter Beachtung der erforderlichen Eindringtiefe, maximalen Abstände sowie dem Versatz der Plattenstöße verwendet. Ein Verspachteln der Trockenbaufugen mit Gipsspachtel fand in jeder Lage statt.

Tabelle 19: Verbindungsmittelabstände für die Befestigung der Brandschutzbekleidung aus Gipsplatten Typ DF

Brand-schutz-be- kleidung	Abstand (a) der Befestigungsmittel untereinander auf der Trag- oder Unterkonstruktion Reihenabstände: Wand $e \leq 625$ mm, Decke $e \leq 400$ mm		Abstand zum Plattenrand bzw. zur Plat- tenfuge
	1. Lage (innen)	2. Lage (beflammt)	
	Schnellbauschrauben	Schnellbauschrauben	
Gipsplatte Typ DF 37	$\geq \varnothing 3,5$ mm x 35 mm $a \leq 300$ mm	$\geq \varnothing 3,5$ mm x 55 mm $a \leq 150$ mm	≥ 15 mm

Die Befestigung der Brandschutzbekleidung, bestehend aus zwei Lagen Gipsfaserplatten gemäß [38], erfolgte über Klammern unter Berücksichtigung der in Tabelle 20 angegebenen erforderlichen Eindringtiefe, maximalen Abstände sowie dem Versatz der Plattenstöße. Die Fugenbreite der Brandschutzbekleidung betrug 2 mm. Ein Verspachteln der Fugen mit Gipsspachtel erfolgte nur für die brandzugewandte Lage (zweite Lage).

Tabelle 20: Verbindungsmittelabstände für die Befestigung der Brandschutzbekleidung aus Gipsfaserplatten

Brand-schutz-be- kleidung	Abstand (a) der Befestigungsmittel untereinander auf der Trag- oder Unterkonstruktion Reihenabstände: Wand $e \leq 625$ mm, Decke $e \leq 400$ mm		Abstand zum Plattenrand bzw. zur Plat- tenfuge
	1. Lage (innen)	2. Lage (beflammt)	
	Klammern	Klammern	
Gipsfaser- platte 38,	$\geq \varnothing 1,53$ mm x 40 mm x 11,25 mm $a \leq 300$ mm	$\geq \varnothing 1,53$ mm x 50 mm x 11,25 mm $a \leq 150$ mm	≥ 15 mm

Die Eckausbildung der Brandschutzbekleidung erfolgte zum einen als stumpf gestoßen als auch mit einfachem Fugenversatz (vgl. Abbildung 128). Eine Ausbildung als doppelter Fugenversatz entsprechend [47] wurde nicht untersucht. Für die Eckausbildung der Brandschutzbekleidung folgte ein Verspachteln der verbleibenden Montagefuge mit herkömmlichen Gipsspachtel. Bei den Wand-Decken Anschlüssen mit Elastomerlager in der Kontaktfläche fand brandraumseitig eine dauerelastische Verfüguung mit Brandschutzsilikon statt.



Abbildung 128: Darstellung der unterschiedlichen Anschlussdetails

Messtechnik

Zur Erfassung der Brandraumtemperaturen wurden, entsprechend Abbildung 129, vier Messbäume mit jeweils 4 über die Höhe verteilte Mantelthermoelementen vom Typ K im Brandraum angeordnet. Für die Steuerung der Temperatur im Brandraum über die Brenner wurden die vier Thermoelemente in 3,1 m Höhe verwendet.

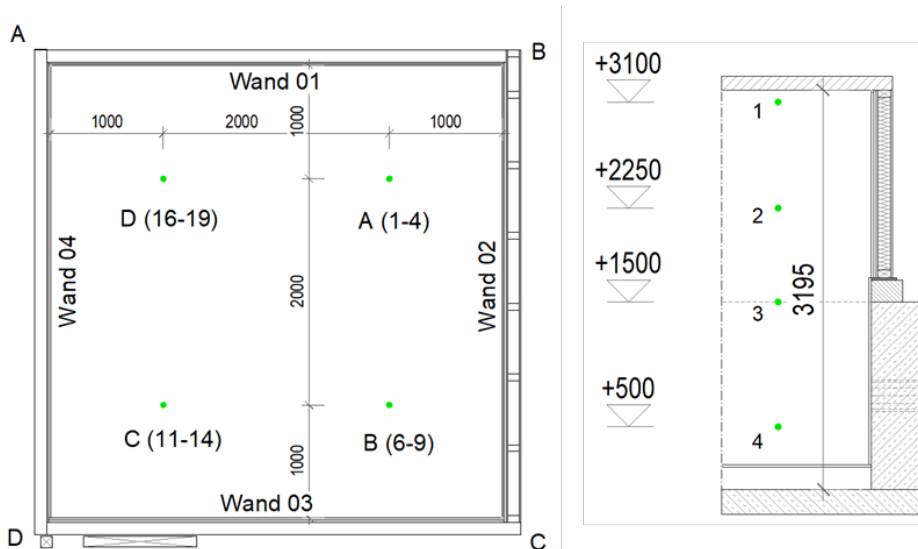


Abbildung 129: Position der Brandraumelemente zur Temperaturlaufzeichnung

Infolge der Zielsetzung dieser ersten vier Versuche wurden die Versuchskörper primär in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Trägerkonstruktion sowie in den Anschlussfugen der Bauteile mit Thermoelementen (TE) zur Temperaturlaufzeichnung ausgestattet. Die Anordnung von Thermoelementen vom Typ K nach [55] erfolgte in der Grenzschicht Brandschutzbekleidung – Trägerkonstruktion, als Vergleich zu den Brandversuchen zur Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung. Zudem fand eine Dokumentation der Temperaturentwicklung auf der brandabgewandten Seite der Bauteile statt. Die Positionierung der Thermoelemente (grünen Punkte) in der Grenzschicht folgte, dem in Abbildung 130 dargestellten Muster einer Wand, in vier Achsen mit jeweils drei über die Höhe angeord-

neten Messelementen. Mit dieser Anordnung ergab sich ein messtechnisch hinreichendes Temperaturprofil in der Grenzschicht. Die rot dargestellten Messelemente (Zahlen) stellen vier auf der brandabgewandten Seite angeordnete Thermoelemente dar.

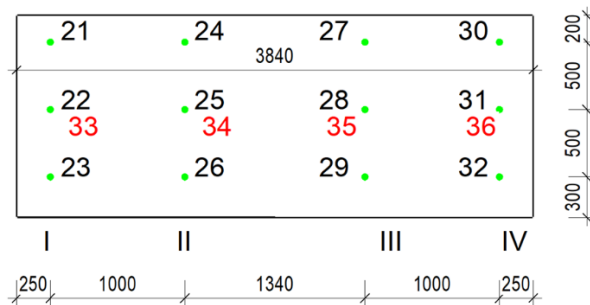


Abbildung 130: Position der Thermoelemente vom Typ K in den Wänden (Ansicht von beflamelter Seite)

Zur Analyse der Temperaturentwicklung in den Anschlussfugen der Wandbauteile waren Thermoelemente in der Kontaktfläche als auch der brandabgewandten Seite positioniert, wie die Abbildung 131 zeigt. Analog zu den Thermoelementen in der Grenzschicht waren drei über die Höhe verteilte TE in der Anschlussfuge angeordnet. Bei den Wand-Wand Anschlüssen lagen die TE in der Kontaktfläche 10 mm eingerückt ausgehend von der Ebene der Grenzschicht. Das sich auf der brandabgewandten Seite befindende TE war abschließend auf die luftdichte Abklebung montiert, um die Temperaturerhöhung infolge durchströmender Heißgase in der Anschlussfuge zu messen.

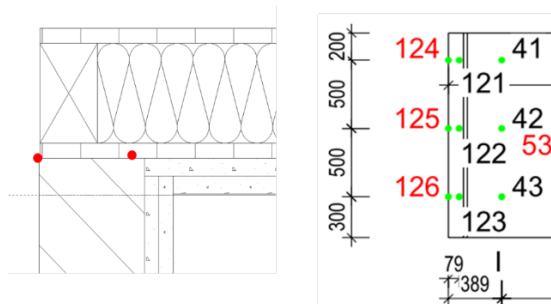


Abbildung 131: Position der Thermoelemente vom Typ K in den Wand-Wand Anschlüssen (Ansicht von beflamelter Seite)

Eine vergleichbare Anordnung der Thermoelemente zur Anschlussfuge Wand-Wand war, wie in Abbildung 132 ersichtlich, in der Wand-Decken Fuge wiederzufinden. Über die Fugenlänge waren, entsprechend der vier TE-Achsen der Wände, vier Messpositionen festgelegt. Je Messachse war ein Thermoelement in der Kontaktfläche und eines auf der brandabgewandten Seite angeordnet. Das TE in der Kontaktfläche war um 20 mm ausgehend von der Grenzschicht eingerückt. Auf die luftdichte Abklebung der Anschlussfuge war das TE der brandabgewandten Seite positioniert.

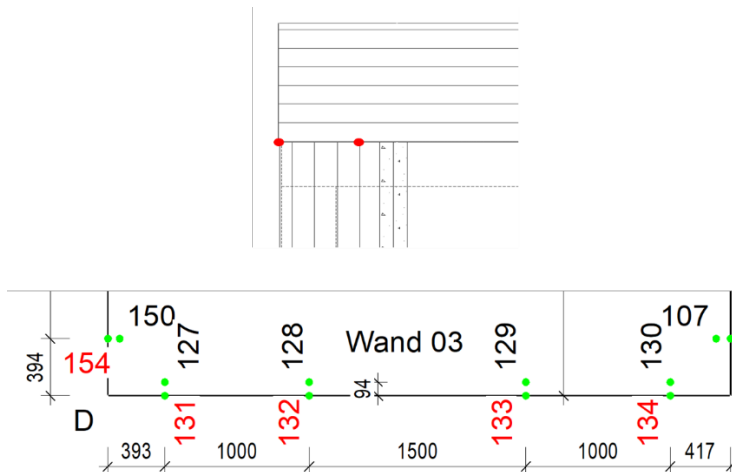


Abbildung 132: Position der Thermoelemente vom Typ K in den Wand-Decke Anschlüssen (Ansicht von beflamelter Seite)

Eine Gegenüberstellung der Erkenntnisse der Abbrandversuche wurde vereinfacht anhand der gemessenen Abbrandtiefe der abgekühlten Bauteile nach dem Brandversuch durchgeführt. Eine Messung der Temperaturerhöhung innerhalb des Querschnittes der Massivholzelemente erfolgte aufgrund des hohen Aufwandes der Positionierung der Thermoelemente sowie unter Beachtung der korrekten Anordnung der Thermoelemente parallel zur Isotherme [69] und [87] nicht.

Für die Bewertung der abwehrenden Maßnahmen ab Erreichen eines Abbruchkriteriums wurde die verwendete Löschmittelmenge mit einer Durchflussmesstrecke aufgezeichnet. In den Versuchen V01 bis V03 wurde der erste Löschangriff mittels einer Löschlanze von Fognail® (Ausführung Breitsprühnagel) zur Bekämpfung des Primärbrandes durchgeführt. Für die Anwendung der Löschlanze war im Steinkranz bereits eine, mit Dämmstoff verstopfte, Bohrung enthalten, durch welche die Löschlanze den Brandraum penetriert. Abschließende Rest-/ Nachlöscharbeiten wurden über gängige Hohlstrahlrohre der Feuerwehr durchgeführt. Ab Versuch V04 erfolgte der Löschangriff ausschließlich mit dem Hohlstrahlrohr inkl. der standardmäßigen Ausstattung der Berufsfeuerwehr. Als Löschmittel wurde in den Großbrandversuchen im Brandofen ausnahmslos Wasser verwendet.

Einfluss der Menge ungeschützter Holzflächen auf den Brandverlauf

Die Beurteilung des Einflusses der Menge ungeschützter Holzflächen erfolgte auf Basis des Verlaufes der Brandraumtemperaturen in der Abkühlphase wohlwissend, dass die zugrundeliegenden vereinfachten Ventilationsbedingungen eine Beeinflussung dieser beinhalten. Den Messwerten aus Abbildung 133 ist zu entnehmen, dass mit Zunahme des Verhältnisses der Menge an ungeschützten Holzoberflächen (vgl. Tabelle 21 oder Tabelle 18, Angabe Verhältnis ungeschützter zu max. ungeschützter Holzflächen in Prozent in den Bezeichnern) der Temperaturabfall in der Abkühlphase deutlich langsamer verläuft. Dieselbe Erkenntnis, bezogen auf einen mittleren Maßstab zeigten auch die Room Corner Untersuchungen. Demnach lassen sich die Erkenntnisse der Room Corner Untersuchungen hier bestätigen. Zudem ist sichtbar, dass bei einer ungeschützten Holzfläche ein schneller Temperaturabfall in der Abkühlphase stattfindet als bei mehreren ungeschützten Holzflächen.

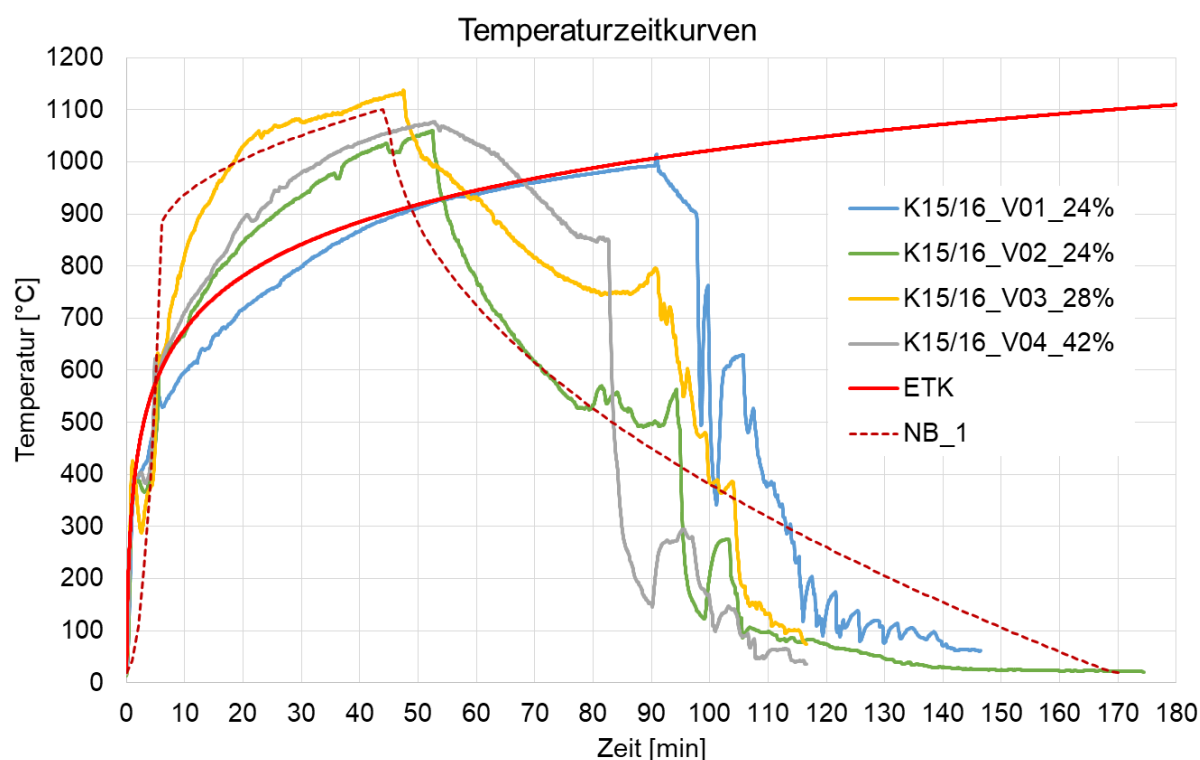


Abbildung 133: Verlauf der Brandraumtemperaturen der 1. Serie Großbrandversuche

Ein Selbstverlöschen konnte in dieser Versuchsreihe jedoch nicht festgestellt werden, da die Brandversuche unter Naturbrandbeanspruchung vorzeitig abgebrochen werden mussten. In V02 stellte sich ein Durchbrand einer Wand-Decken Fuge, infolge einer unsachgemäßen Ausführung, ein. Während die Versuche V03 und V04 aufgrund des Temperaturanstieges im Brandraum in Kombination mit einer Temperatur oberhalb 500 °C keine Anzeichen eines Selbstverlöschens aufwiesen.

Tabelle 21: Menge und Verhältnis der ungeschützten Holzoberflächen

Bezeichnung	A_{bb} m ²	A_{bb} / A_f -	α_{bb} (A_{bb} / A_{TIM}) %
V01	16 m ²	1	24
V02	16 m ²	1	24
V03	18 m ²	1,125	28
V04	27,2 m ²	1,7	42

Zur Berechnung des Verhältnisses (α_{bb}) zwischen der ungeschützten Holzfläche (A_{bb}) und der maximal möglichen ungeschützten Oberfläche (A_{TIM}) wird folgende Gleichung angewendet, wobei A_f die Brandraum-grundfläche ist:

$$A_{TIM} = A_t - A_w - A_f$$

Äquivalenzbetrachtung

Ein in Abbildung 134 dargestellter Vergleich der Brandraumtemperaturen von V01 und V02 stellt eine Äquivalenzbetrachtung zwischen der Brandbeanspruchung gemäß ETK und Naturbrand_1 dar. Die beiden Versuche besaßen einen identischen Aufbau, ausgenommen der unterschiedlichen Brandbeanspruchung. Einen Unterschied von 3 % zeigt der Vergleich der thermischen Einwirkung bis zum Beginn der Löschmaßnahmen (Integral der Temperaturzeitkurven), wie Tabelle 2 zeigt. Entsprechend kann für

die Bauteile eine annähernd äquivalente thermische Beanspruchung der beiden Versuche unterstellt werden.

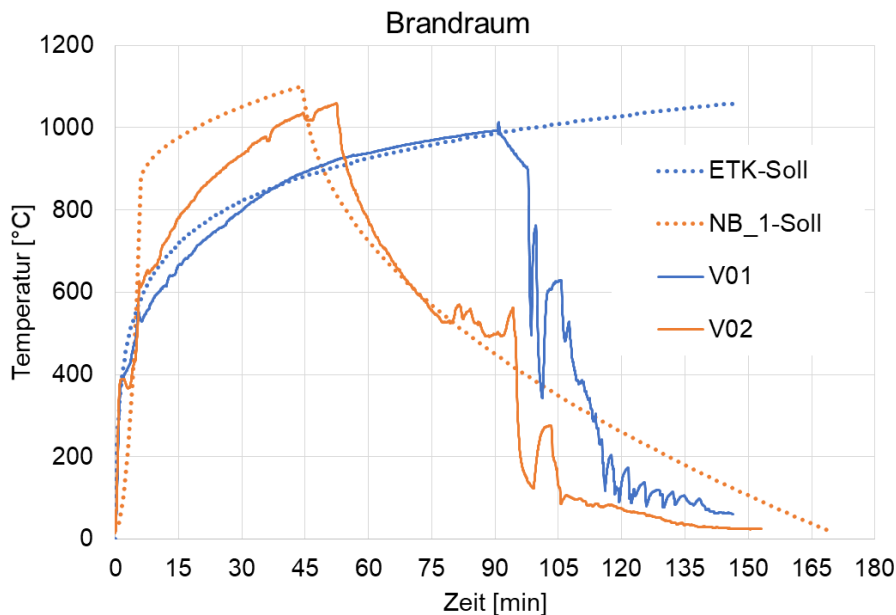


Abbildung 134: Vergleich der Brandraumtemperaturen unter ETK- bzw. Naturbrand_1-Beanspruchung

Tabelle 22: Vergleich der thermischen Einwirkung (Integral der Temperaturzeitkurve)

Brandkurve (Beflammungsdauer; Beginn Löschmaßnahmen)	Beflammung T·min	Nachbrand T·min	Gesamt T·min	Differenz -
ETK (90 min)	99.961	-	99.961	1,00
V01 (90 min; 98min)	98.994	9.758	108.752	1,09
Naturbrand_1 (45 min)	53.949	81.274	135.196	1,35
V02 (52 min; 96 min)	57.911	39.177	97.088	0,97
V03 (47 min; 91 min)	56.776	49.816	106.592	1,07
V04 (52 min; 83 min)	60.194	37.137	97.331	0,97

Die Gegenüberstellung der Temperaturen in der Grenzschicht sowie die Verkohlungsbilder zeigen eine positivere Bewertung der Bauteile unter der definierten Naturbrandbeanspruchung. Hinsichtlich der Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm Gipsfaserplatten (Abbildung 135) lässt sich eine deutlich geringere Maximaltemperatur in der Grenzschicht feststellen. Entsprechend sind auf der Holzoberfläche nur lokale Verkohlungen im Bereich der Plattenfugen und Anschlussfuge zum Brandofen zu erkennen. Unter der ETK-Beanspruchung traten deutlich höhere Maximaltemperaturen in der Grenzschicht auf, welche auch den Grad der Verkohlungen auf der Holzfläche widerspiegeln. Unabhängig der Brandbeanspruchung konnte ein Entzünden und selbstständiges Weiterbrennen der anfänglich geschützten Holzflächen für beide Versuche nicht beobachtet werden.

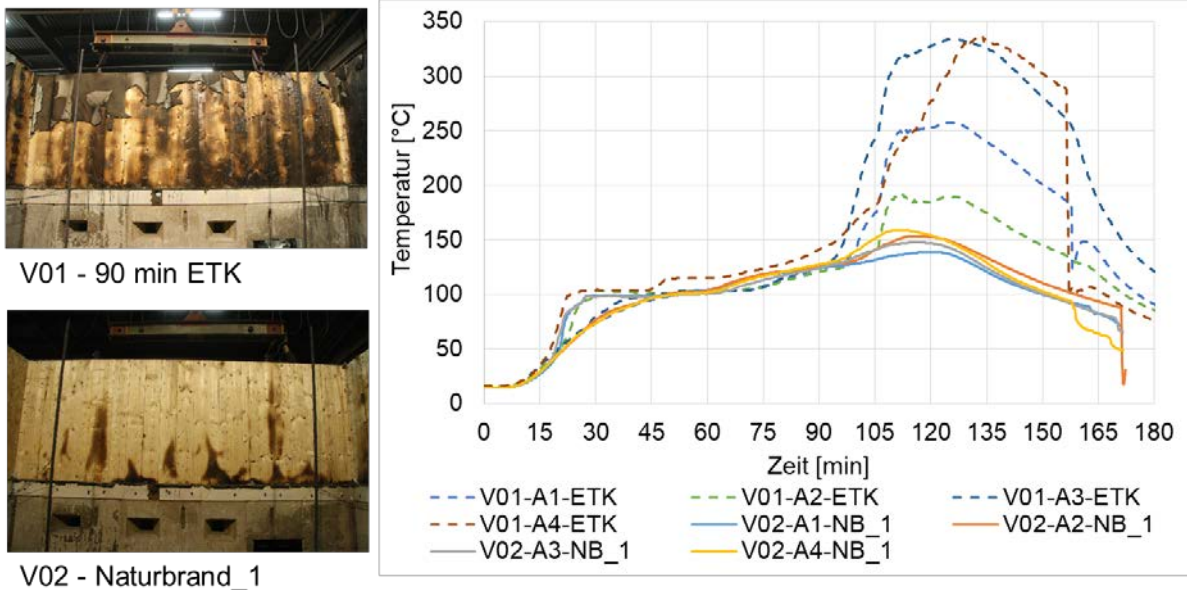


Abbildung 135: Gegenüberstellung der Grenzschichttemperatur und Verkohlungsbild bei 2 x 18 mm GF

Ein ähnliches Bild der Messdaten in Bezug auf den Äquivalenzvergleich zeigt Abbildung 136 für die Brandschutzbekleidung aus Gipsfaserplatten. Für die aus 2 x 15 mm bestehende Brandschutzbekleidung konnte in den beiden Versuchen ein Entzünden und selbstständiges Weiterbrennen der anfänglich geschützten Holzflächen beobachtet werden.

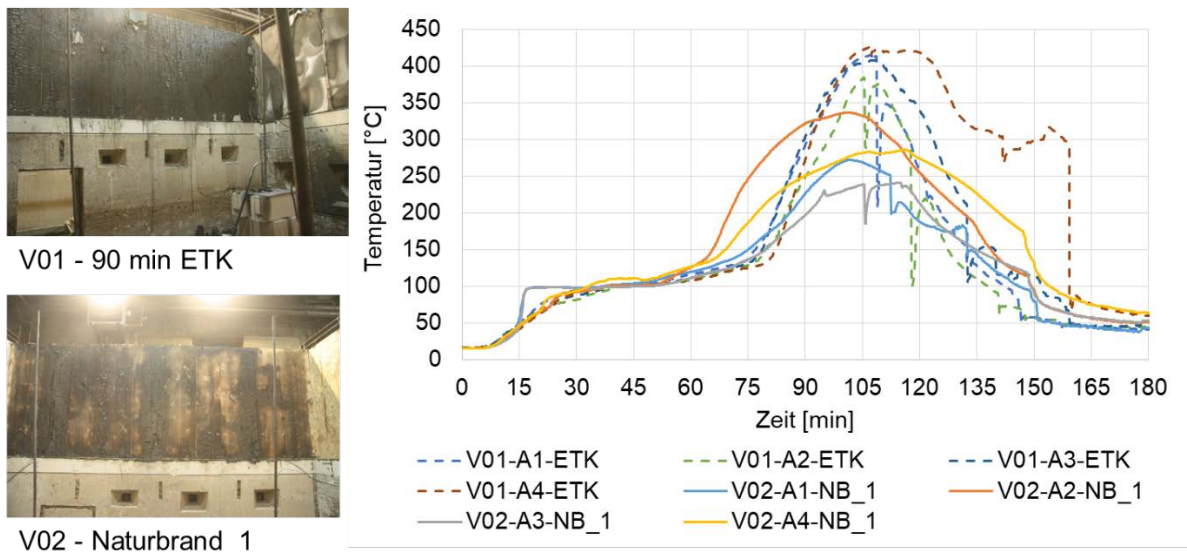


Abbildung 136: Gegenüberstellung der Grenzschichttemperatur und Verkohlungsbild bei 2 x 15 mm GF

Ungeachtet der Brandbeanspruchung zeigen die Messdaten der Temperaturentwicklung in der Grenzschicht in Abhängigkeit der Bekleidungsstärke eine annähernd identische Dauer des 100°C-Plateaus (Schutzwirkung). Durch die fallenden Brandraumtemperaturen nach der 45. Versuchsminute unter Naturbrand_1-Beanspruchung in V02 ist der Temperaturanstieg in der Grenzschicht geringer als unter ETK-Beanspruchung. Dieses ist auch auf die unterschiedliche Durchwärmungstiefe in Abhängigkeit der Brandbeanspruchung zurückzuführen. Wie auch schon in den Untersuchungsergebnissen in Kapitel III 3.1.2.3 zeigen die Ergebnisse der Großbrandversuche im Brandofen eine bereichsweise Äquivalenz (über die Schutzwirkung) zwischen dem Feuerwiderstandverhalten des Bauteils für die angesetzten Brandbeanspruchungen (ETK – Naturbrand_1). Eine vollständige Äquivalenz kann aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Versuches V02 anhand der hier zugrundeliegenden Ergebnisse nicht festgestellt werden.

Skalierbarkeit

Die direkte Übertragung oder Extrapolation von kleinmaßstäblichen Versuchsergebnissen auf größere Maßstäbe ist im Brandschutz aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren und deren Nichtlinearitäten grundsätzlich nicht gegeben. Bezüglich der Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung zeigt ein Vergleich von Messdaten, wie in Abbildung 137 dargestellt, der kleinmaßstäblichen Untersuchungen aus Kapitel III 3.1.2.3 gegenüber den großmaßstäblichen Ergebnissen eine Skalierbarkeit. Die Ergebnisse der Untersuchungen im Brandofen nach DIN 4102-8 (durchgezogene Linien in Abbildung 137) sind gegenüber den großmaßstäblichen Brandversuchen (gestrichelte / gepunktete Linien in Abbildung 137) konservativer zu bewerten, da hier das 100°C-Plateau (Schutzwirkung) zu einem früheren Zeitpunkt der thermischen Beanspruchung überschritten wird. Dieses ist unabhängig der Bekleidungsstärke festzustellen, wie Abbildung 138 bestätigt. Demnach lassen sich Teile der Erkenntnisse der Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen hier bestätigen.

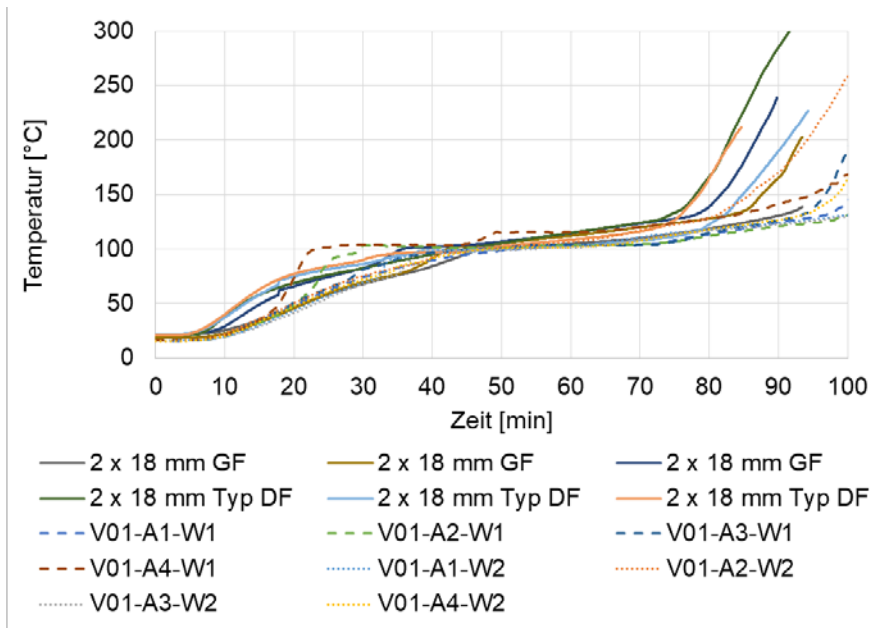


Abbildung 137: Vergleich zur Skalierbarkeit der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Maßstäbe für 2 x 18 mm Brandschutzbekleidungen unter 90minütiger ETK-Beanspruchung

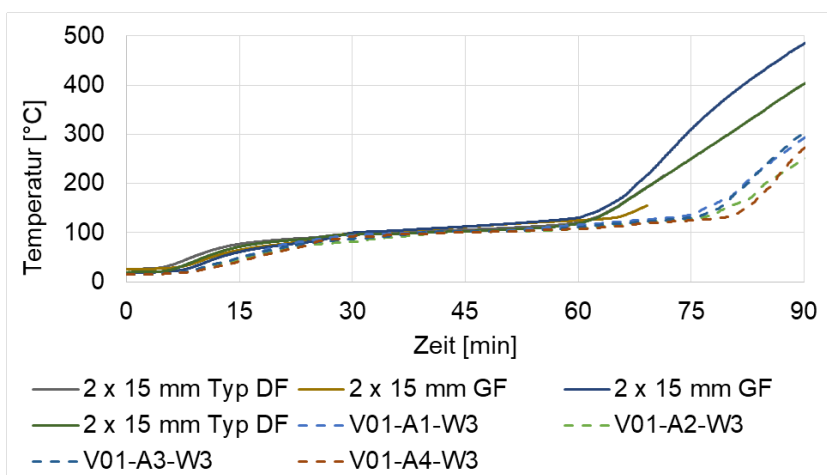


Abbildung 138: Vergleich zur Skalierbarkeit der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Maßstäbe für 2 x 15 mm Brandschutzbekleidungen unter 90minütiger ETK-Beanspruchung

Die Erkenntnisse der kleinskaligen Abbrandversuche sowie die damit verbundene Abbrandrate zeigen für Fichte eine sehr gute Abbildung der normativ definierten Werte gemäß [42] (siehe Kapitel III 3.1.2.2).

Die vergleichende Betrachtung der Abbrandtiefen unter ETK-Beanspruchung (siehe Tabelle 23) lässt für den Versuch V01 eine leicht höhere Abbrandtiefe bzw. Abbrandrate erkennen, welche jedoch auch eine minimal längere Beanspruchungsdauer beinhaltet. Ursache für die Abweichungen in der Abbrandrate könnten neben dem Volumen des Brandraumes der Sauerstoffgehalt im Brandraum, die Anzahl der Stichproben als auch die Summe an Einflussfaktoren auf das Abbrandverhalten per se sein (siehe dazu [43]).

Bei den Versuchen unter Naturbrandbeanspruchung ist die Vergleichbarkeit weiter erschwert, da in den kleinmaßstäblichen Untersuchungen die Abklingphase, soweit umsetzbar, gemäß den vordefinierten Naturbrandkurven abgefahren wird. Im Gegensatz dazu stellt sich in den großmaßstäblichen Ofenuntersuchungen der Verlauf der Abklingphase bei definierten Randbedingungen und Branddynamik selbst ein. Dementsprechend ist eine Betrachtung der Abbrandtiefen zur Bewertung der Skalierbarkeit nicht möglich. Hinsichtlich der Abbrandraten ist anzumerken, dass diese aufgrund der sich verändernden Einwirkung gemäß den Naturbrandkurven ein dynamisches Abbrandverhalten einnimmt. Eine gegenüberstellende Betrachtung der Abbrandraten wie unter ETK-Beanspruchung, bei der das Abbrandverhalten annähernd konstant angenommen wird, ist nicht zielführend.

Tabelle 23: Abbrandtiefe der ungeschützten Holzbauteile im Großmaßstab (V01 - V04 als Mittelwert von 10 Stichprobenmessungen) und Kleinmaßstab (NH_BSH als Mittelwert aus 3 Stichprobenmessungen) für Fichte

Versuch (Löschbeginn)	Abbrandtiefe mm	Abbrandrate mm/min
V01 (98 min)	68	0,69
NH_BSH_Fi_ETK_1D (90 min)	58	0,64
V02 (96 min)	55	-
V03 (91 min)	65	-
V04 (83 min)	60	-
NH_BSH_Fi_NB_1_1D (133 min)	63	-

Thermische Delamination

In V06 wurde eine ungeschützte Brettsperrholzdecke brandschutztechnisch untersucht, da bei Brettsperrholzbauteilen die Neigung zur thermischen Delamination [125] besteht. Die in Abbildung 139 ersichtlichen Temperaturen zeigen für den Brandraum nach Abstellen der Ölbrenner (45. Versuchsmminute) kein signifikantes Abfallen der Brandraumtemperaturen. Über eine Beobachtungsdauer von 35 Minuten hielten sich die Temperaturen im Brandraum oberhalb 1.000 °C, dieses ergab sich infolge der thermischen Delamination. Infolge des Abbrandes und mit der stetigen Durchwärmung der Brettsperrholzelemente stieg auch die Temperatur in den Klebefugen der Lamellenlagen. Der verwendete Kleber in den untersuchten Brettsperrholzelementen verliert durch die Erwärmung an Adhäsion und durch die Schwerkraft fielen einzelne Lamellen von der Decke ab. Entsprechend wurde an der Decke eine nicht verkohlte Holzschicht freigelegt und auf dem Brandraumboden sammelten sich die abgefallenen Lamellen, welche sich weiter am Brandgeschehen beteiligten. Abbildung 140 (links) zeigt den Brandraumboden während der Demontage der Brettsperrholzelemente. Deutlich ist hier die zusätzliche Brandlast infolge der abgefallenen Lamellen zu erkennen. Abbildung 140 (rechts) zeigt ein Brettsperrholzelement mit den Anzeichen einer thermischen Delamination einzelner Lamellen.

Auch Messdaten der Temperaturentwicklung in der ungeschützten Brettsperrholzdecke in Abbildung 141 lassen durch den teilweise schlagartigen Anstieg der gemessenen Temperaturen auf ein Abfallen von Lamellen schließen.

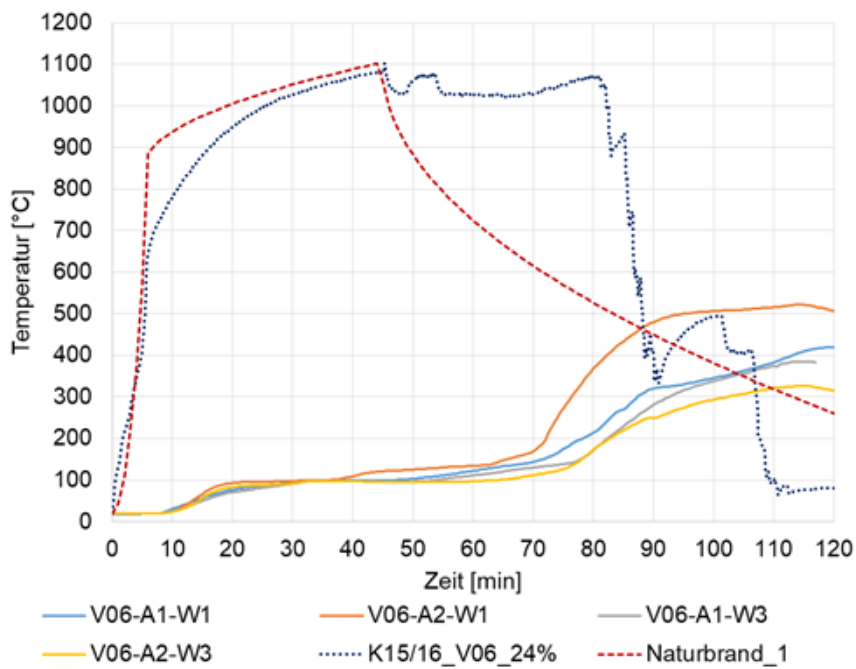


Abbildung 139: Verlauf Brandraumtemperatur (K15/16_V06_24%) und Temperatur in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holzkonstruktion bei 2 x 18 mm Gipsplatten von V06



Abbildung 140: Aufnahme des Brandraumes kurz nach Abnehmen der Deckenelemente (links) beflamte Deckenseite (rechts) von V06

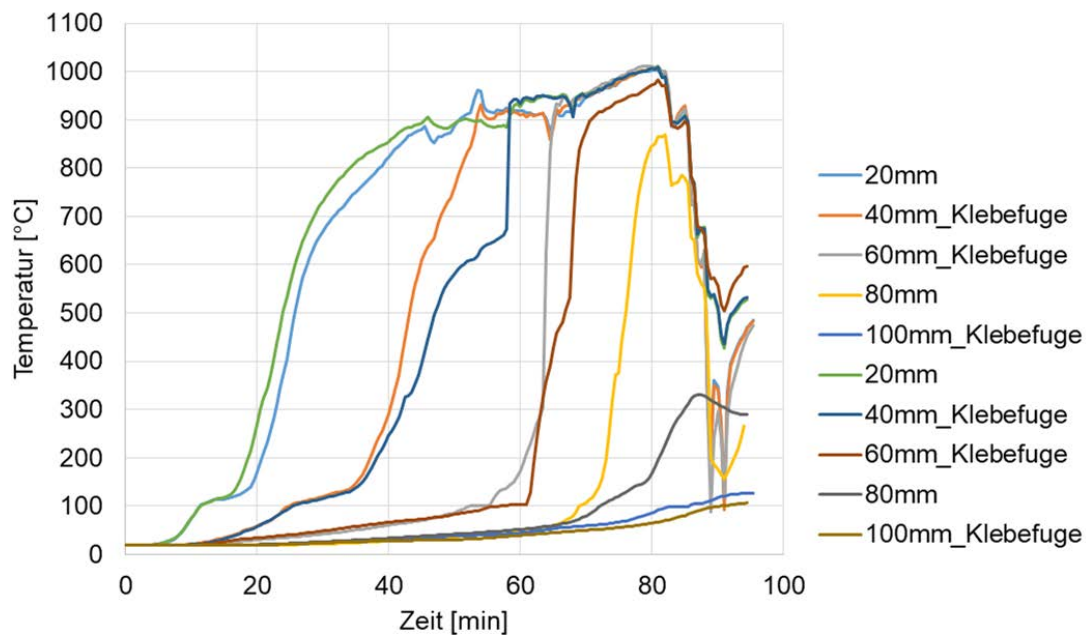


Abbildung 141: Temperaturentwicklung in der Brettsperrholzdecke

Unterschiedliche Brandbeanspruchung

Als unterer Grenzwert für die in AP 6 durchzuführenden probabilistischen Analysen ist der Versuch V07 innerhalb dieser Versuchsreihe anzusehen. Aufgrund des identischen Versuchsaufbaues mit V01 und V02 können die Ergebnisse entsprechend der Brandbeanspruchung gegenübergestellt werden. Nach dem Abschalten der Ölbrenner zur 152. Versuchsminute stellte sich im Brandraum eine deutlich stärkere Temperaturabnahme vergleichend zur Modellkurve (Naturbrand_2_1250) ein, wie Abbildung 142 zeigt. Hinsichtlich der Schutzwirkung der Brandschutzbekleidungen aus 2 x 15 mm bzw. 2 x 18 mm Gipsplatten (siehe Abbildung 142) wurde eine Grenzschichttemperatur von 200 °C erst nach 140 Minute (2 x 15 mm) oder 180 Minuten (2 x 18 mm) erreicht. Im Gegensatz dazu, entsprechend Abbildung 137 oder Abbildung 138 war eine Grenzschichttemperatur von 200 °C in V01 bzw. V02 bereits nach 85 Minuten (2 x 15 mm) bzw. 100 Minuten (2 x 18 mm) erreicht.

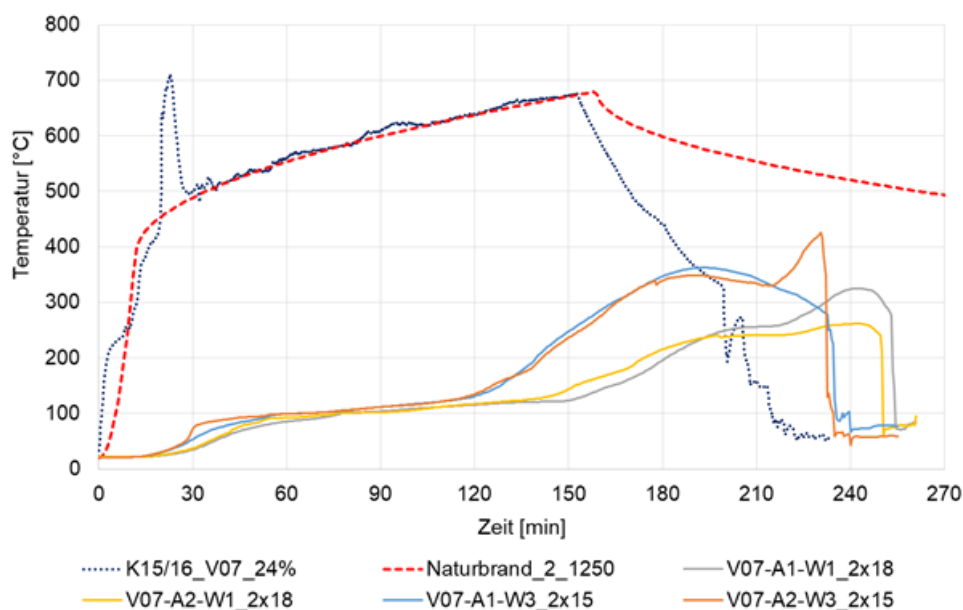


Abbildung 142: Verlauf Brandraumtemperatur (K15/16_V07_24%) und Temperatur in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holzkonstruktion bei 2 x 15 mm bzw. 2 x 18 mm Gipsplatten von V07

Bezogen auf die Abbrandtiefen der Versuche V01, V02 und V07 sind ebenfalls Unterschiede feststellbar. Die Abbrandtiefen für V01 und V02 sind in Tabelle 23 aufgelistet (V01 → 68 mm; V02 → 55 mm). Für V07 konnte an den ausgekühlten Deckenelementen eine Abbrandtiefe von ca. 50 mm ermittelt werden.

Stärkere Bekleidungsstärken

Die Leistungsfähigkeit von Bekleidungsstärken von mehr als 2 x 18 mm zeigt die Abbildung 143. Wie der Belegversuch V3 zeigt (Kapitel III 3.1.2.12) stellte sich unter den versuchstechnischen Randbedingungen ein Überschreiten der Schutzwirkung für Brandschutzbekleidungen aus 2 x 18 mm nach ca. 65 Minuten ein (Abbildung 258). Entsprechend wurden in V05, welcher im Anschluss an die Belegversuche durchgeführt wurde, die Bekleidungsstärken angepasst. Um eine Vergleichbarkeit zu dem Belegversuch V3 herzustellen ist die gemessene Brandraumtemperatur (rote gestrichelte Linie) in dem Ofenversuch angesetzt (blaue gepunktete Linie).

Für die Brandschutzbekleidungen lässt sich, wie schon aus Kapitel III 3.1.2.3 bekannt, eine längere Schutzdauer bzw. höhere Leistungsfähigkeit über eine größere Schichtdicke der Brandschutzbekleidung erzielen. In der späten Abkühlphase führte die Nacherwärmung infolge der gespeicherten Wärmemenge der Brandschutzbekleidung zu einem Temperaturanstieg in der Grenzschicht und auftretenden Verfärbungen und Verkohlungen der anfänglich geschützten Holzflächen (siehe Abbildung 144).

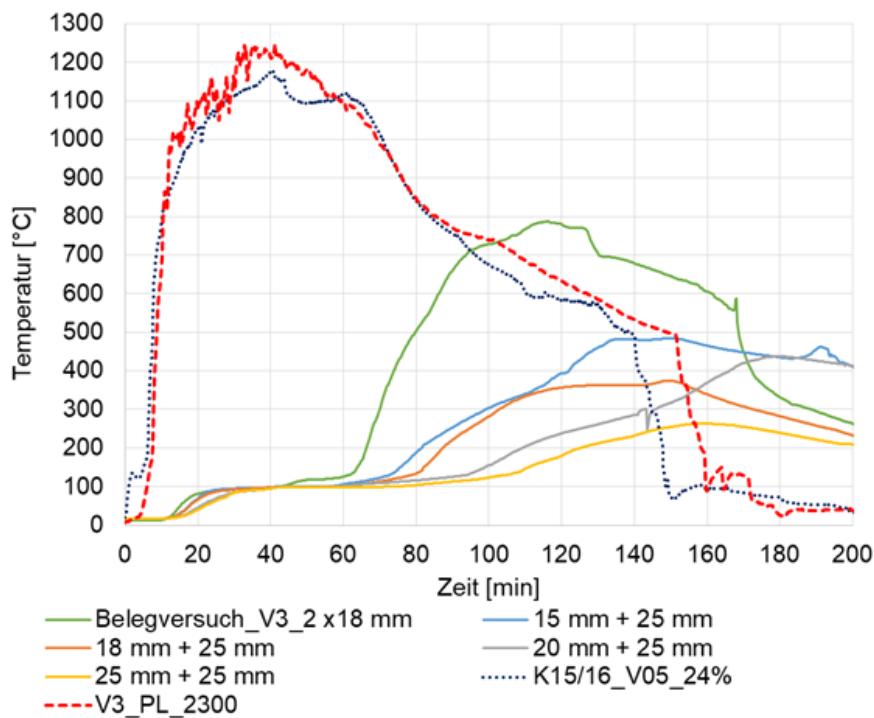


Abbildung 143: Vergleich Brandraumtemperaturen (K15/16_V05_24%) und Grenzschichttemperaturen unterschiedlicher Bekleidungsstärken für Belegversuch V3 und Ofenversuch V05

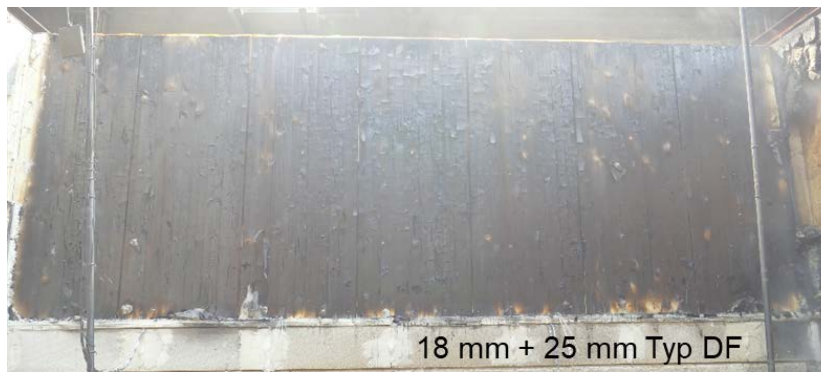


Abbildung 144: Verkohlungsbilder der anfänglich geschützten Bauteile in V05

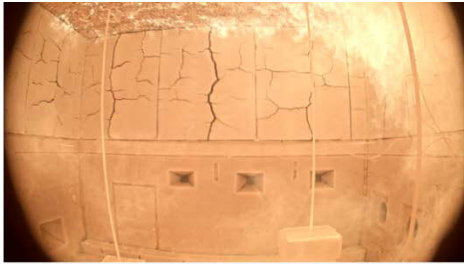
Nachbrandverhalten

Die Analyse des Nachbrandverhaltens erfolgte unter Berücksichtigung des Verhaltens der ungeschützten und anfänglich geschützten Holzbauteile unter der Naturbrand_1-Beanspruchung. Aus Abbildung 145 (links) lässt sich für die ungeschützten Holzflächen kurz nach Beendigung der Beflammung ein Mitbrennen dieser erkennen. Wie schon in Abbildung 133 dargestellt, zeigten auch die Brandraumbilder vor Beginn der Löschmaßnahmen in Abbildung 145 (rechts) nur für den Versuchsaufbau mit einer ungeschützten Holzfläche einen positiven Brandverlauf, hinsichtlich der Beurteilung des Nachbrandverhaltens. In V02 war bereits zur 74. Versuchsminute ein vollständiges Verlöschen der Flammen an der ungeschützten Decke festzustellen. In den Versuchen V03 und V04 konnte kein Verlöschen der Flammen an den ungeschützten Holzflächen bis zum Versuchsabbruch bzw. Einsetzen der Löschmaßnahmen beobachtet werden.

Bei den anfänglich geschützten Holzflächen war bereits aus den Untersuchungen aus Kapitel III 3.1.2.3 bekannt, dass die Brandschutzbekleidungen bestehend aus 2 x 15 mm sowie 15 mm + 18 mm Gipsplatten die Schutzwirkung nicht über die Gesamtdauer der Naturbrandkurve ‚Naturbrand_1‘ erhalten bleibt. Neben den Temperaturmessungen aus Abbildung 136 ist auch in Abbildung 145 ein Versagen der Kombinationen (2 x 15 mm, 15 mm + 18 mm) aufgrund der Transmission von Flammen aus den Rissen / Stoßfugen der Bekleidung erkennbar. Daraus lässt sich ableiten, dass die anfänglich geschützte Holzoberfläche sich entzündet hat und selbstständig weiterbrennt.

Selbst für die, in den Untersuchungen aus Kapitel III 3.1.2.3 als leistungsfähig bewertete, Kombination von

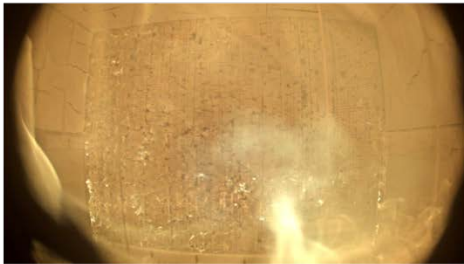
2 x 18 mm Gipsplatte traten bei den Großbrandversuchen im Brandofen teilweise starke lokale Verkohlungen / Verfärbungen der zu schützenden Holzfläche auf. Ein Entzünden und selbstständiges Weiterbrennen wurde innerhalb der Versuchsdauer aber nicht beobachtet.



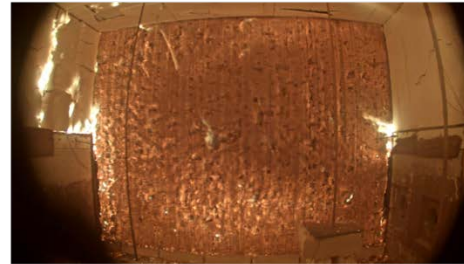
V02 - 54. Versuchsminute



V02 - 94. Versuchsminute



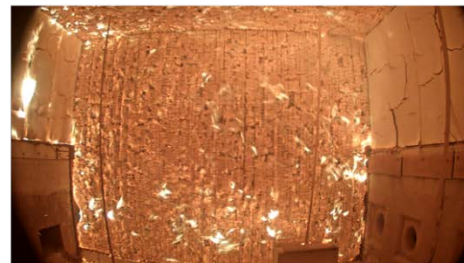
V03 - 58. Versuchsminute



V03 - 91. Versuchsminute



V04 - 54. Versuchsminute



V04 - 82. Versuchsminute

Abbildung 145: Brandraumbild zum Zeitpunkt nach dem Abstellen der Brenner sowie vor Beginn der Löschmaßnahmen

Aus den Verläufen der Brandraumtemperaturen der Versuche V05 bis V08, wie in Abbildung 146 gezeigt, ist ableitbar wie unterschiedlich sich die Raumtemperatur in der Abkühlphase ausbildet. Neben der Beteiligung von strukturellen Brandlasten ist hier als wesentlicher Einflussparameter der Temperaturzeitverlauf während der Beflammung zu nennen.

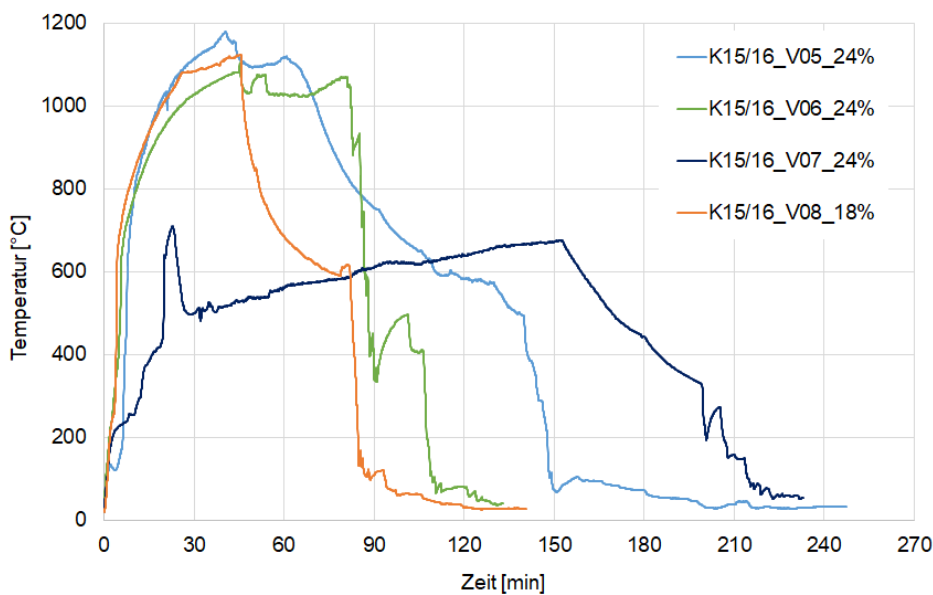


Abbildung 146: Verlauf der Brandraumtemperaturen der 2. Serie Großbrandversuche

Löschmaßnahmen

Für die Löscharbeiten wurde im Vorfeld mit den Einsatzkräften der Berufsfeuerwehr abgestimmt die Verwendung von Löschwasser auf ein Minimum zu begrenzen. Die verwendete Löschmittelmenge wurde über eine Durchflussmessstrecke aufgezeichnet. In Tabelle 24 werden die Löscharbeiten der Großbrandversuche dargestellt.

Tabelle 24: Übersicht über das Löschen der Großbrandversuche

Bez.	Kriterium Löschbeginn	Löschmethode	Löschangriff	Nachlöschen
V01	ETK + 8min Nachbrand	Fognail + BF	105,2 L (Fognail) in 198 s	ca. 1200 Liter
V02	Durchbrand Wandanschluss	Fognail + BF	287,5 L (Fognail) in 255 s	ca. 1000 Liter
V03	Durchbrand Wand-/Deckenaufleger	BF	745,3 Liter in 2103 s	
V04	Durchbrand Wandanschluss	Fognail + BF	388,2 L (Fognail) in 456 s	ca. 1000 Liter
V05	Löschen erst bei Abheben der Decke	BF	Keine Aufzeichnung	
V06	Brandraum kühlte nicht ab, aufgrund Delamination des CLT	BF	Nicht auswertbar	
V07	Brandraum auf 300°C abgekühlt, Durchwärmung der Bauteile, lokale Flammen	BF	Nicht auswertbar	
V08	Brandraum kühlte nicht ab, da Bekleidungen der Wandbauteile versagten	BF	Nicht auswertbar	

In den Versuchen V01, V02 und V04 wurde ein Fognail zur Abkühlung des Brandraums und zum Löschen des primären Flammenbrandes genutzt. Dieser wurde durch eine Anschlussfuge in den Brandraum geführt, wodurch sich das eingeleitete Löschwasser im Brandraum verteilen konnte. Die Verwendung des Fognails zeigte eine gute Leistungsfähigkeit hinsichtlich des Ablöschens des Flammenbrandes. Anschließend waren stets weiterführende Löscharbeiten mit einem herkömmlichen Hohlstrahlrohr durch die Berufsfeuerwehr (BF) erforderlich. Der Brandofen konnte versuchsbedingt nur über eine Mannöffnung (0,5 x 0,9 m²) betreten werden. Die erzwungenen Ventilationsbedingungen sowie die minimale Verwendung von Löschwasser hatten eine sehr langsame Abkühlung des Brandraums zur Folge. Der Innenangriff konnte somit erst erfolgen, wenn die Brandraumdecken innen-/unterseitig gelöscht sowie entfernt wurden. Infolgedessen kühlte der Brandraum ab und konnte zur Detektion und Bekämpfung von eventuellen Fugen- und Einbränden betreten werden. Der Löschwasserdurchfluss des Fognails wurde messtechnisch erfasst, siehe Abbildung 147, Abbildung 148 und Abbildung 150. Die Nachlöscharbeiten durch die Berufsfeuerwehr wurden über den Löschwasserverbrauch am Löschfahrzeug geschätzt.

In den weiteren Großbrandversuchen wurde kein Fognail mehr eingesetzt, die Löscharbeiten begannen stets mit der beschriebenen Brandbekämpfung mit Hohlstrahlrohr durch die Mannöffnung. Im Versuch V03 wurde der Durchfluss des Hohlstrahlrohrs der Berufsfeuerwehr aufgezeichnet, siehe Abbildung 149. Die Messwernerfassung zum Löschwasserverbrauch in den Versuchen V06, V07 und V08 ist nicht auswertbar.

Im Versuche V05 wurde der Brandraum nach ca. 140 Minuten durch das Anheben der Deckenteile geöffnet und von außen durch die Berufsfeuerwehr gelöscht, der Löschwasserdurchfluss ist nicht dokumentiert.

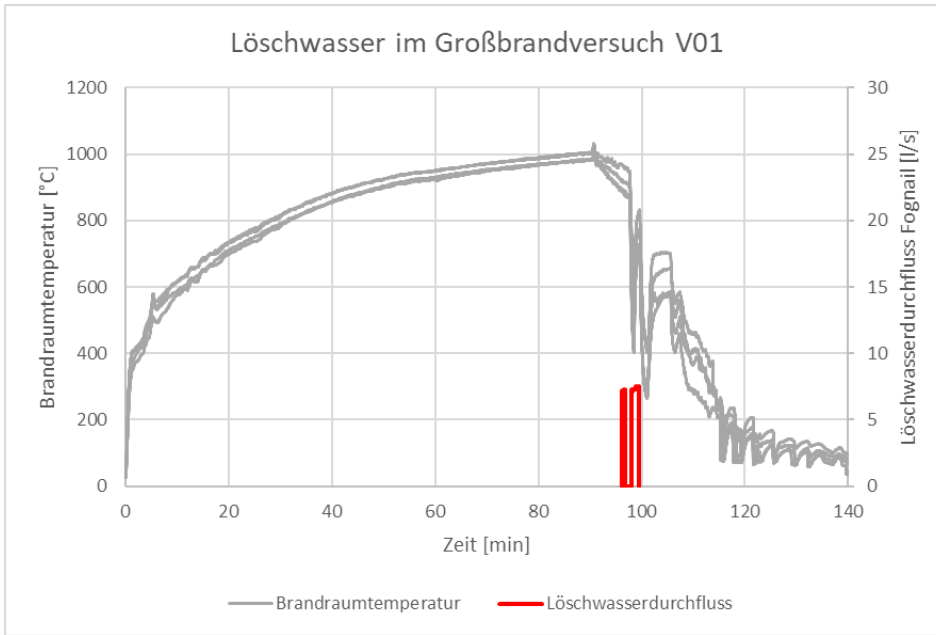


Abbildung 147: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V01

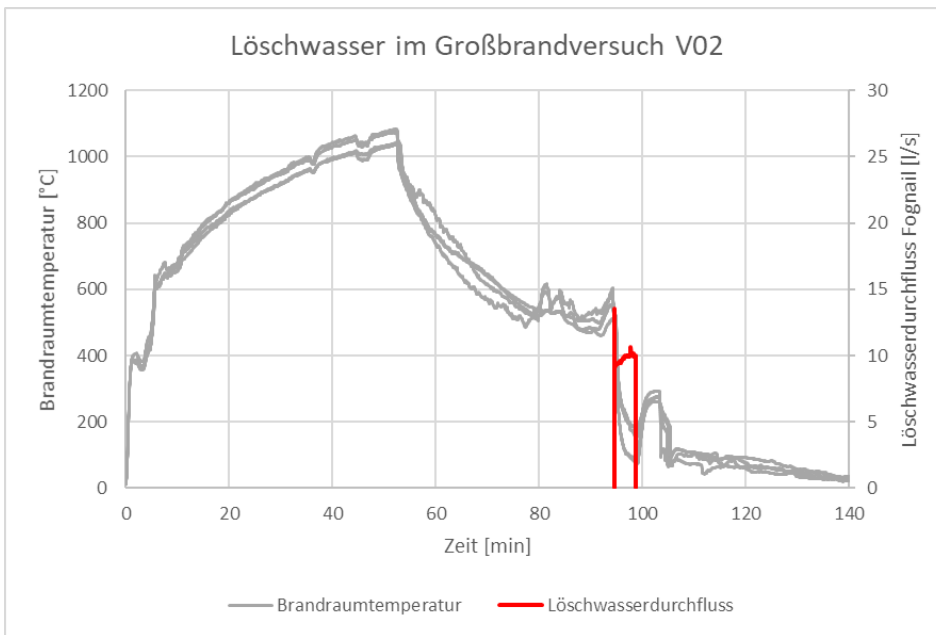


Abbildung 148: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V02

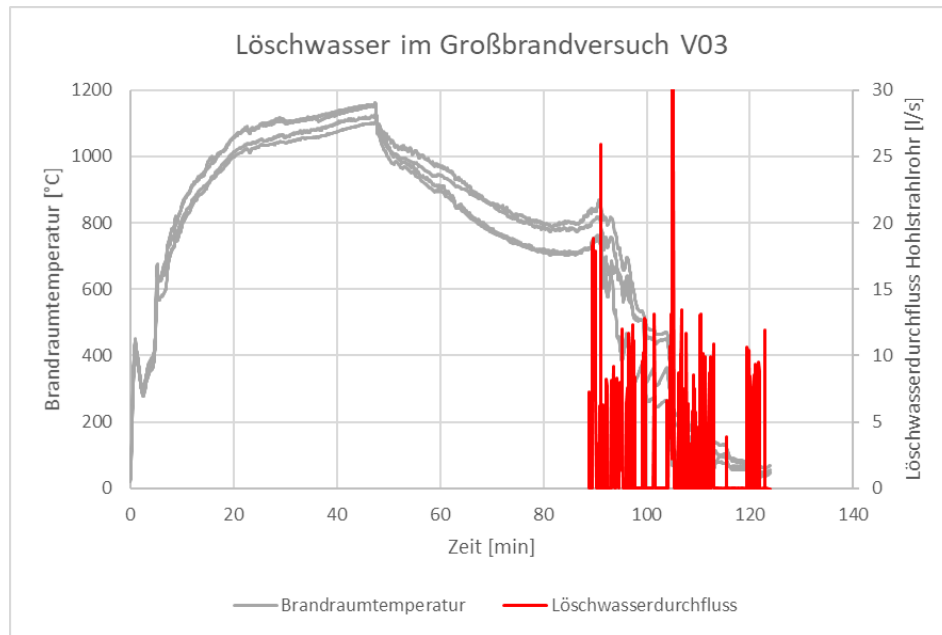


Abbildung 149: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V03

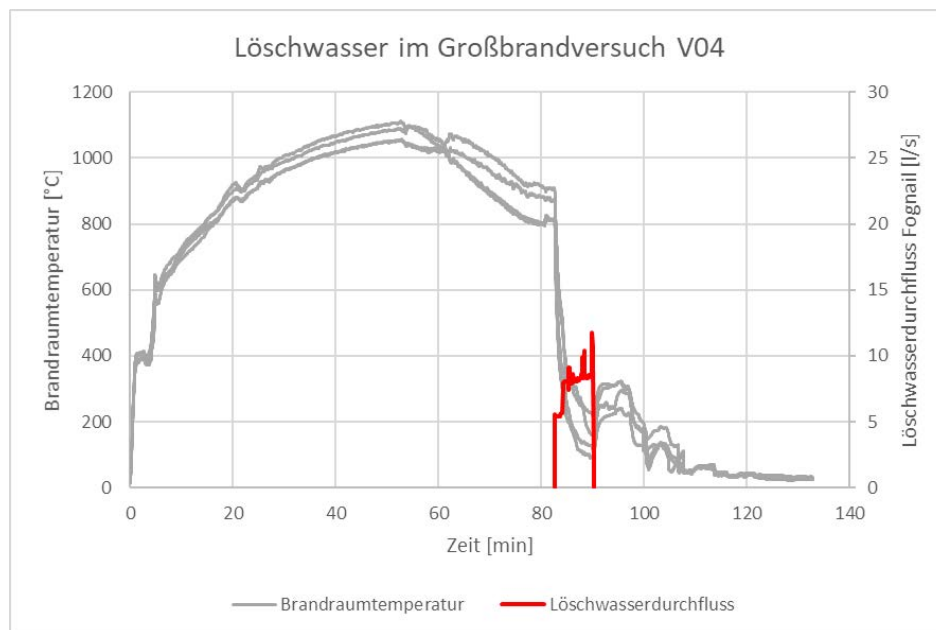


Abbildung 150: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V04

Der Einfluss ungeschützter sowie anfänglich geschützter Holzbauteile zeigte in dieser Versuchsreihe keinen erhöhten Aufwand auf die Löschmaßnahmen des Flammenbrandes. Hinsichtlich der abschließenden Löschmaßnahmen (Demontieren der Brandschutzbekleidung, Ablöschen lokaler Glutnester) war jedoch eine größere Sorgfalt erforderlich. Die zur Hilfenahme einer Wärmebildkamera der Berufsfeuerwehr zeigte eine sehr gute Möglichkeit zur Identifizierung der lokalen Wärmequellen.

Holz-Beton-Verbunddecke im Großbrandversuch

In Abbildung 151 sind die Verläufe der Temperaturmessstellen im Brandraum des Brandversuchs V05, in der Grenzschiicht zwischen Holz- und Betonschicht sowie an der Bewehrung in der Betonschicht

dargestellt. Die Beurteilung der Versuchsergebnisse erfolgt im Arbeitspaket 3 Nachbrand und Löschverhalten.

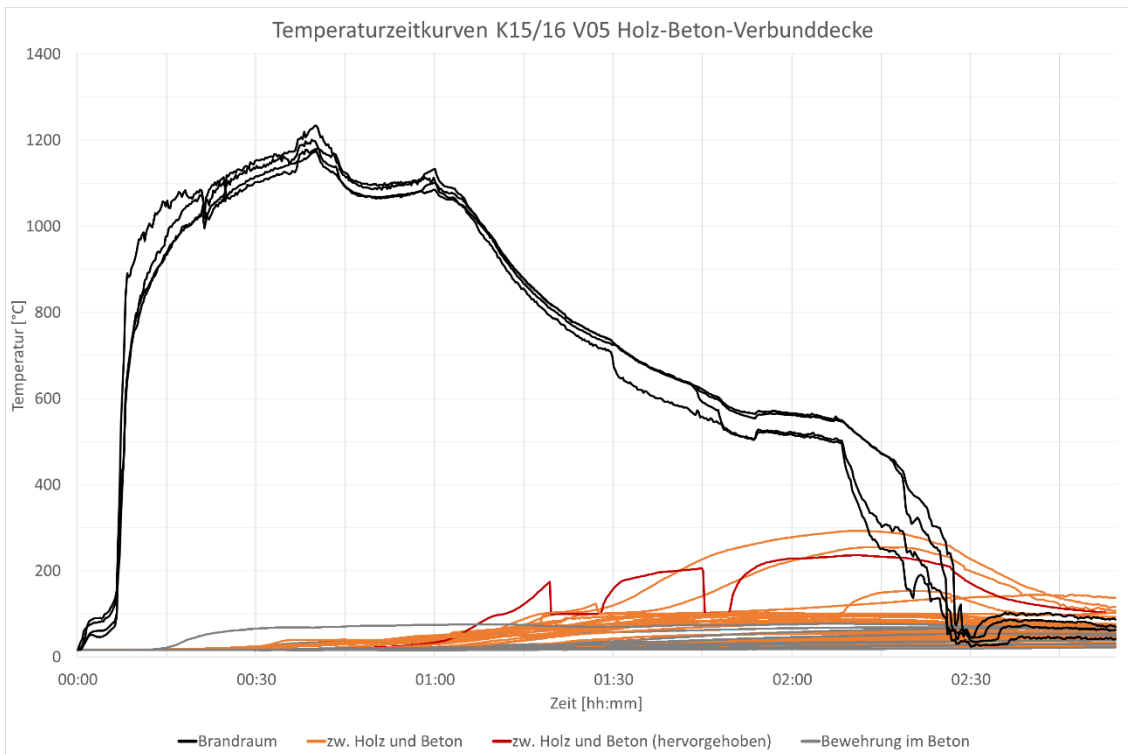


Abbildung 151: Temperaturzeitkurven K15/16 V05 – Holz-Beton-Verbunddecke

Nach dem Brandversuch und den Rückbauarbeiten wurden die Restholzdicken der Holzschicht der HBV-Decke gemessen. Gemessen wurden die unverkohelten und unverfärbten Restholzdicken sowie die unverkohelten, aber bereits thermisch verfärbten Restholzdicken. An beiden Endauflagern der HBV-Decke mit den 80 mm breiten Betonnocken (Abbildung 152 bis Abbildung 155) waren horizontal ca. 50 mm Restholz unverkohlt und unverfärbt sowie weitere 40 mm unverkohlt, aber thermisch verfärbt. Im seitlichen Auflagerbereich ohne Betonnocke (Abbildung 158) waren horizontal ca. 90 mm Restholz unverkohlt und unverfärbt sowie weitere 20 mm Restholz unverkohlt, aber thermisch verfärbt. Die vertikale, unverfärbte und unverkohlte Restholzdicke in Auflagernähe betrug ca. 15 mm, die unverkohlte Restholzdicke betrug ca. 25 mm. In Feldmitte und im Bereich der Koppelbretter (Abbildung 156 und Abbildung 157) betrug die unverfärbten Restholzdicken ca. 25 mm, die unverkohlte Restholzdicke ca. 30 mm.



Abbildung 152: Auflager Abzugsseitig



Abbildung 153: Auflager Brennerseite



Abbildung 154: Auflager Abzugsseite geöffnet



Abbildung 155: Auflager Brennerseite geöffnet



Abbildung 156: Feldmitte



Abbildung 157: Koppelbrett freigelegt



Abbildung 158: seitliches Auflager

Zusammenfassung der Versuchsserie

Aus den Versuchsergebnissen der Großbrandversuche im Brandofen konnten sich die Erkenntnisse der vorangegangenen klein- und mittelskaligen Brandversuche weitestgehend bestätigt werden. In Bezug auf die Menge der ungeschützten Holzflächen zeigten auch die Großbrandversuche, dass bei einer ungeschützten Holzfläche die Brandraumtemperaturen in der Abkühlphase deutlich schneller absanken im Vergleich zu den Versuchen mit mehreren ungeschützten Holzflächen. Bezogen auf die Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidungen wiesen die Bekleidungskombinationen in den großmaßstäblichen Brandversuchen unter Beachtung der Plattenstöße, der Verbindungsmittel und der Verspachtelung annähernd die gleichen Ergebnisse auf, wie in den kleinmaßstäblichen Untersuchungen. Zur Verhinderung einer Entzündung und dem selbstständigen Weiterbrennen der anfänglich geschützten Holzfläche war nach diesen Versuchsergebnissen mindestens die Kombination von 2 x 18 mm Gipsplatten erforderlich. Der Vergleich der Temperaturen in der Grenzschicht zwischen den klein- und großmaß-



stäblichen Versuchen ließ hier auf eine Skalierbarkeit der Erkenntnisse schließen. Bei Bekleidungsstärken oberhalb von 2 x 18 mm war eine Vergrößerung der Leistungsfähigkeit respektive der Schutzwirkung gegenüber dem Entzünden der anfänglich geschützten Holzflächen festzustellen. In Abhängigkeit der Brandeinwirkung ließ sich somit eine unterschiedliche Kombination von Bekleidungsstärken zum Schutz vor einer Entzündung ansetzen. Ein klares Beispiel dafür zeigten die Versuchsergebnisse unter einer deutlich abweichenden Brandbeanspruchung.

Mittels Äquivalenzvergleich war über die betrachtete Versuchsdauer eine Gleichwertigkeit des Feuerwiderstandsverhaltens der Holzbauteile zwischen den Brandbeanspruchungen ETK (90 Minuten) und Naturbrand_1 erkennbar. Dieses zeigte sich vor allem in der Schutzwirkung der Brandschutzbekleidung. Infolge der unterschiedlichen Maximaltemperaturen in der Grenzschicht, welches auch an der veränderten Durchwärmung infolge der vollumfänglichen Bauteilaufbauten sowie der Brandkurven lag, zeichnete sich für den Großbrandversuch unter ETK-Bearbeitung eine stärkere Verkohlungs/Verfärbung der anfänglich geschützten Holzfläche ab.

Die durchgeführten Löschmaßnahmen stellten bei Anwendung der Löschlanze für das Ablöschen des Flammenbrandes eine sehr effektive und löschmittelsparende Methode dar. Bei der Anwendung waren die Einsatzkräfte keiner thermischen Einwirkung ausgesetzt. Ein abschließend notwendiger Innenangriff zur Detektion und Bekämpfung von möglichen Glimmnestern sowie gängige Nachlöscharbeiten folgten unter Verwendung des Hohlstrahlrohrs.

Der Einfluss einer thermischen Delamination von Brettsperrholzbauteilen auf den Brandverlauf konnte in sehr deutlicher Form festgestellt werden. Der thermisch bedingte Abbau der Adhäsion zwischen dem Kleber und den einzelnen Lamellen des Bauteils in Kombination mit der Schwerkraft führt zu einem Abfallen von Lamellen. Hierbei wird zum einen eine nicht verkohlte Holzfläche freigelegt, die sich am Brandgeschehen beteiligt, und es sammelt sich Brandlast aus abgefallenen Lamellen auf dem Brandraumboden an. Entsprechend konnte in diesem Versuch kein Selbstverlöschen beobachtet werden. Zudem gestalteten sich die Löschmaßnahmen infolge der Brandlastverteilung, der hohen Brandraumtemperaturen und der erschwerten Zugänglichkeit als aufwändig.

3.1.2.9 Grundlagenuntersuchungen numerischer Beurteilungen

Aufgrund der am iBMB gemachten Erfahrung mit Verfahren zur experimentellen Bestimmung von thermischen Materialkennwerten heterogener Baustoffe [134] ist im Rahmen der Projektbeteiligten abgestimmt worden keine Ermittlung thermischer Materialkennwerte über experimentelle Verfahren vorzunehmen. Hier soll die umfangreiche Literaturstudie sowie die Rechercheergebnisse vorheriger Forschungsarbeiten der Beteiligten als ausreichend für die Grundlagenbestimmung angesehen werden.

Eine umfangreiche Literaturstudie zu thermischen Materialkennwerten (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Massenverlust) von Nadelholz weist eine überschaubare Anzahl an Ergebnissen vor (siehe Abbildung 159, Abbildung 160 und Abbildung 161). Oftmals sind die in der Literatur vorgestellten Materialkennwerte modifiziert, um den Effekt physikalischer Vorgänge nachzubilden, wie z. B. die Dehydratation, Pyrolyse und/oder Rissbildung. Entsprechend wird hier auch von effektiven thermischen Materialkennwerten gesprochen. Die Modifikationen lassen sich primär im Temperaturbereich von 20 – 120 °C bei der spezifischen Wärmekapazität und Massenverlust sowie ab 800 °C für die Wärmeleitfähigkeit erkennen.

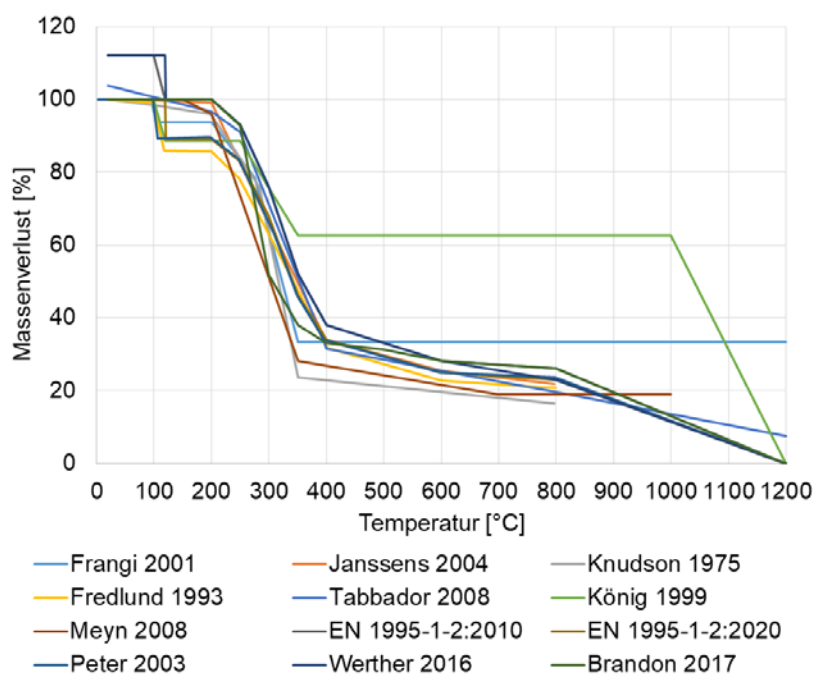


Abbildung 159: Exemplarischer Vergleich des Massenverlustes für Holz unterschiedlicher Literatur

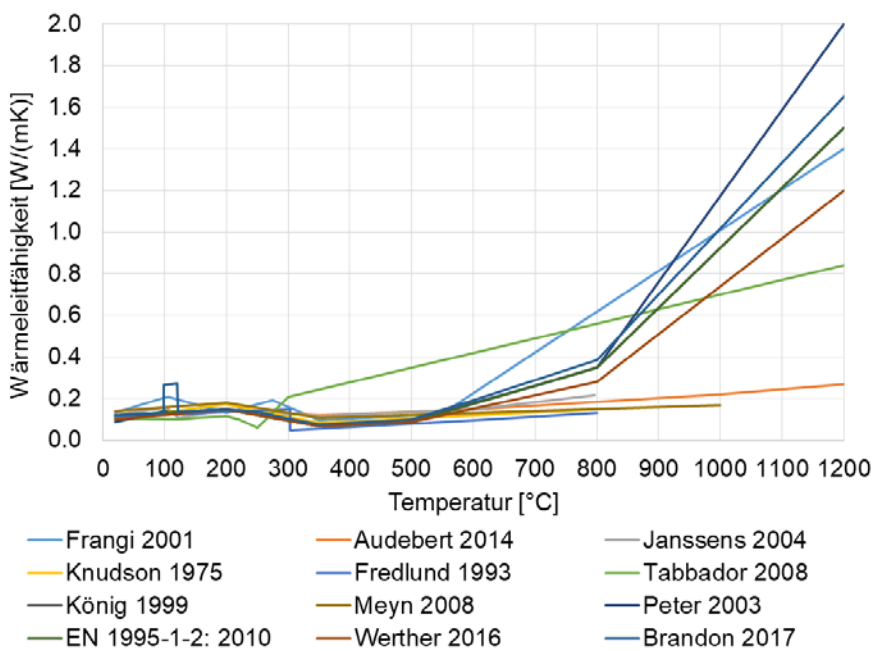


Abbildung 160: Exemplarischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeit für Holz unterschiedlicher Literatur

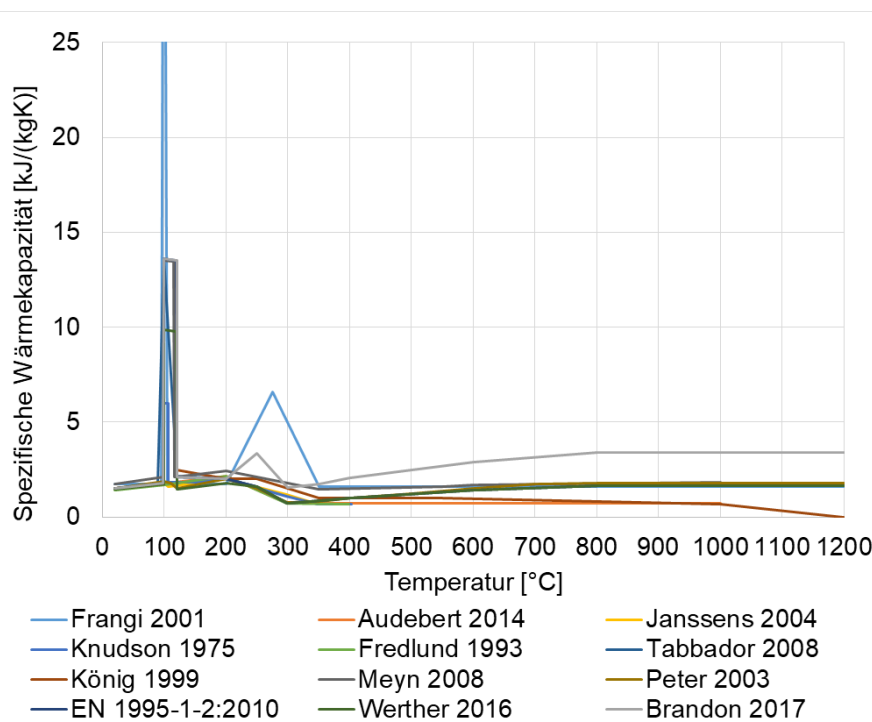


Abbildung 161: Exemplarischer Vergleich der spez. Wärmekapazität für Holz unterschiedlicher Literatur

Neben den thermischen Materialkennwerten von Holz wurden auch die thermischen Eigenschaften von gipsbasierten Bekleidungsmaterialien recherchiert, welche in den Abbildung 162 bis Abbildung 164 dargestellt sind. Für gipsbasierte Bekleidungsmaterialien liegt eine Vielzahl an nationalen und internationalen Veröffentlichungen vor, die sich mit der Bestimmung und Verwendung temperaturabhängiger Materialkennwerte befassen. Die nachfolgend dargestellten Kennwerte sind für die in Europa gängigen Gipsplatten Typ DF oder Gipsfaserplatten erarbeitet. Bei gipsgebundenen Brandschutzplatten ist das thermische Materialverhalten maßgeblich durch chemische Umwandlungsprozesse vom Hauptbestandteil Gips geprägt. Die Phasenumwandlungen haben einen deutlichen Einfluss auf den Verlauf der thermischen Materialkennwerte. Es gilt zu beachten, dass die dargestellten Materialkennwerte in Bereichen

modifiziert sind (effektive thermische Materialkennwerte), um den Effekt physikalischer Vorgänge abzubilden, wie z. B. die Dehydratation, Materialumwandlung und / oder Rissbildung.

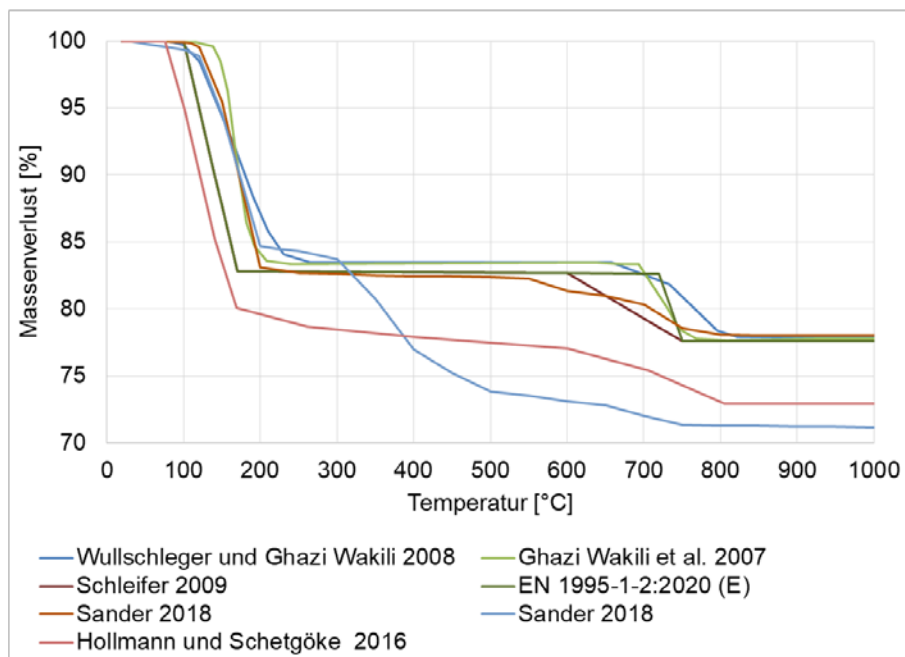


Abbildung 162: Exemplarischer Vergleich des Massenverlustes für Gipsplatten unterschiedlicher Literatur

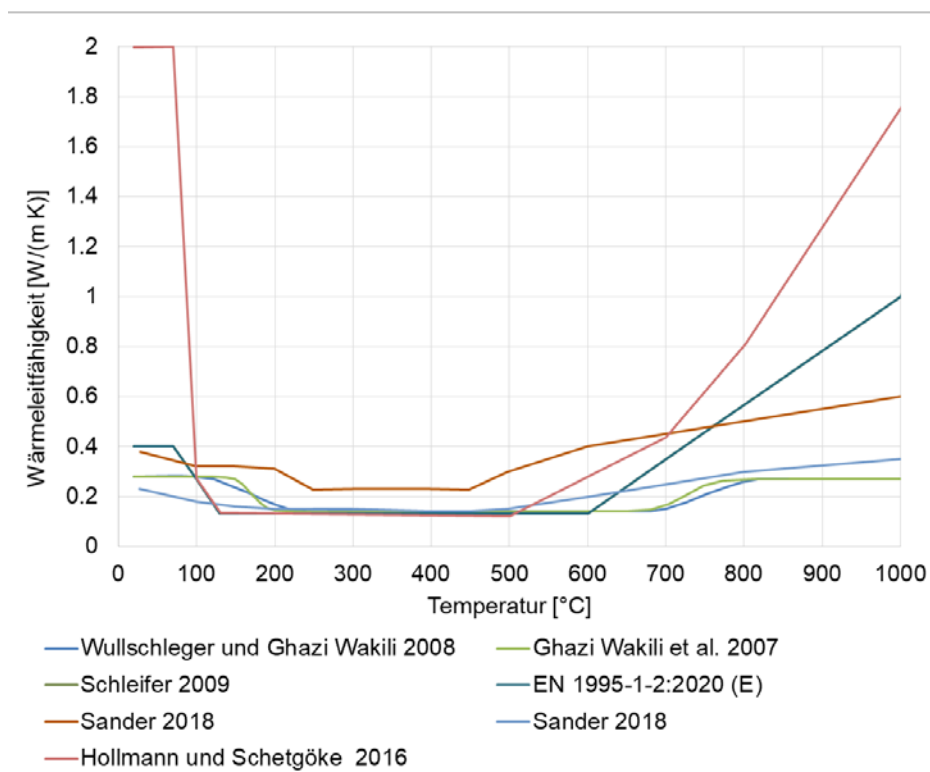


Abbildung 163: Exemplarischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeit für Gipsplatten unterschiedlicher Literatur

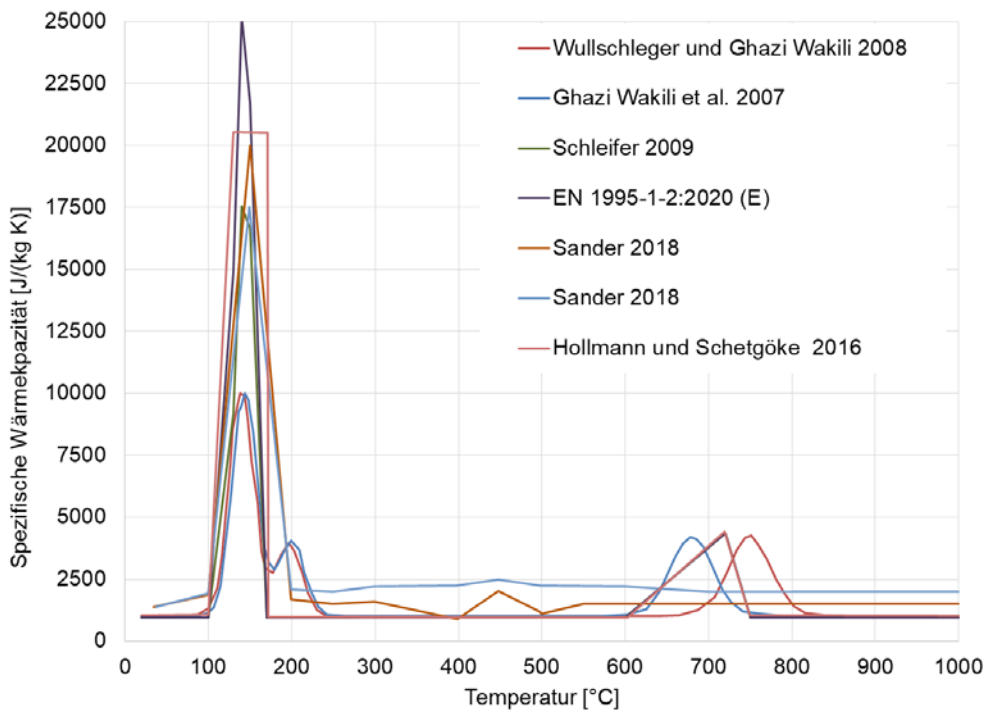


Abbildung 164: Exemplarischer Vergleich der spez. Wärmekapazität für Gipsplatten unterschiedlicher Literatur

Aus der vertieften Recherche zu thermischen Materialkennwerten für Nadelholz, gipsbasierte Brandschutzbekleidung (Gipsplatten) und mineralischer Dämmstoffe konnte eine überschaubare Anzahl an Kennwerten zusammengestellt werden. Ein Großteil der Kennwerte weisen Modifikationen (effektive thermische Materialkennwerte) auf, um den Effekt von physikalischen oder chemischen Vorgängen abzubilden, dieses sind beispielsweise die Verdampfungsenthalpie, Rissbildung oder Materialzersetzung.

3.1.2.10 Weiterführende Beurteilungen zum Feuerwiderstand auf Basis numerischer Betrachtungen

Die weiterführenden numerischen Arbeiten bestehen aus einer Analyse der in Kapitel III 3.1.2.9 aufgeführten thermischen Materialkennwerte hinsichtlich der Güte bei der Nachrechnung von Versuchen unter Einheits-Temperaturzeitkurve sowie Naturbrandbeanspruchung in einer eindimensionalen thermischen Analyse. Hierzu wurden ausgewählte Versuchsdaten der Untersuchungen aus Kapitel III 3.1.2.2, Kapitel III 3.1.2.3 und Kapitel III 3.1.2.8 als Vergleichsgrundlage herangezogen. Beginnend erfolgte eine, auf den ersten Simulationsergebnissen basierende, Vorauswahl zur Reduktion der recherchierten Kennwerte. Mit den verbleibenden Kennwerten folgte eine vertiefende Analyse unter Verwendung einer größeren Vergleichsdatenmenge.

Für die numerische Analyse wurde ein eindimensionales Modell der Versuchskörper erarbeitet. Für die modellierten Materialien (Holz, Brandschutzbekleidung und Dämmstoff) wurden die recherchierten Materialmodelle bzw. thermischen Materialeigenschaften implementiert. Auf der brandzugewandten Seite erfolgte die Aufbringung der thermischen Einwirkung als Temperaturzeitverlauf über die konvektiven und radiativen Anteile. Hierfür wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von 25 kW/m² bei ETK-Beanspruchung und 35 kW/m² bei Naturbrandbeanspruchung verwendet. Die Emissivität wurde auf der brandzugewandten und brandabgewandten jeweils mit 0,8 angesetzt. Auf der brandabgewandten Seite wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von 4 kW/m² angenommen. Die Wärmeübergangsbedingungen entsprachen somit den Angaben aus [1].

Abbildung 165 zeigt einen Vergleich der Simulation für die ausgewählten Materialkennwerten für Holz und von Versuchsergebnissen (NH_VH_Fi_ETK, NH_BSH_Fi_ETK) ungeschützter Massivholzelemente aus Kapitel III 3.1.2.2. Unter Beachtung der Anzahl der Versuchsdaten und der ersichtlichen Streuung dieser lässt sich eine hinreichende Abbildung aus den numerischen Simulationen bei ETK Beanspruchung erkennen.

Analog zur Abbildung der thermischen Materialkennwerte für Holz erfolgte das Vorgehen unter Berücksichtigung der thermischen Kennwerte der Gipsplatten in Simulationen im Vergleich zu Versuchsergebnissen (Temperaturen zwischen Brandschutzbekleidung und Trägerkonstruktion). Als thermische Materialkennwerte für die Trägerkonstruktion aus Holz wurden die Werte nach DIN EN 1995-1-2 angesetzt. Die Abbildung 166 stellt den Vergleich zwischen Versuchsergebnissen der Versuche aus Kapitel III 3.1.2.3 (gepunktete Linien) sowie V01 aus Kapitel III 3.1.2.8 (gestrichelte Linien) mit den Ergebnissen der eindimensionalen thermischen Analyse bei ETK-Beanspruchung dar. Es ist sichtbar, dass die Kennwerte gemäß [132], [131] und [134] deutlich größere Abweichungen zu den Versuchsergebnissen aufweisen. Die Simulationsergebnisse unter Anwendung die Kennwerte nach [133] weisen eine hinreichende Übereinstimmung auf.

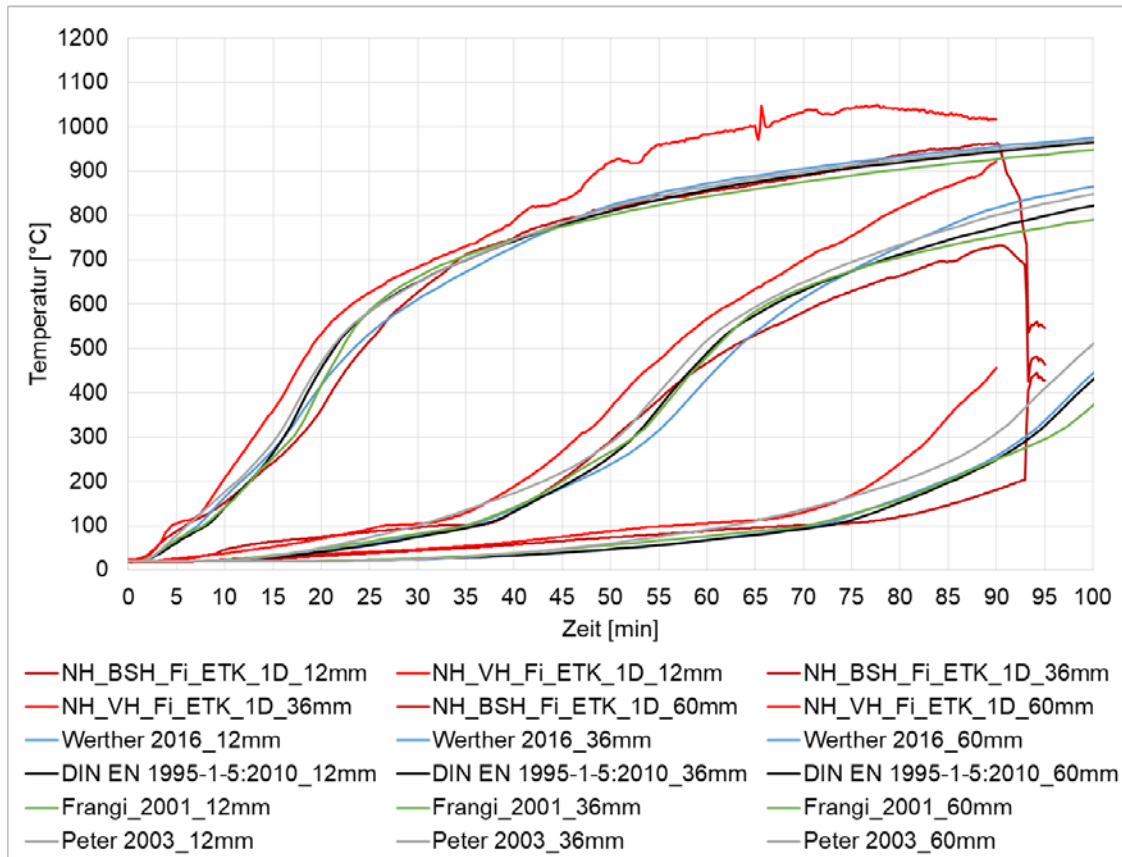


Abbildung 165: Darstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufes der ausgewählten Kennwerte vergleichend zu Versuchsergebnissen von ungeschütztem Holz unter ETK-Beanspruchung

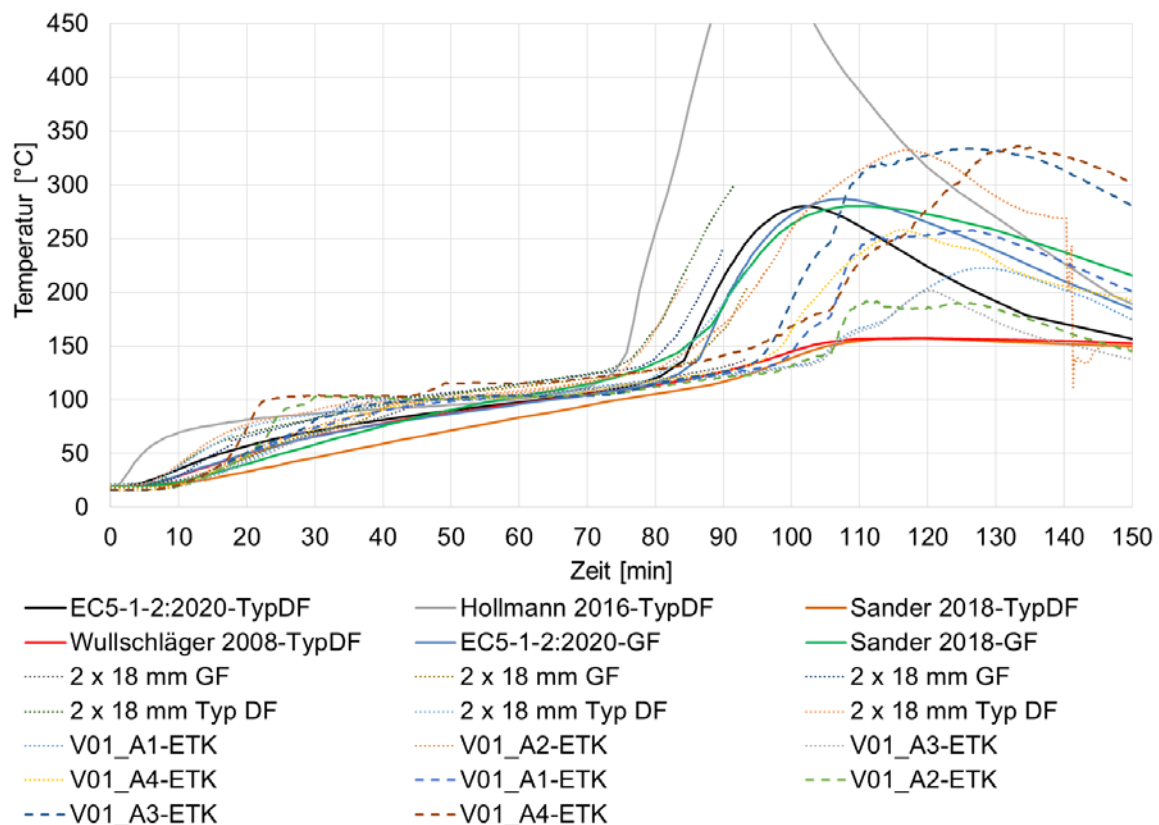


Abbildung 166: Darstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufes der ausgewählten Kennwerte vergleichend zu Versuchsergebnissen von 2 x 18 mm Gipsplatten unter ETK-Beanspruchung

Zur numerischen Abbildung der Versuchsergebnisse unter Naturbrandbeanspruchung sind ebenfalls die vorausgewählten Materialeigenschaften für eine Analyse verwendet worden. Abgeschlossene Untersuchungen zu thermischen Materialeigenschaften von Brandschutzbekleidungen unter Naturbrandbeanspruchung [134] weisen bereits auf die Problemstellung bei der numerischen Betrachtung hin. Die Problemstellung betrifft das nicht reversible Materialverhalten unter Brandbeanspruchung. Die Wärmeleitfähigkeit von Gips bei 200 °C in der Aufheizphase ist anders als bei 200 °C in der Abkühlphase infolge der thermisch bedingten Umwandlungsprozesse. Diese Problemstellung besteht auch bei dem thermisch beanspruchten Holz und der dabei stattfindenden Pyrolyse. Wie Abbildung 167 zeigt, ist die numerische Abbildung der Temperaturentwicklung in einem ungeschützten Holzbauteil mit reversiblen thermischen Materialeigenschaften nur bereichsweise übereinstimmend. Während der Aufheizphase und Abkühlphase sind deutliche Abweichungen der numerischen Simulationsergebnisse erkennbar, welche sich durch die im Simulationsmodell unterstellte Reversibilität der Materialeigenschaften ergeben. Als zusätzlichen Einflussparameter kann der konstant angenommene Wärmeübergangskoeffizient auf der brandzugewandeten Seite benannt werden, da sich unter Naturbrandbeanspruchung eine temperaturabhängige Veränderung des Wärmeüberganges einstellt.

Als Ansätze für eine Berücksichtigung der nicht reversiblen Materialeigenschaften sind a) zwei getrennte Simulationsdurchläufe / -modelle für die Aufheiz- und Abkühlphase mit jeweils separaten thermischen Materialeigenschaften und b) Implementierung einer zusätzlichen Feldvariablen zur Unterscheidung der Aufheiz- und Abkühlphase und entsprechender Zuordnung der thermischen Materialeigenschaften vorgesehen. Hierbei wird die Temperaturänderung an einem Elementknoten zwischen zwei Berechnungsincrementen zur Definition der Feldvariablen angesetzt. Wird im Berechnungsvorgang die Abkühlphase festgestellt, nimmt die Feldvariable die Größenordnung der Temperatur ein, die zuletzt vor dem Eintreten der Abkühlphase an einem Elementknoten vorlag. Mit dieser Temperatur werden anschließend die thermischen Materialeigenschaften ermittelt und für den restlichen Verlauf der Abkühlphase konstant belassen.

Für die weitere Betrachtung wird der Ansatz b) die Implementierung einer zusätzlichen Feldvariable gewählt. Die Begründung liegt in der Allgemeingültigkeit bzw. Robustheit des Simulationsmodells hinsichtlich einer variablen Einwirkung. In Ansatz a) muss im Vorfeld bereits der Zeitpunkt des Überganges in die Abkühlphase bekannt sein. Entsprechend ist dieser Ansatz nicht für eine Prognose, sondern nur für die Nachrechnung von Versuchsergebnissen anwendbar.

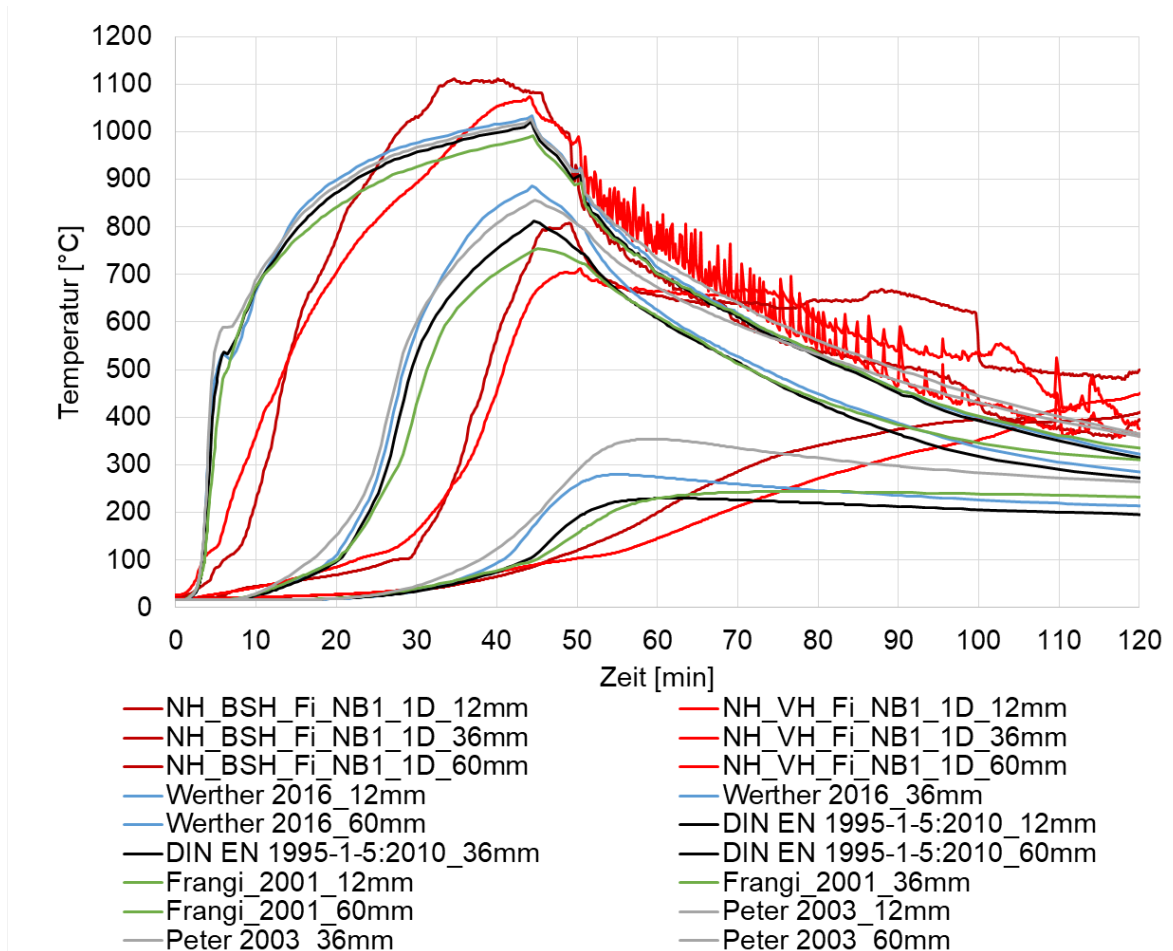


Abbildung 167: Darstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufes der ausgewählten Kennwerte im Vergleich zu Versuchsergebnissen bei ungeschützten Holzprobekörpern unter Naturbrand_1-Beanspruchung

Bedingt durch den Mehraufwand für den Abschluss einzelner vorangegangener Arbeitspakete konnte die tiefere thermische Analyse von Bauteilen unter Naturbrand mit Berücksichtigung von Ansatz b) nicht erfolgreich bearbeitet werden. Zusätzlich zur zeitlichen Begrenzung ist hier auch die Erarbeitung der vertieften Kenntnisse zur Programmierung / Implementierung zu nennen.

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass für die Modellierung der Bauteiltemperaturen von Holz in der Abkühlphase die in der Literatur verfügbaren thermischen Kennwerte nur bedingt geeignet sind. In anschließenden Forschungsvorhaben sind geeignete Materialkennwerte zu bestimmen. Aus dem Vorhaben TIMpuls liegen eine Vielzahl an Versuchsergebnissen vor, anhand derer die zu bestimmenden Materialkennwerte kalibriert und validiert werden können.

3.1.2.11 Betrachtung der Schutzwirkung von Gipsfaser- und Gipskartonplatten im Naturbrandszenario

Das Versagen der Gipsfaser- und Gipskartonplatten ist auf den thermischen Abbau des Gipses zurückzuführen. Eine Zersetzung des Calciumsulfat-Dihydrat in Calciumsulfat-Halbhydrat beginnt schon bei 40°C. Jedoch ist dieser Prozess bei diesen geringen Temperaturen noch sehr langsam. Erst ab etwa 180°C läuft dieser Prozess in einer zu berücksichtigenden Geschwindigkeit. Ab 200°C beginnt die Zersetzung von Calciumsulfat-Halbhydrat in Anhydrit II. In technischen Prozessen sind für diesen Vorgang häufig Temperaturen von mehr als 300°C erforderlich [122]. Durch den hohen Anteil an gebundenem Wasser in der kristallinen Struktur des Gipses wird dieser Prozess deutlich verlangsamt, weil das freiwerdende Wasser beim Verdunsten einen Teil der thermischen Energie absorbiert. In vielen Brandversuchen kann jedoch festgestellt werden, dass besonders für Gipsfaser- und Gipskartonfeuerschutzplatten der Beginn des Abbrands der Tragkonstruktion vor dem Versagen der Gipsplatten geschieht.

Nachdem das meiste des im Gips gebundenen Wassers durch die Brandbeanspruchung gelöst und verdunstet ist, kommt es zum Durchwärmern der Gipsplatte. Der nun verstärkt stattfindende Wärmetransport durch die Gipsplatte führt zur Erwärmung der brennbaren Tragkonstruktion. Mit dem Erreichen der kritischen Temperatur zum Selbstentzünden kommt es zum Abbrand der Tragkonstruktion. Die Gipsplatte hat zu diesem Zeitpunkt nur noch eine geringe Schutzwirkung, die zu einer Minderung der Abbrandrate der Tragkonstruktion führt.

Aus den vorliegenden Prüfberichten von Naturbrandversuchen ist eine Bewertung des Versagens der Gipsfaser- und Gipskartonplatte nicht möglich, da eine entsprechende Dokumentation häufig fehlt oder nur sehr grob vorliegt. Aus diesem Grund wurde sich bei den weiteren Untersuchungen auf den Beginn des Abbrandes der Tragkonstruktion fokussiert. Als Beginn des Abbrandes der Tragkonstruktion wurde das Erreichen von 300°C direkt hinter der Brandschutzbekleidung aus Gipsfaser- oder Gipskartonplatten herangezogen.

Auswertung der Prüfbericht der Brandversuche

Für die Untersuchung der Schutzwirkung von Gipsplatten im Naturbrandszenario konnten die folgenden Prüfberichte und Quellen ermittelt werden.

- Prüfbericht „Compartment Fire Testing of a Two-Story Mass Timber Building“ [123]
- Prüfbericht „Fire Safety Summary – Fire Research Conducted for the Project on Mid-Rise Wood Construction“ [124]
- Prüfbericht „Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey Xlam Timber Building“ [125]
- Prüfbericht „Brandversuche an Modulhotels in Holzbauweise“ [126]
- Prüfbericht „Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests“ [127]
- Messdaten aus Kleinbrandversuchen vom Forschungspartner „TU Braunschweig“
- Messdaten aus Großbrandversuchen vom Forschungspartner „TU Braunschweig“

Für die Auswertung der Messdaten bezüglich der Schutzwirkung von Gipsplatten wird im ersten Schritt die kritische Messstelle hinter den Gipsplatten in den jeweiligen Versuchen ermittelt. Daraufhin wird der Zeitpunkt des Erreichens von 300°C im Temperaturzeitverlauf dieser Messstelle ausgewertet. (vgl. Abbildung 168)

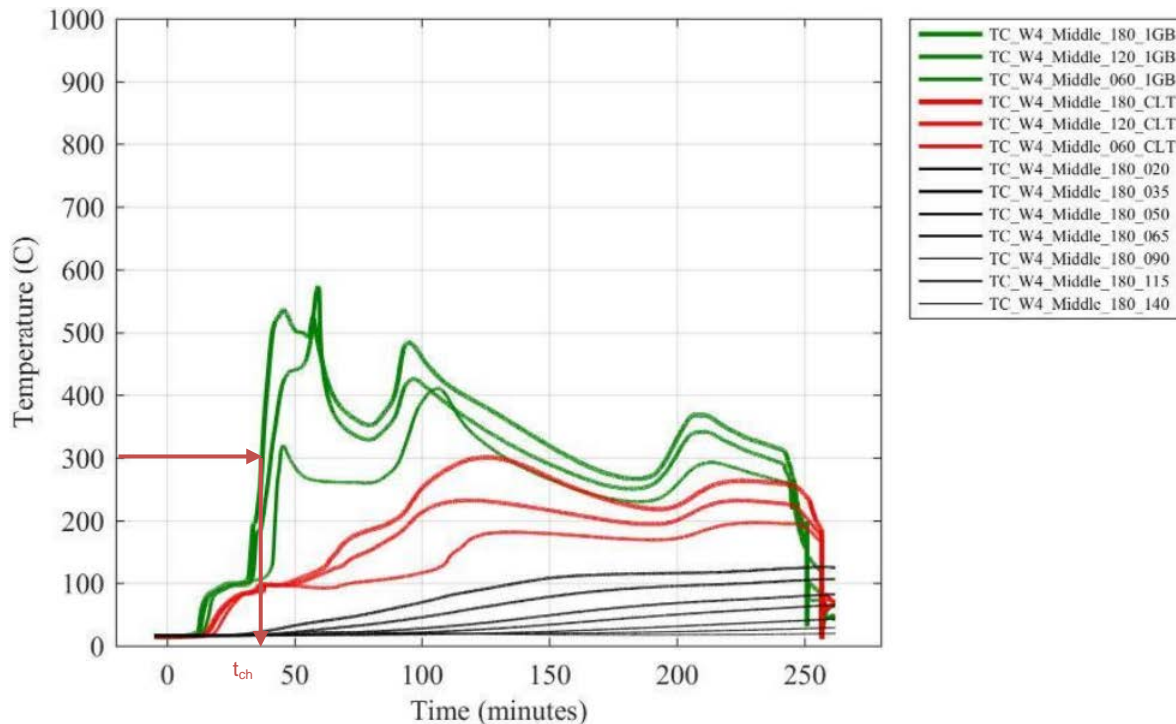


Abbildung 168: Beispiel für die Temperaturzeitverläufe der Wandaufbauten aus den Naturbrandversuchen nach Su [127]

Mit der Bestimmung des Zeitpunktes des Erreichens von 300°C hinter der betrachteten Lage der Gipsplatten kann die bis dahin einwirkende Temperatur bzw. thermische Energie aufsummiert werden. Im Rahmen der Betrachtung werden zwei mögliche Vergleichsparameter untersucht. Der erste Vergleichsparameter, der genauer untersucht wird, ist die Summe der Raumgastemperaturen bis zum Erreichen des kritischen Temperaturniveaus. Der zweite Vergleichsparameter, der in Betracht kommt, ist die Ermittlung der Summe eines Energieäquivalents, welcher annähernd die abgegebene Wärmeenergie durch Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile im Brandraum berücksichtigt.

Nach Schneider [128] lässt sich der Wärmestrom über die Umfassungsbauteile im Brandraum nachfolgender Gleichung ermitteln.

$$\dot{h}_w = A_j * (\alpha_j (T_g - T_{wj}) + \varepsilon_{res} * \sigma (T_g^4 - T_{wj}^4))$$

Hierbei sind:

\dot{h}_w Der Energiefluss durch Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile W

A_j Die Fläche der Umfassungsbauteile m²

α_j Wärmeübergangszahl für die Konvektion W/m²K

T_g Raumgastemperatur K

T_{wj} Oberflächentemperatur des Umfassungsbauteils K

ε_{res} resultierende Emission -

σ Strahlungskonstante des schwarzen Körpers W/m²K⁴

Da die Oberflächentemperatur der Gipsplatten während des Brandverlaufes in der Berechnung nicht bekannt ist, kann der wirkliche Energiefluss im Brandraum nicht berücksichtigt werden. Es werden für beide Wärmeströme (Konvektion und Strahlung) jeweils ein Äquivalent in der Betrachtung herangezogen.

Das Äquivalent für die Konvektion wird über den Flächeninhalt unter der Raumbrandkurve dargestellt. Diese Methode ist besonders im Hinblick auf die zukünftige Anwendung im Rahmen von bestehenden Berechnungsmodellen mit einem verhältnismäßig geringen Aufwand möglich. Auch ist die Überprüfung der Berechnungen leichter durchführbar. In der Abbildung 169 ist zu erkennen, dass bei diesem Herangehen besonders bei den zweilagigen Anordnungen von Gipsplatten Unschärfen entstehen. Grundsätzlich zeigt sich jedoch eine gute Übereinstimmung mit der Vergleichsbetrachtung des Eurocodes 5. Hierfür wurde der Flächeninhalt unter der ETK abgeleitet und das Beginnen des Abbrandes der Tragkonstruktion nach dem Eurocode ermittelt.

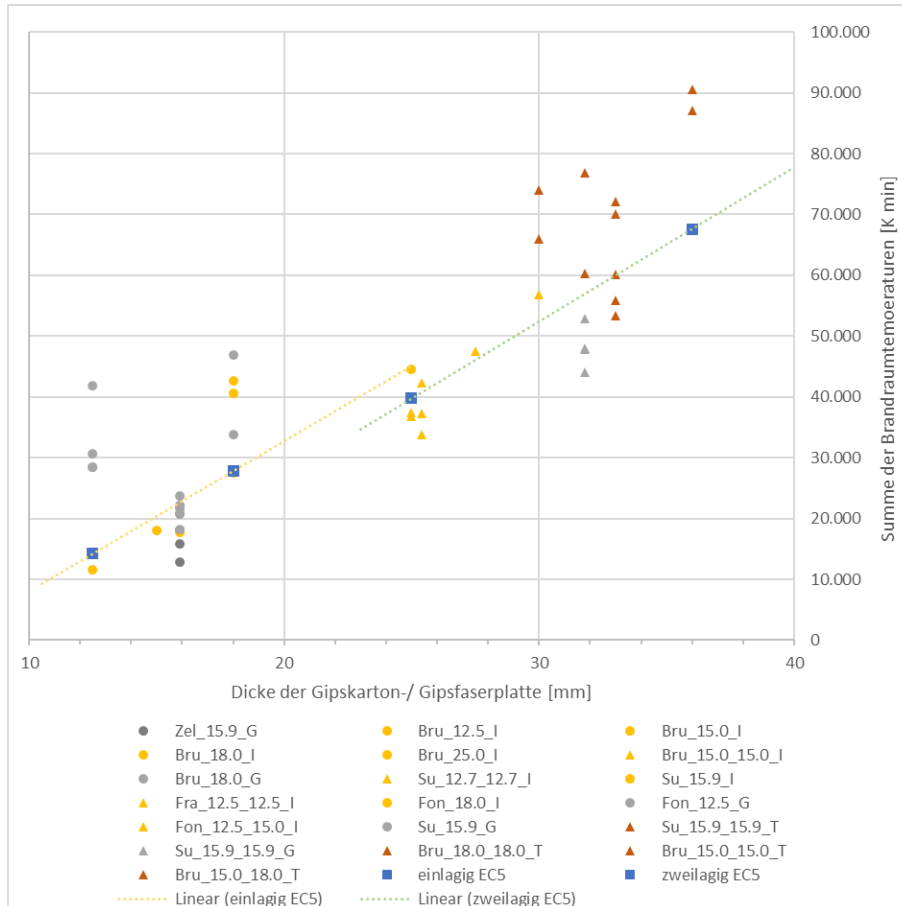


Abbildung 169: Summe der Brandraumtemperaturen bis zum Erreichen von 300°C auf der Bekleidungsrückseite

Bei dem Herangehen der Ermittlung des Wärmestroms aus der Strahlung muss der Temperaturzeitverlauf der Raumgastemperatur, der in der Regel in der Celsius-Skala angegeben wird, in die Kelvin-Skala umgerechnet werden. Bei der Ermittlung des Wärmestroms wird das Stefan-Boltzmann-Gesetz herangezogen, jedoch nur die vom Brandraum ausgehende Strahlung berücksichtigt. Der Anteil der Strahlung vom Bauteil zurück in den Brandraum wird vernachlässigt. Dies bedeutet, dass hierbei der Einfluss der Oberflächentemperatur des Bauteils vernachlässigt wird. Dieses Vorgehen ermöglicht eine spätere Übernahme in bestehende Berechnungsmodelle. Grundsätzlich überwiegt der Anteil aus Strahlung beim Wärmestrom im Brandfall zwischen Brandraum und Bauteiloberfläche vgl. Tabelle 25.

Tabelle 25 - Vergleich der Anteile am Energiefluss durch die Umfassungsbauteile im Brandfall

Raumgastemperatur	200°C	600°C	600°C	1000°C	1000°C	1000°C
Oberflächentemperatur	20°C	20°C	400°C	20°	400°C	800°C
Anteil der Konvektion am Wärmestrom	75%	43%	28%	22%	15%	10%
Anteil der Strahlung am Wärmestrom	25%	57%	72%	78%	85%	90%

In Abbildung 170 zeigt sich, dass der Ansatz über die Herleitung mittels dem Strahlungsanteil des Wärmestroms im Brandfall besser Ergebnisse als der Ansatz der Summe der Brandraumtemperatur liefert. Die meisten Werte aus den Versuchsdaten liegen über der Regressionsgeraden des Eurocodes 5 [42]. Besonders für den Aufbau von zweilagigen Gipsplatten konnte eine deutliche Verbesserung der Übereinstimmung erzielt werden. Für die weiterführenden Betrachtungen wird daher der Ansatz der Strahlungsenergie im Brandraum weiterverfolgt.

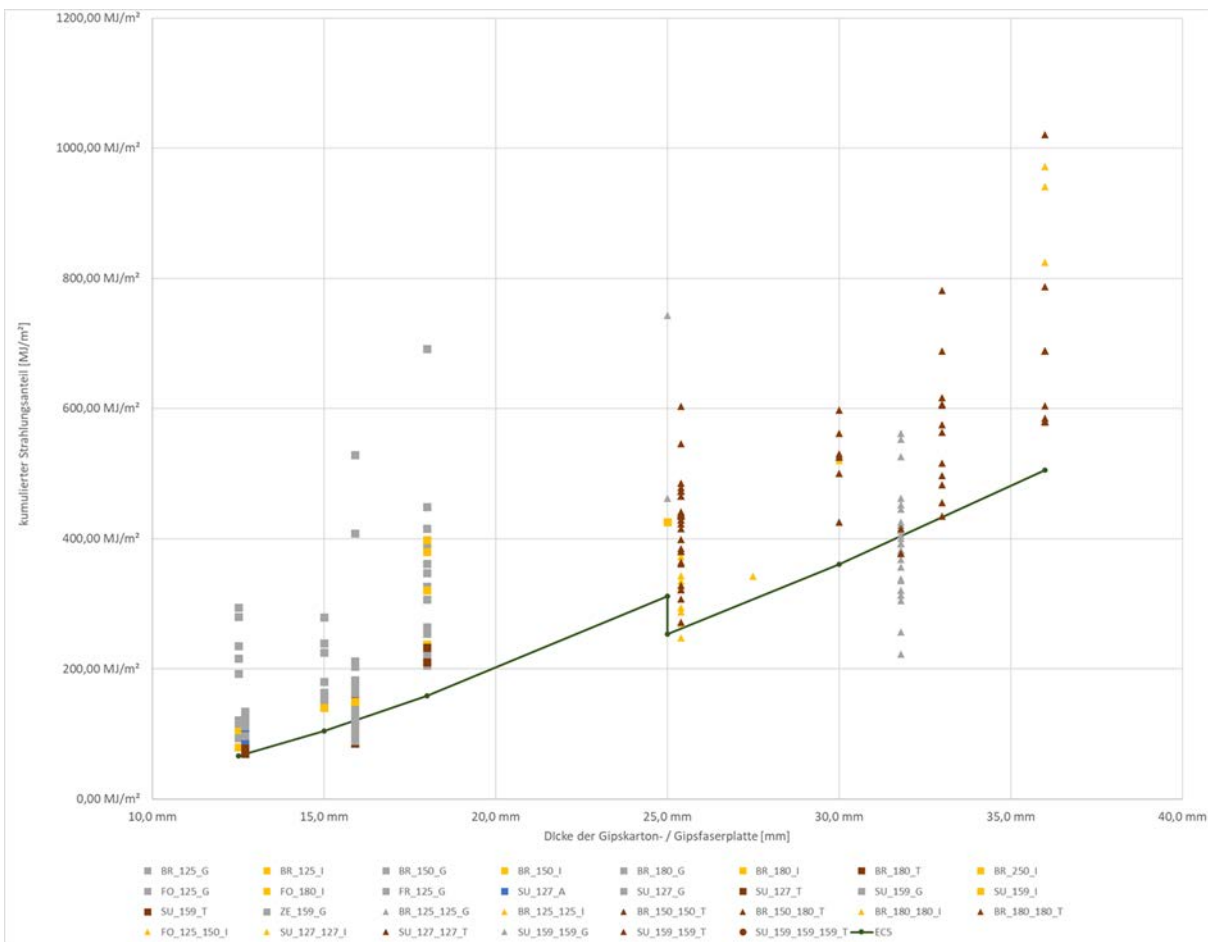


Abbildung 170: Summe des Energieäquivalents bis zum Erreichen von 300°C auf der Bekleidungsrückseite

3.1.2.12 Abschließende Realbrandversuche im Forschungsvorhaben TIMpuls

Ziele der großmaßstäblichen Realbrandversuche

Die Realbrandversuche dienen zum Beleg der innerhalb des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse und als Grundlage zum Nachweis der bauordnungsrechtlichen Schutzziele, wie der Tragfähigkeit, dem Raumabschluss, dem Selbstverlöschten bzw. der Löschbarkeit der Konstruktionen durch die Feuerwehr (Nachbrandverhalten) sowie der Begrenzung der Brandausbreitung. Untersucht werden Raumbrände in Holzkonstruktionen mit einer normativen mobilen Brandlast und bautypischen Ausführungen. Besonders die Variation zwischen ungeschützten, anfänglich geschützten und vollständig geschützten Holzoberflächen ist hierbei von hoher praxisrelevanter Bedeutung.

Konkrete Untersuchungsziele waren hierbei:

- Beleg der Ergebnisse der vorherigen, im Bauteilmaßstab durchgeführten Versuche im „realen Versuchsbauwerk“ unter Naturbrandbedingungen
- Einfluss brennbarer Bauteiloberfläche auf den Brandverlauf
- Verhalten der Brandschutzbekleidung und deren Schutzzeiten unter Naturbrandbeanspruchung
- Verhalten bzgl. Selbstverlöschten und Nachbrandverhalten von Holzkonstruktionen
- Löschbarkeit der praxisüblichen Konstruktionen im Holzbau
- Analyse der Brandweiterleitung über die Fassade in das Geschoss über dem Brandgeschoss durch brennbare Oberflächen im Raum
- Untersuchung der Auswirkungen von brandschutztechnischen Schutzmaßnahmen im Stoß- und Fügungsbereich von Bauteilen
- Bewertung der Standsicherheit unter Naturbrandbeanspruchung
- Bewertung des Raumabschlusses (Feuer und Rauch, Wärmedämmung) unter Naturbrandbeanspruchung
- Überprüfung und abschließende Beurteilung der Vorgaben des Entwurfes der M-Holz-BauRL

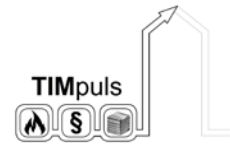
Zusammenfassend sollte unter realen Bedingungen untersucht werden, wie ein Vollbrand in mehrgeschossigen Holzgebäuden verläuft. Im Rahmen der Versuche werden daher umfangreiche Messdaten (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Gewichtsverlust der mobilen Brandlast und Bauteile usw.) aufgezeichnet, die ausgewertet ein klareres Bild davon geben, wie sich die Gesamtkonstruktion im Brandfall und während des Löschvorgangs verhält, repräsentiert in Abbildung 171. Letzteres nimmt auch bei diesen Versuchen einen großen Stellenwert ein. Hierdurch soll eine gesamtheitliche Betrachtung von Bränden in Holzgebäude ermöglicht werden, da von der Entstehung bis zur Brandbekämpfung durch die Feuerwehr alle Phasen eines realistischen Brandereignisses eingeschlossen sind.



Abbildung 171: Werkfeuerwehr TUM Garching bei der Brandbekämpfung

Beschreibung der Versuche

Der erste Versuch diente als Referenzversuch und soll durch die massive Brandschutzbekleidung aller Bauteile, die ein Mitbrennen der Holzkonstruktion verhindert, einen Vergleich mit nichtbrennbaren Konstruktionen, z.B. aus Mauerwerk bzw. Stahlbeton, ermöglichen. Bei den weiteren vier Versuchen sind unterschiedliche Kombinationen von Holzkonstruktionen, wie Brettsperrholz (BSP), Brettschichtholz



(BSH) und Holztafelbauweise (HTB) jeweils in Verbindung mit Gipskarton-Feuerschutz- (GKF) oder Gipsfaserplatten (GF) bzw. ungeschützt im Einsatz, vgl. Tabelle 26.

Das Innenmaß der Versuchsraumgrundfläche beträgt bei drei kleineren Versuchen $4,5 \times 4,5 \text{ m}^2$ und bei zwei großen Versuchen $4,5 \times 9 \text{ m}^2$. Dadurch entsteht ein geometrisches Verhältnis von eins zu zwei für die Grundfläche, den Wandabstand und das Volumen, wodurch der räumliche Einfluss auf den Brandverlauf beobachtet werden kann, vgl. Abbildung 172 bis Abbildung 179. Um bautypische Raumhöhen abzubilden beträgt das Innenmaß der Versuchsräume ca. 2,4 m, vgl. Tabelle 26.

Für eine detailliertere Darstellung der konstruktiven Ausführung der Versuche siehe auch Anhang 4.6.

Tabelle 26: Übersicht zu den Konstruktionsformen der Versuche

Versuch	V0	V1	V2	V3	V4
Raumgröße (B x L x H)	4,5 m x 4,5 m x 2,4 m			4,5 m x 9,0 m x 2,4 m	
Grundfläche	20,25 m ²			40,5 m ²	
Öffnungsgröße (B x H)	2,4 m x 2,2 m			4,2 m x 2,2 m	
Öffnungsfaktor	0,094 m ^{0.5}				
Brandlastdichte	1085 MJ/m ²				
Wand 1	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	150 mm BSP	140 mm HTB 2x12,5 mm GF	150 mm BSP
Wand 2	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF
Wand 3	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	150 mm BSP	140 mm HTB 2x18 mm GKF	140 mm HTB 2x18 mm GKF
Wand 4	100 mm BSP 2x25 mm GKF	100 mm BSP 18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF	140 mm HTB 2x18 mm GF
Decke	180 mm BSH 2x25 mm GKF	180 mm BSH	220 mm HTB 2x18mm GF	180 mm BSH	180 mm BSH
Lineare Bauteile	-	-	-	-	2x Stütze 1x Unterzug
Sichtbare Holzoberfläche	-	35 %*	37 %*	42 %*	58 %*

BSP – Brettspertholz; HTB – Holztafelbau mit Steinwolle gedämmt; BSH – Brettstichholz; GKF – Gipskartonfeuerschutzplatte; GF – Gipsfaserplatte; Stütze – 300x300 mm² BSH; Unterzug – 300x320 mm² BSH

* Prozent der gesamten Bauteiloberflächen ohne Fußboden und Fensteröffnung

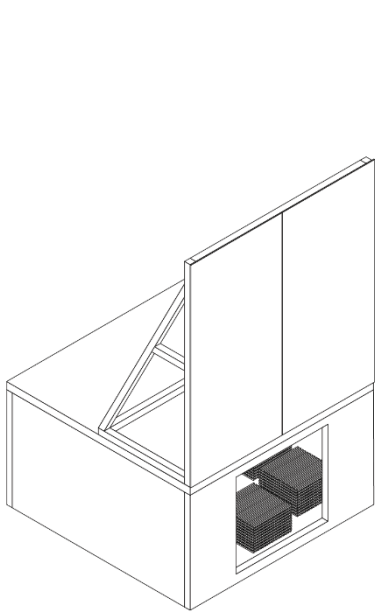


Abbildung 172: Perspektiven V0, V1, V2

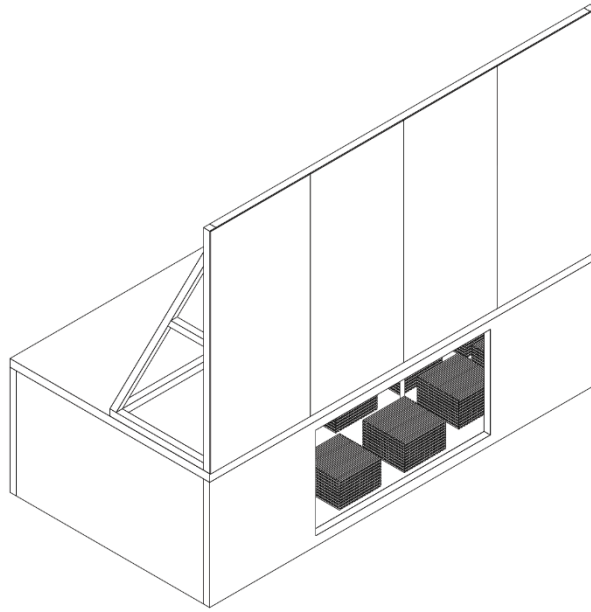


Abbildung 173: Perspektiven V3, V4

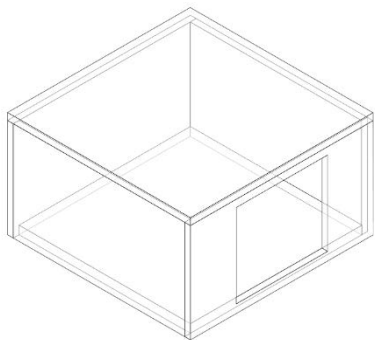


Abbildung 174: Raummodell V0, V1, V2

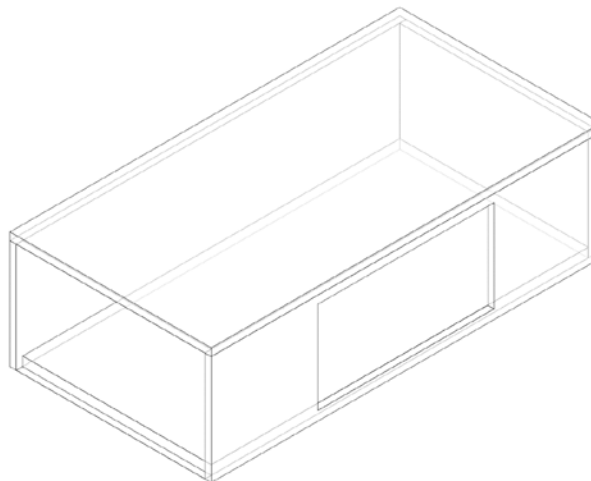


Abbildung 175: Raummodell V3

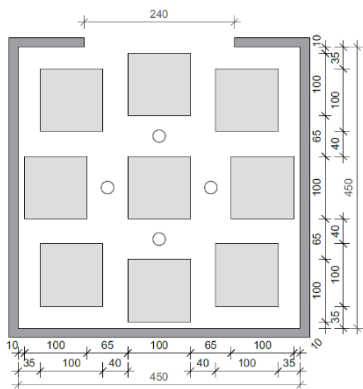


Abbildung 176: Grundriss mit Anordnung der neun Holzkrippen und der vier Messbäume für V0, V1, V2

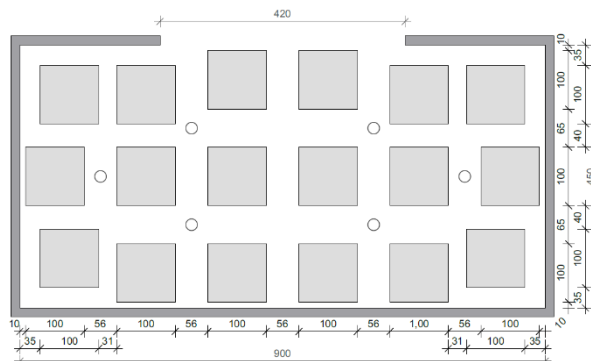


Abbildung 177: Grundriss mit Anordnung der 18 Holzkrippen und der sechs Messbäume für V3

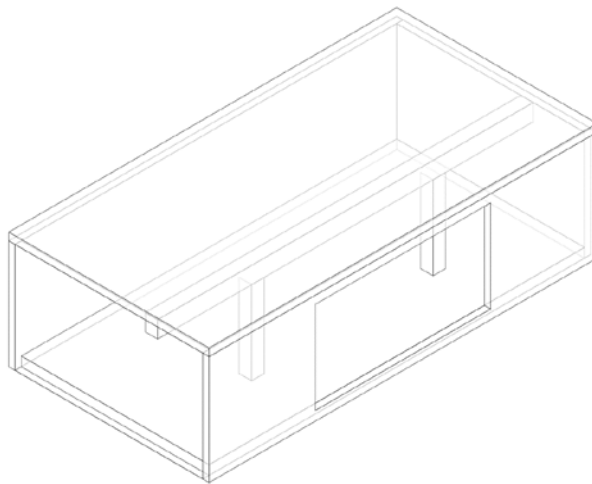


Abbildung 178: Raummodell V4

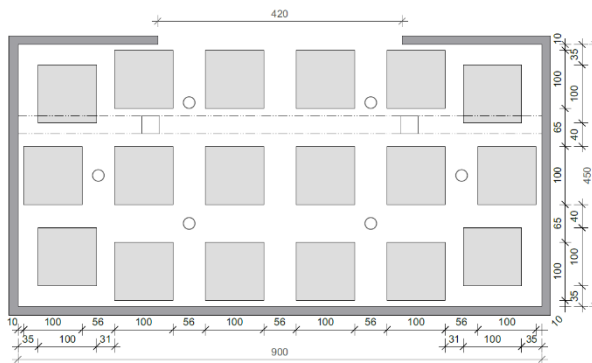


Abbildung 179: Grundriss mit Anordnung der 18 Holzkripen und der sechs Messbäume für V4

Alle Raumkonstellationen bzw. Versuchsdurchgänge verfügen über eine Fensteröffnung. Der Öffnungsfaktor wird in Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen und auf Basis der im Rahmen des Vorhabens verwendeten Naturbrandkurve nach DIN EN 1991-1-2 NA Anhang AA [21] zu $O = 0,094 \text{ m}^{1/2}$ gewählt. Dies entspricht einer Öffnung von $2,4 \times 2,2 \text{ m}^2$ (b×h) im kleinen Raum ($4,5 \times 4,5 \text{ m}^2$) und $4,2 \times 2,2 \text{ m}^2$ (b×h) im großen Raum ($4,5 \times 9 \text{ m}^2$). Das „Fenster“ ist von Beginn an geöffnet. Dies dient der Vergleichbarkeit zwischen den Realbrandversuchen und den im Vorfeld durchgeführten Grundlagenversuchen.

Bauteilkatalog

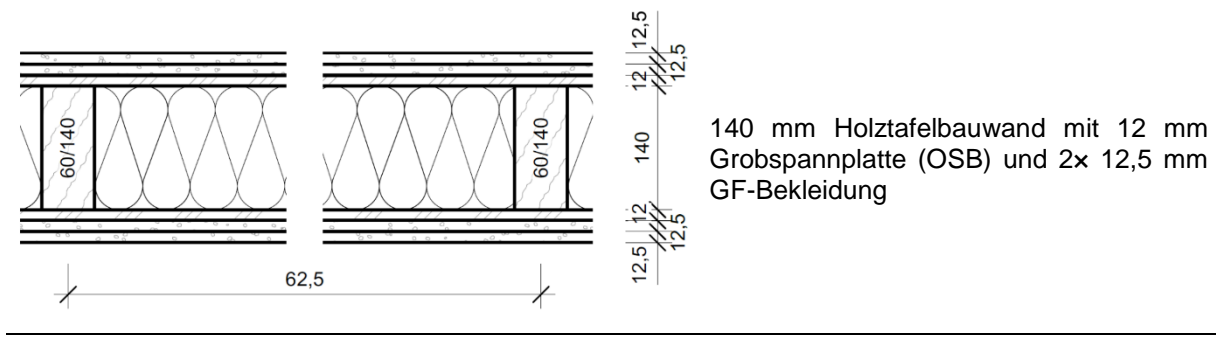
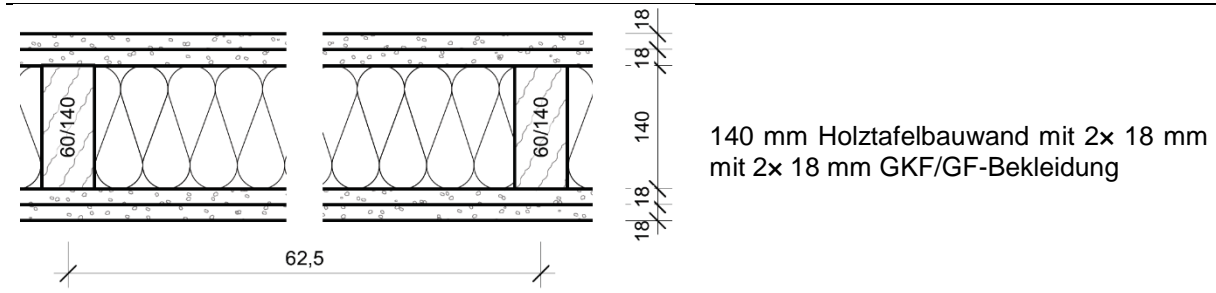
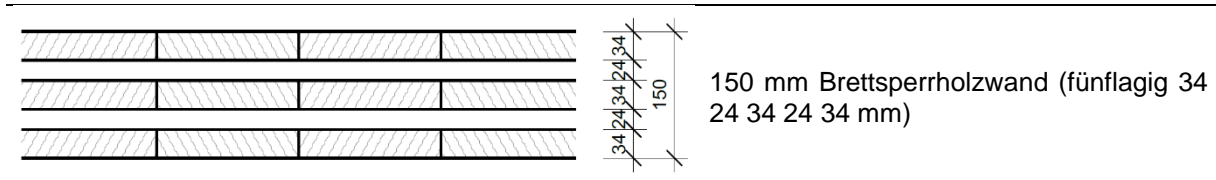
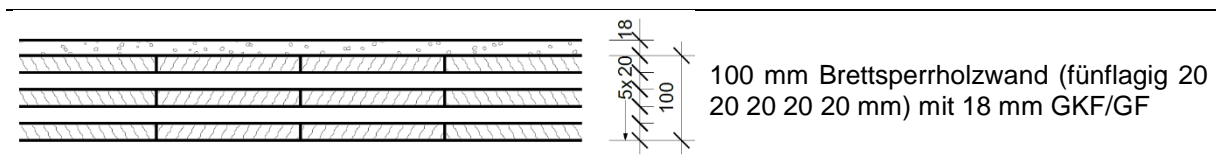
Die Auswahl der Wand- und Deckenkonstruktionen soll die baupraktischen Ausführungen im Holzbau widerspiegeln und gleichzeitig die bauordnungsrechtlich gewünschten Veränderungen betrachten. Hierfür wurden Abstimmungen mit Praxispartnern geführt und mit den Erkenntnissen aus diesem und anderen Forschungsvorhaben, wie z. B. dataholz, zusammengeführt.

Eine Übersicht der eingesetzten Wand- und Deckenaufbauten der Versuche sind in Tabelle 27 abgebildet und beschrieben.

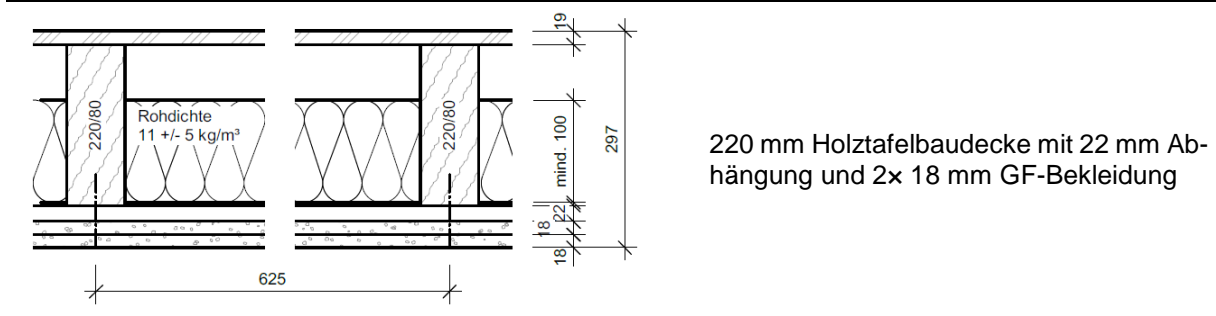
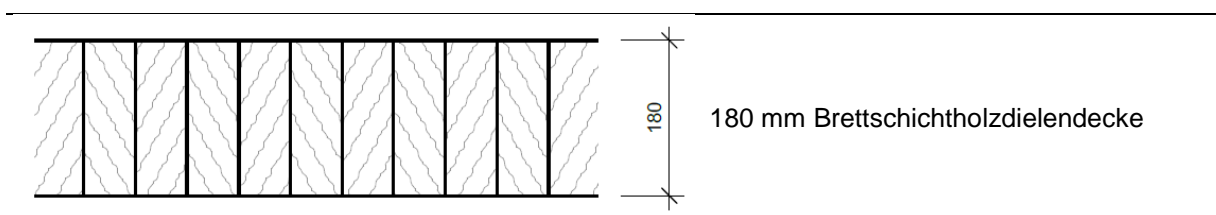
Siehe hierzu auch Anhang 4.6.

Tabelle 27: Übersicht der Holzkonstruktionen aus den Versuchen

Wandaufbauten



Deckenaufbauten



Anschlüsse und Elementfugen

Die Bauteilanschlüsse (Wand-Decke und Wand-Wand) sowie die Elementstöße erfolgen nach typischen baupraktischen Vorgaben (inkl. Fugenspalte von bis zu 20 mm), vgl. Abbildung 180, und nach den Erkenntnissen aus [65]. Dementsprechend können später für die bauordnungsrechtlichen Empfehlungen bereits die zu erwartenden Toleranzen der Bauausführung und Gebrauchszustände mitberücksichtigt werden. Siehe hierzu auch Anhang 4.6.

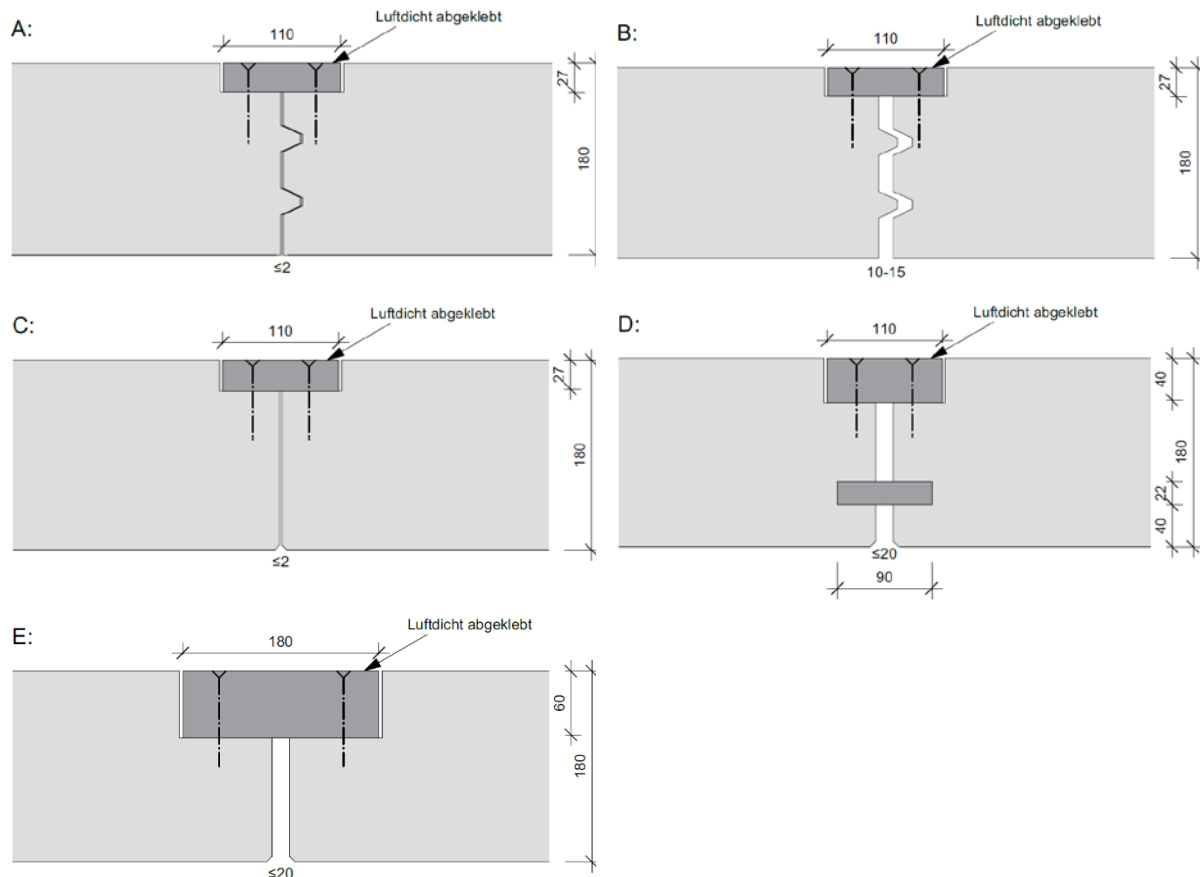


Abbildung 180: Darstellung der Varianten der Elementstößen der Brettschichtholzdecke

Brandlast

Für die Versuche wird eine Brandlastdichte für die Nutzung „Wohnraum“ gewählt. Damit ergibt sich nach 164 für das 90 % - Quantil eine charakteristische Brandlastdichte von 1.085 MJ/m².

Die Brandlast der Versuche wird in Form von Holzkrippen ausgeführt. Die Grundflächen der einzelnen im Brandraum gleichmäßig verteilten Holzkrippen betragen jeweils 1.000 × 1.000 mm². Sie sind aus Stäben mit den Abmessungen B × H = 40 × 40 mm² hergestellt, vgl. Abbildung 181. Das Materialoberfläche-zu-Luft-Verhältnis der Krippen beträgt 1:1. Unter Berücksichtigung der Holzfeuchte von 14 M.-% und der Rohdichte 580 kg/m³ und einer Verbrennungswärme von 17,28 MJ/kg [1] der Holzkrippen entspricht die oben beschriebene Brandlast von 1085 MJ/m² ca. 74 kg/m² Holz, also in Summe ca. 1,5 Tonnen im kleinen Raum (4,5 × 4,5 m²) und ca. 3 Tonnen Holz im großen Raum (4,5 × 9 m²). Mit Blick auf die sehr hoch angesetzte Brandlast lassen sich die durchgeführten Versuche als in ihrer Form einzigartig definieren.

Die Verteilung der mobilen Brandlast bzw. Holzkrippen ist in Abbildung 182 ersichtlich. Die Rot dargestellten Holzkrippen stellen die beiden Holzkrippen mit Zündwannen als Brandquelle dar. In Grün ersichtlich sind die Messbäume zur Temperaturerfassung im Brandraum (siehe Abbildung 182), wodurch einige Holzkrippen leicht versetzt angeordnet sind.



Abbildung 181: Darstellung der mobilen Brandlast durch Holzkippen

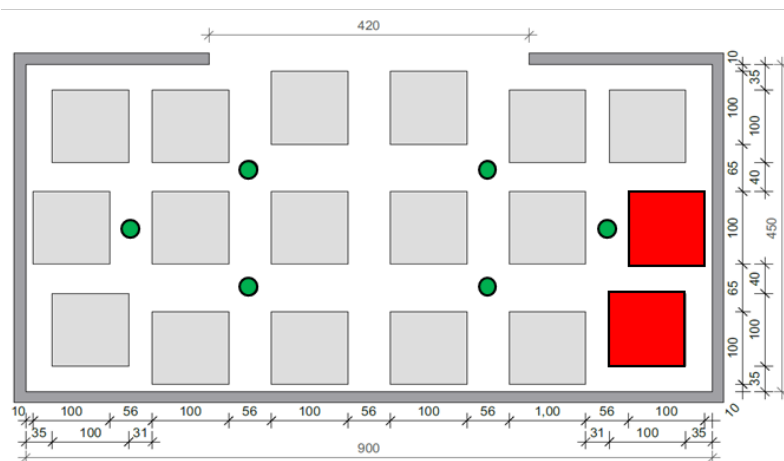
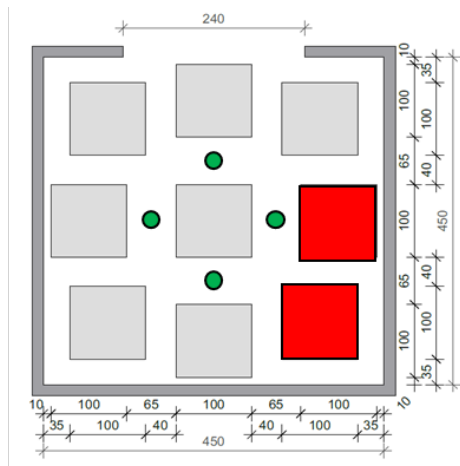


Abbildung 182: Verteilung der Brandlast bzw. Holzkippen über die Brandraumgrundfläche (Maße in cm)

Beschreibung der einzelnen Versuche

Versuch V0

Als Referenz zwischen den üblichen Bauweisen des mehrgeschossigen Bauens dient der Versuch V0. Durch die massive Brandschutzbekleidung (2x 25 mm Gipskarton-Feuerschutzplatte) der brennbaren Konstruktion soll ein Mitbrennen des Holzes ausgeschlossen werden und somit das Brandverhalten einer nichtbrennbaren Konstruktion imitiert werden, vgl. Abbildung 183. Folglich können die Ergebnisse und Erkenntnisse (siehe Abbildung 189) dieser Versuchsreihe ins Verhältnis mit anderen Brandversuchen gesetzt werden und ein Vergleich zwischen brennbarer und nichtbrennbarer Bauweise (z.B. Mauerwerk, Beton) ermöglichen.



Abbildung 183: Brandraum V0

Tabelle 28: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V0

Minute	Uhrzeit	Ereignis
0	15:16	Beginn
8:20	15:24	Austritt der Flammen auf die Fassade
8:40	15:25	Flashover, Brandbeginn der letzten Holzkippen
9:15	15:26	Flammenhöhe bis 3m
16	15:32	Flammenhöhe bis 5m, ziemlich dunkle Rauchausbreitung
24	15:40	Beginn Zerfall der Krippen
29	15:45	Krippen weitestgehend zusammengefallen
45	16:02	Flammenbrand an der Fassade lässt nach
60	16:17	Nur die hinteren Krippen im Brandraum brennen noch
103	17:01	Reste der Krippen nur noch glimmende Haufen
115	17:13	Abfallen der ersten Lage der Bekleidung der Decke

Erkenntnisse:

- Brandschutzbekleidung 2x 25 mm Gipskartonfeuerschutzplatte verhindert den Mitbrand und die Verfärbung der Holzbauteile unter der resultierenden Naturbrandbeanspruchung.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C.
- Flashover nach ca. 9 min.



Abbildung 184: 40. Minute V0: Beginn der Abkühlphase



Abbildung 185: 45. Minute V0: Abkühlphase



Abbildung 186: 60. Minute V0: nur Krippen hinten im Brandraum brennen



Abbildung 187: 103. Minute V0: Holzkrippen nur noch Glutreste



Abbildung 188: 115. Minute V0: Abfallen der oberen Lage der Bekleidung der Decke

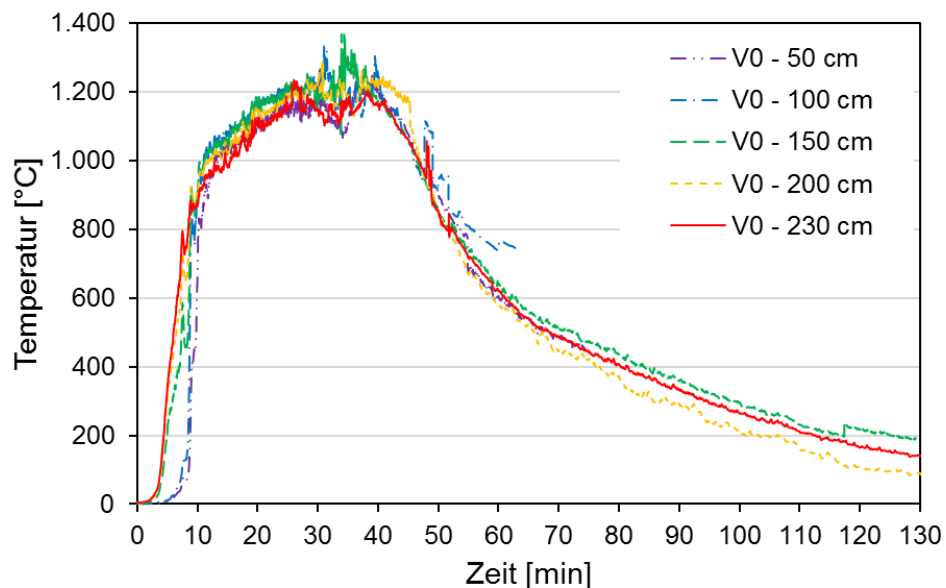


Abbildung 189: Temperatur-Zeit-Verläufe V0 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V1

Versuch V1 verfolgt das Ziel baupraktische Ausführungen des mehrgeschossigen Holzbaues abzubilden.



Abbildung 190: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V1)

Die gewählten Massivholzkonstruktionen mit der sichtbaren Decke und den einlagig bekleideten Wänden entsprechen den Vorgaben des bis dato veröffentlichten Entwurfs der M-HolzBauRL [155]. Der Anteil der ungeschützten, sichtbaren Holzoberfläche beträgt 35 % der gesamten Bauteiloberflächen ohne Fußboden und Fenster zu Brandbeginn. Die Temperatur-Zeit-Kurve dieses Versuches ist in Abbildung 204 dargestellt.

Tabelle 29: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V1

Mi- nu- te	Uhrzeit	Ereignisse
0	11:23	Zündung
4	11:27	Beginn starke Rauchentwicklung
6:20	11:29	Decke entflammt
7:30	11:30	Flammen an der Fassade / Beginn Fassadenbrand

Mi- nute	Uhrzeit	Ereignisse
7:45	11:31	Brandübertritt auf die weiteren Holzkrippen
8:45	11:32	Flashover, Vollbrand im ganzen Raum
11	11:34	Rauchaustritt an Unterkante des Fassadenschildes / Oberkante Wand 4
15	11:38	Flammenhöhe bei 4m, Rauchaustritt Anschluss Decke-Wand 1 außen
19	11:42	Flammen über gesamte Breite des Fassadenschwertes; intensiver, schwarzer Rauch
20	11:43	Rauchaustritt Wand 1, mehrere Stellen außen
28	11:51	Flammen bis 5m Höhe; 1000°C an der Fassade überschritten
33	11:55	Laut hörbares „Knacken“, vermutlich thermisch Zersetzung hinter der K30 Bekleidung
34	11:56	Holzkrippen beginnen zusammenzufallen
38	12:00	Wände 3 und 1 im Einströmbereich völlig intakt
40	12:02	Rissbildung in Gipsplatten der Wände 1 und 3, Rauchaustritt Elementfuge Wand 3
42	12:04	Abfallen der Gipsplatten der Wände 1 und 3
45	12:07	Beginn der Abkühlphase, Gipsplatten von Wände 1 und 3 bereits großflächig abgefallen
54	12:16	Abfallen der Gipsplatten großflächig Wand 2
55	12:17	Rauch aus Elementfuge Wand 2 auf 3m Höhe
57	12:19	Rauchentwicklung im Brandraum nimmt ab
75	12:37	Decke weiterhin im Vollbrand
76	12:38	Rauch aus Schrauben Wand 1
80	12:42	Abfallen der ersten Lage des Brettsperrholz Wände 1 und 3 beginnt
85	12:47	Abfallen der zweiten Lage des Brettsperrholz Wände 1 und 3 beginnt
93	12:55	Löschbeginn, siehe Tabelle 30

Erkenntnisse:

- Nach ca. 40 min erstes Abfallen der Brandschutzbekleidung 1x 18 mm und folglich Mitbrand der Brettsperrholzwandbauteile unter der hier resultierenden Naturbrandbeanspruchung.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C.
- Flashover nach ca. 9 min.

Tabelle 30: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V1

Mi- nu- te	Uhr- zeit	Ereignisse		Löschwasser Liter	
				kumu- liert	ge- samt
93	12:55	Löschangriff	Löschbeginn	0	823,9
93:40	12:56		Flammen in rechter Brandraumhälfte gelöscht	49,4	
95	12:57		Flammen im Brandraum vollständig gelöscht, bei einer 30 sek Pause entflammen unbekleidete Holzflächen und Fugen neu, Vollstrahl zum Entfernen der restlichen Bekleidungsplatten	101,2	
100	13:02		Betreten des Brandraums	279,3	
106	13:08		Schlauch defekt, neuen Schlauch anschließen	-	
108	13:10		Brand unter Kontrolle, alle Oberflächen entsprechend Wärmebildkamera < 60 °C	823,9	
121	13:23		Nachlöscharbeiten	alle Oberflächen entsprechend Wärmebildkamera < 40 °C	
122	13:24	Druckbelüftung für 5min			
135	13:37	Bekleidung mit Schaufel entfernen, Wände mit Wasser kühlen			
142	13:44	Ende der Löscharbeiten			
-	14:45 bis 15:15	Nachkontrolle	Fugenbrand im Anschluss Wand 4 / Wand 1	-	-
			Löscharbeiten an der Rückseite des Fassadenschilds		

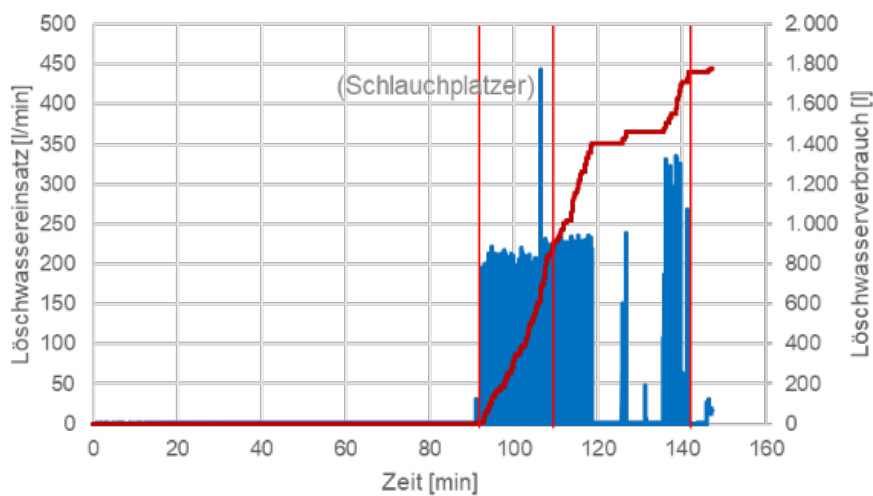


Abbildung 191: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V1



Abbildung 192: 45. Minute V1: Beginn der Abkühlphase



Abbildung 193: 60. Minute V1: Abkühlphase



Abbildung 194: 92. Minute V1: kurz vor dem Löschan-griff



Abbildung 195: 93. Minute: Löschan-griff



Abbildung 196: 93. Minute V1: Löschan-griff



Abbildung 197: 94. Minute V1: 40 Sek nach Löschan-griff V1



Abbildung 198: 95. Minute V1: Flammen gelöscht



Abbildung 199: 100. Minute V1: Löschkräfte betreten den Brandraum



Abbildung 200: 108. Minute V1: Brand unter Kontrolle



Abbildung 201: 142. Minute V1: Ende der Löscharbeiten



Abbildung 202: Nachkontrolle V1: Fugenbrand



Abbildung 203: Nachkontrolle V1: Fugenbrand

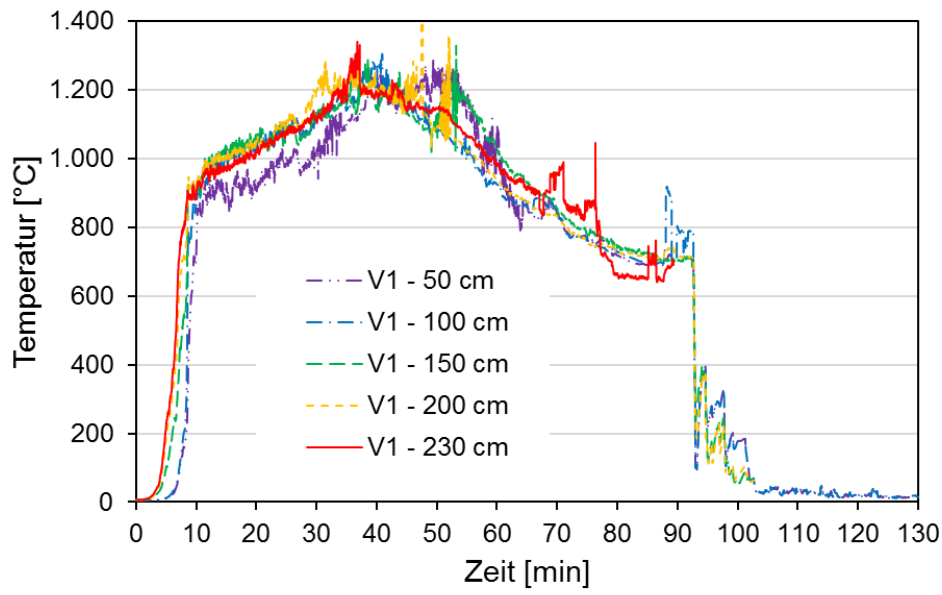


Abbildung 204: Temperatur-Zeit-Verläufe V1 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V2

Zur Variation der Anordnung der brennbaren Oberflächen sind im Versuch V2 anstatt der Decke zwei Wände unbedeckt ausgeführt. Der Anteil der brennbaren Holzoberfläche an der Bauteiloberfläche ist mit 37 % in etwa identisch zum Versuch V1. Die unbedeckten Wände sind gegenüberliegend angeordnet, um eine gegenseitige Beeinflussung zu untersuchen. Zur Betrachtung von bautypischen Schwächungen der Wände durch Elektroeinbauten wurden vier Bohrungen in eine der Massivholzwände vorgesehen und mit für den Brandschutz klassifizierten Einbaudosen für Steckdosen oder Schaltern und Einbauteil bestückt. Hiermit sollte ein möglichst ungünstiger Fall aus der Praxis abgedeckt werden. Die Temperaturzeitkurve dieses Versuches ist in Abbildung 216 dargestellt.



Abbildung 205: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V2)

Tabelle 31: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V2

Minute	Uhrzeit	Ereignisse
0	10:24	Zündung
6	10:30	Wand 3 beginnt zu brennen, ceiling jet deutlich erkennbar
7	10:31	Wand 1 beginnt zu brennen, Flammen an der Fassade / Beginn Fassadenbrand, Brandübertritt auf die weiteren Holzkippen
8	10:32	Flashover, Vollbrand im ganzen Raum
18	10:42	Flammenhöhe 5 m
43	11:07	obere Lage der Bekleidung der Decke beginnt abzufallen
49	11:13	Krippen abgebrannt, Fassadenbrand klingt ab
51	11:15	obere Lage der Bekleidung der Decke weitestgehend abgefallen
55	11:19	Keine Flammen mehr an der Fassade
62	11:26	untere Lage der Bekleidung der Decke beginnt abzufallen
65	11:29	Wand 3 erste Lage des Brettsperrholzes in Öffnungsnähe abgefallen
69	11:33	untere Lage der Bekleidung der Decke großflächig abgefallen
73	11:37	Wand 1 zweite Lage des Brettsperrholzes brennt
92	11:56	Löschbeginn, siehe Tabelle 32

Erkenntnisse

- Nach ca. 33 min erstes Abfallen der ersten und nach ca. 62 min erstes Abfallen der zweiten Lage der Brandschutzbekleidung an der Decke unter der hier resultierenden Naturbrandbeanspruchung.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C.
- Flashover nach ca. 8 min.

Tabelle 32: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V2

Mi- nute	Uhr- zeit	Ereignisse	Löschwasser- verbrauch Liter	
			kumu- liert	ge- samt
92	11:56	Löschbeginn Vollstrahl in 10 s Sprühstößen	0	925
94	11:58	Flammen im Brandraum vollständig gelöscht Restliche Bekleidung der Decke wird mit Einreißhaken und Vollstrahl entfernt	104,5	
98	12:02	Betreten des Brandraums alle Oberflächen entsprechend Wärmebildkamera < 60 °C	323,6	
109	12:13	Brand unter Kontrolle, alle Oberflächen entsprechend Wärmebildkamera < 40 °C	924,5	
113	12:17	Boden wird mit Löschwasser gekühlt Kontrolle des Öffnungssturzes auf Glimmnester	-	618
127	12:31	Kontrolle der Decke auf Glimmnester		
133	12:37	Ende der Löscharbeiten Öffnung in Wand 2 zur Entrauchung des Brandraums		
-	15:38	Glimmen am Holzständer der Öffnungslaibung	-	-
-	17:05	Glimmen des Brettsperrholzes Wand 1		

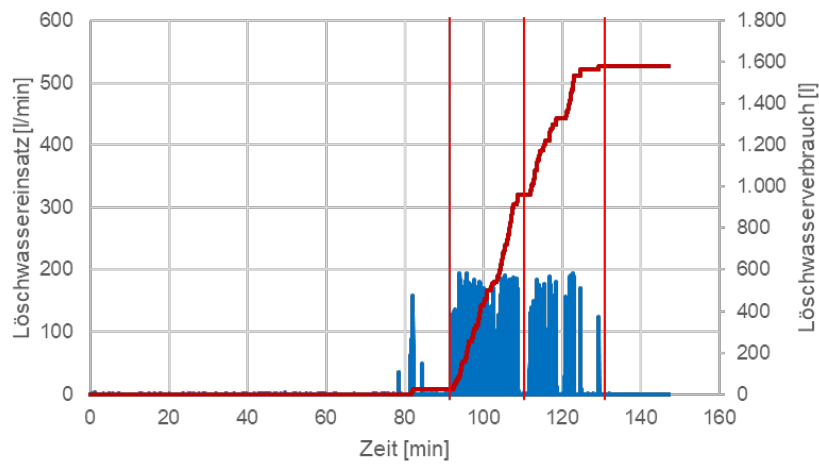


Abbildung 206: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V2



Abbildung 207: 45. Minute V2: Beginn der Abkühlphase



Abbildung 208: 60. Minute V2: Abkühlphase



Abbildung 209: 92. Minute V2: kurz vor dem Löschangriff



Abbildung 210: 92. Minute V2: Löschangriff



Abbildung 211: 94. Minute V2: Flammen gelöscht



Abbildung 212: 98. Minute V2: Löschkraft betreten den Brandraum



Abbildung 213: 133. Minute V2: Ende der Nachlöscharbeiten und Öffnung zur Entrauchung in Wand 2



Abbildung 214: ca. 3 h nach Versuchsende V2: Glimmen am Holzstände der Öffnungslaibung



Abbildung 215: ca. 5 h nach Versuchsende V2: Glimmen des Brettsperholzes Wand 1

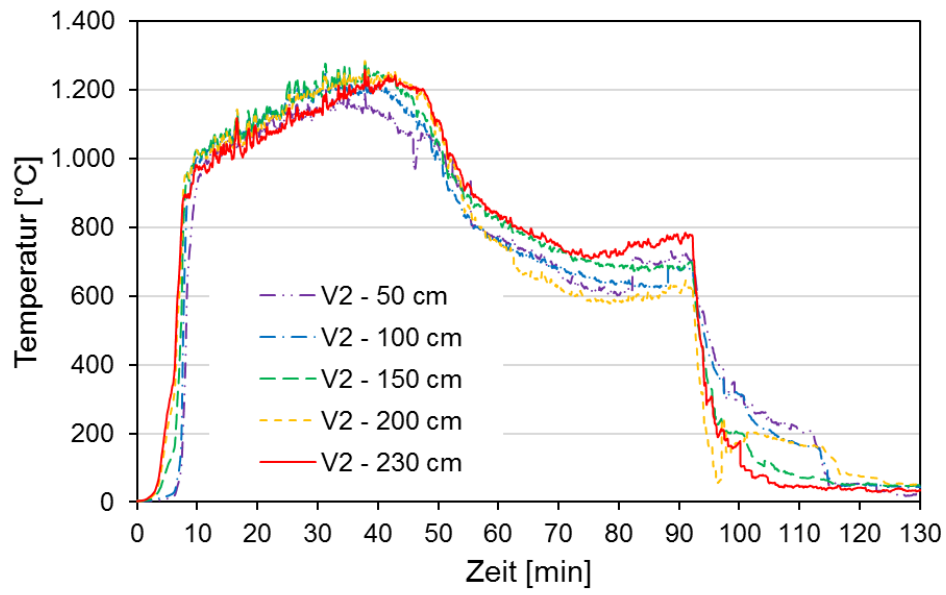


Abbildung 216: Temperatur-Zeit-Verläufe V2 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V3

Versuch V3 stellt ein Gebäude mit einer sichtbaren Brettschichtholz-Decke und vier bekleideten Holztafelbauwänden (2x 18 mm GKF/GF) dar, wobei eine Wand geringer (2x 12,5 mm GKF/GF + OSB) bekleidet war. Hiermit soll die Vergleichbarkeit zwischen den holzbauspezifischen Bauweisen Massivholz zu Holztafelbau erbracht werden. Der Anteil von brennbarer Holzoberfläche an der Bauteiloberfläche beläuft sich auf 42 % und ist damit leicht erhöht zu den vorherigen Versuchen. Die Temperatur-Zeit-Kurve dieses Versuches ist in Abbildung 232 dargestellt.



Abbildung 217: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V3)

Tabelle 33: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V3

Minute	Uhrzeit	Ereignisse
0	11:37	Zündung
6	11:43	Decke verfärbt im Bereich der Flammen
7	11:44	Decke beginnt zu brennen
8:30	11:45	Flammen an der Fassade / Beginn Fassadenbrand
9	11:46	Decke im Vollbrand, ca. die Hälfte der Holzrippen brennen
9:30	11:46	Flammenhöhe an Fassade: ca. 2 m
10	11:47	Flashover, Vollbrand
12	11:49	Ventilationsgesteuerter Brand; Flammenhöhe: 5 m Vollbrand im Raum; schlagartig sehr viele Flammen + hohe Wärmestrahlung
14	11:51	Extreme Flammenausbreitung auch über die gesamte Breite der Fassade
18	11:55	Abfallen Bekleidung hörbar
26	12:03	Erstes Zusammenfallen der Holzrippen
28	12:05	Flammenhöhe an der Fassade: 6 m
43	12:20	Abfallen der oberen Lage der Bekleidung an rechter Hälfte von Wand 2
44	12:21	Zerfall aller Holzrippen
45	12:22	Flammen an der Unterkante der Brandraumöffnung
46	12:23	Flammenhöhe weiterhin über 5 m
48	12:25	Abfallen der oberen Lage im Ventilationsbereich der Wände 1 und 3
53	12:30	Abfallen der oberen Lage im gesamten Brandraum

Minute	Uhrzeit	Ereignisse
54	12:31	Löscharbeiten bzw. Kühlen der Unterkante der Brandraumöffnung
63	12:40	oberen Lage der Bekleidung der linken Hälfte von Wand 2 vollständig abgefallen
67	12:44	Wand 1: beide Lagen Bekleidung abgefallen, OSB sichtbar und brennend
72	12:49	Rauchentwicklung lässt nach, brandlastgesteuerter Brand, nur noch wenig Flammen an der Fassade
75	12:52	Wand 1: beide Lagen Bekleidung und OSB abgebrannt, Dämmung sichtbar
84	13:01	Wand 2 rechts: OSB brennt deutlich aus Fugen, intensiver als Wand 2 links ohne OSB
87	13:04	Die meisten Krippen eingefallen
90	13:07	Decke nur noch wenig Flammenbrand
92	13:09	Linke Wand fast vollkommen ohne Brand
92	13:09	Decke teilweise erloschen; immer noch Holzkrippen vorhanden, die brennen
100	13:17	Wand 2 rechts: untere Lage der Bekleidung fällt ab Wand 2 links: Flammenbrand aus Fugen
103	13:20	Wand 3: wenig Flammenbrand aus Fugen
110	13:27	OSB Platte rechte Wand teilweise erloschen Erkenntnis: dieser Versuch wird sich nicht von selbst löschen können Wenig Abfall von der Decke
112	13:29	Decke ca. 80 mm Abbrand, ca. 180 mm vorhanden, von Decke fällt nur noch wenig Kohle herunter
145	14:02	Entscheidung: Löschen
150	14:07	Beginn Löscharbeiten, siehe Tabelle 34

Erkenntnisse:

- Nach ca. 90 min beteiligt sich die Decke kaum noch am Brand.
- Brandschutzbekleidung 2x 18 mm verhindert den Mitbrand der Holzbauteile nicht über die gesamte Branddauer. Lokale Brände an den Ständern und den OSB Platten ab ca. 65. Min.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C
- Flashover nach ca. 10 min

Tabelle 34: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V3

Minute	Uhrzeit	Ereignisse	Löschwasser- verbrauch Liter	
			kumu- liert	ge- samt
150	14:07	Löschbeginn	0	802
154	14:11	Flammen im Brandraum vollständig gelöscht Öffnungssturz mit Einreißhaken geöffnet Restliche Bekleidung der Decke wird mit Vollstrahl entfernt	64,7	
159	14:16	Betreteten des Brandraums	280,8	
160	14:17	Öffnung von Wand 4 mit Einreißhaken, Vollstrahl zum Entfernen aller Bekleidungen	-	
172	14:29	Brand unter Kontrolle	801,5	
175	14:32	zwei Öffnungen in Wand 2 zur Entrauchung des Brandraums	-	
178	14:35	Druckbelüftung		
183	14:40	Öffnung und Löschen des Sturzes der Brandraumöffnung und der Wände		
197	14:54	Ende der Löscharbeiten		
209	15:06	Löschen des Fassadenschilds an Vorder- und Rückseite Löschen eines Einbrandes in Fuge Decke/Wand 3	-	-
215	15:12	Rückbau des Fassadenschilds, Nachlöschen am Boden		
-	ca. 17:00	Glimmen des Ständers der Laibung der Brandraumöffnung		
Folgetag		Durchbrand von Wand 4 in den Fußbodenaufbau		

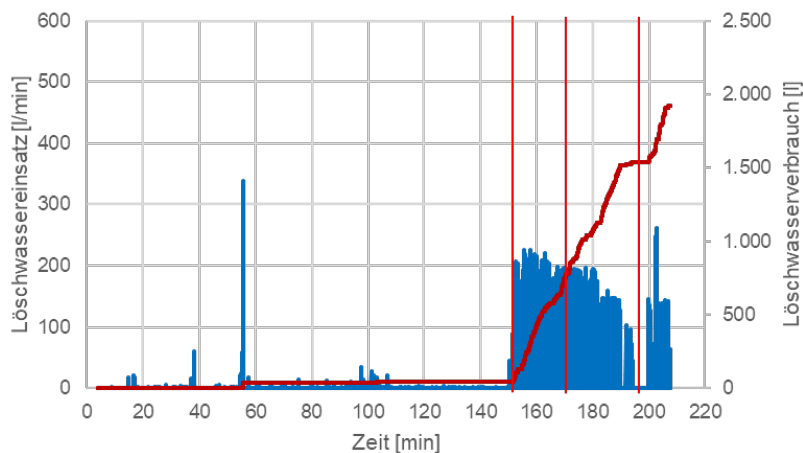


Abbildung 218: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V3



Abbildung 219: 45. Minute V3: Beginn der Abkühlphase



Abbildung 220: 60. Minute V3: Abkühlphase



Abbildung 221: 150. Minute V3: kurz vor dem Löschangriff



Abbildung 222: 150. Minute V3: Löschangriff



Abbildung 223: 154. Minute V3: Öffnen des Sturzes mit Einreißhaken



Abbildung 224: 158. Minute V3: Löschkräfte betreten den Brandraum



Abbildung 225: 172. Minute V3: Brand unter Kontrolle



Abbildung 226: 180. Minute V3: Öffnungen zur Entrauchung in Wand 2



Abbildung 227: 197. Minute V3: Ende der Löscharbeiten



Abbildung 228: Nachkontrolle V3: Löschen des Fassadenschildes an der Vorderseite



Abbildung 229: Nachkontrolle V3: Einbrand in die Fuge



Abbildung 230: Nachkontrolle V3: Einbrand in Fuge Decke/Wand 3



Abbildung 231: Foto ca. 2 h nach Versuchsende V3: Glimmen des Ständers der Laibung der Brandraumöffnung

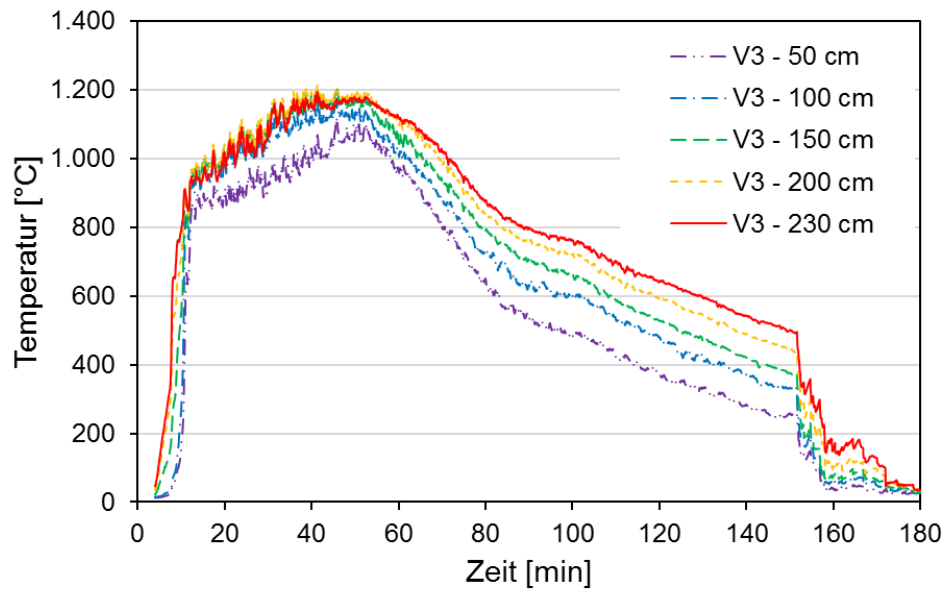


Abbildung 232: Temperatur-Zeit-Verläufe V3 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Versuch V4

Als Abschluss der Versuchsreihe ist im Versuch V4 der größte Anteil an brennbarer Holzoberfläche an der Bauteiloberfläche mit 58 % vorgesehen. Neben der Decke und einer Wand sind zusätzliche ein Unterzug und zwei Stützen im Brandraum angeordnet, vgl. Abbildung 234. Hiermit soll auch nochmals der Einfluss der brennbaren Oberfläche im Raum auf die Brandausbreitung über die Fassade betrachtet werden. Zusätzlich ist auch das Eingreifen der Feuerwehr nach über 60 Minuten noch in der Vollbrandphase vorgesehen. Hiermit werden dann Aussagen zur Löschbarkeit von Holzgebäuden gewonnen. Die Temperatur-Zeit-Kurve dieses Versuches ist in Abbildung 240 dargestellt.



Abbildung 233: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V4)

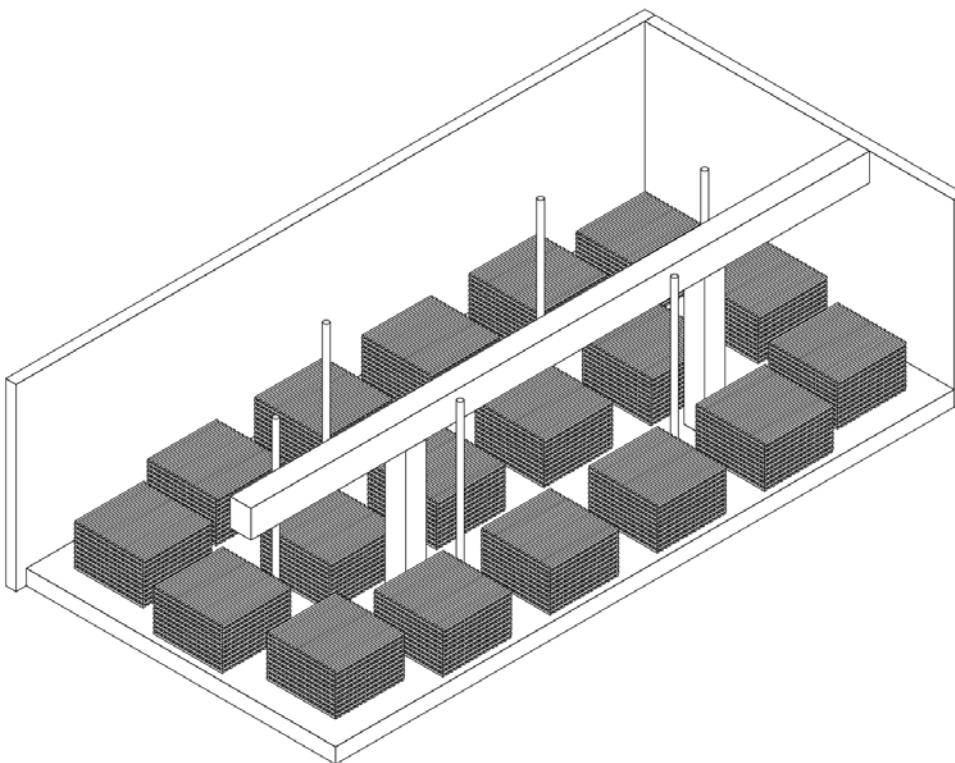


Abbildung 234: Anordnung der linearen Bauteile (zwei Stützen und Unterzug), der sechs Messbäume und der 18 Holzkippen bei V4

Tabelle 35: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V4

Minute	Uhrzeit	Ereignisse
0	11:35	Zündung
3	11:38	Rauch tritt aus dem Brandraum an die Fassade aus
7:30	11:43	Decke beginnt zu brennen
9	11:44	Flashover, Vollbrand
44	12:19	große Risse in der oberen Lage der Bekleidung der Wand 2
54	12:29	Großteil der Holzrippen zusammengefallen, leichter Rückgang der Flammenbildung Risse in der oberen Lage der Bekleidung der Wand 3 erkennbar, aber kleiner als Risse in Wand 2
55	12:30	Abfallen der oberen Lage der Wand 2 beginnt
59	12:34	Rauchaustritt aus Anschluss Wand 2 / Fußboden
65	12:40	Löschbeginn, siehe Tabelle 36

Erkenntnisse:

- Unproblematisches Ablöschen der Konstruktion bis „Feuer in Gewalt“.
- Max. Brandraumtemperaturen um 1.200°C
- Flashover nach ca. 10 min

Tabelle 36: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V4

Minute	Uhrzeit	Ereignisse	Löschwasser- verbrauch Liter	
			kumu- liert	ge- samt
65	12:40	Löschbeginn	0	1530
66	12:41	Flammen im Brandraum vollständig gelöscht Rauchbildung nimmt ab	249,3	
67	12:42	Kein Flammenbrand an der Fassade	424,5	
70	12:45	Betretten des Brandraums	764,8	
71	12:46	Kühlen des Fußbodenaufbaus	849,7	
80	12:55	Brand unter Kontrolle alle Oberflächen entsprechend Wärmebildkamera < 60 °C Öffnung in Wand 2 zur Entrauchung des Brandraums	1529,9	
83	12:58	z ^o Reste der Krippen bilden Flammen an Wand 1	1608,1	1608

Minute	Uhrzeit	Ereignisse	Löschwasser- verbrauch Liter		
			kumu- liert	ge- samt	
87	13:02	Öffnung in Wand 2 zur Entrauchung des Brandraums hergestellt			
90	13:05	Druckbelüftung Öffnung und Löschen der Wände Kühlen der Holzkrippenrest im Brandraum			
112	13:27	Ende der Löscharbeiten alle Oberflächen entsprechend Wärmebildkamera < 30 °C			
116	13:31	Nachkontrolle			
125	13:40		Löschen des Fassadenschilds an der Rückseite Löschen eines Einbrandes in Fuge Decke/Wand 3		
133	13:48		Brandraum freiräumen, Reste der Holzkrippen heraus-räumen		
149	14:04		Vergrößerung der Ventilationsöffnung in Wand 2		
150	14:05		Löschen des Fassadenschilds an der Vorderseite		
177	14:32		Löschen der Elementfuge auf Oberseite der Decke in Nähe zu Wand 3		
182	14:37		Löschen der glimmenden Reste der Holzkrippen		
			Löschen des Fassadenschilds an Vorderseite		
Folgetag		Durchbrand zw. Wand 2 und Elementfuge der Decke			

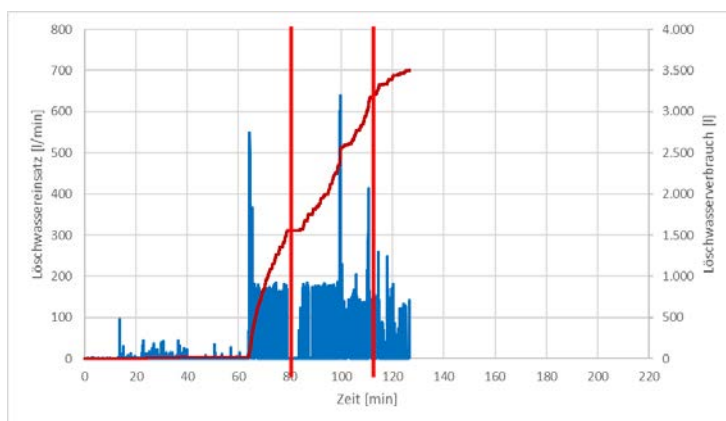


Abbildung 235: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V4



Abbildung 236: 50. Minute V4: Beginn der Abkühlphase



Abbildung 237: 63. Minute V4: kurz vor dem Löschangriff



Abbildung 238: 65. Minute V4: Löschangriff



Abbildung 239: 80. Minute V4: Brand unter Kontrolle

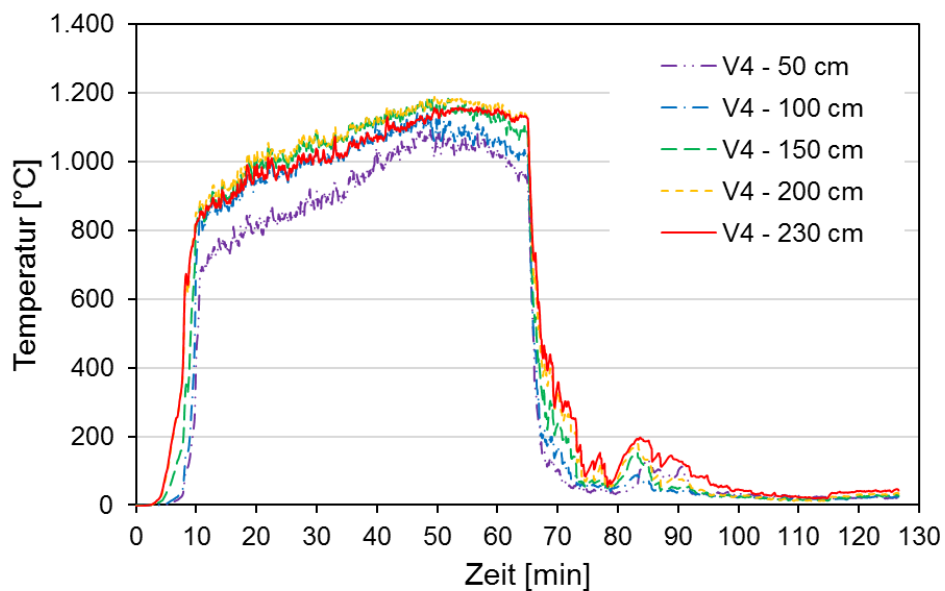


Abbildung 240: Temperatur-Zeit-Verläufe V4 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)

Auswertung der Löscharbeiten

In Tabelle 37 sind die Zeitpunkte des Löschangriffs, ihre Dauer und der Löschwasserverbrauch in den Belegversuchen zusammengestellt.

Tabelle 37: Übersicht über die Löscharbeiten in den Belegversuchen

Versuch	Löschen- angriff nach ... min	Brandraum- temperatur Löschangriff °C	Löschwasser					
			Löschangriff			Nachlöscharbeiten		
			Liter	min	l/min	Liter	min	l/min
V 0	-	-	-	-	-	-	-	-
V 1	93	720	824	15	55	933	34	28
V 2	92	770	925	17	55	618	24	26
V 3	150	500	800	22	37	674	25	27
V 4	65	1.120	1.550	15	103	1.600	30	54

Alle Löscharbeiten wurden mit Hilfe eines C-Hohlstrahlrohrs und Wasser mit 1% Netzmittel sowie 8 bar Pumpleistung am Löschfahrzeug durchgeführt.

Der Löschangriff umfasst alle Tätigkeiten der Einsatzkräfte der Feuerwehr, bis zur Meldung des Einsatzleiters, dass der Brand unter Kontrolle sei. In dieser Phase der Löscharbeiten wurde der Flammenbrand gelöscht, der Brandraum betreten und alle Raumboflächen auf < 60 °C gekühlt. Die Oberflächentemperaturen wurden stets mit den Wärmebildkameras der Einsatzkräfte festgestellt. Entsprechend der Einschätzung der Einsatzkräfte wurden gegebenenfalls Teile der Brandschutzbekleidung entfernt, um Flammen- und Glimmbrände zu löschen.

Die Nachlöscharbeiten umfassen alle Arbeiten zur weiteren Abkühlung und Entrauchung des Brandraums sowie der Detektion verdeckter Glimm- und Schwelvvorgänge. Diese Arbeiten wurden ebenfalls durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr durchgeführt. Die Brandschutzbekleidung aller Holzbauteile wurden brandraumseitig vollständig entfernt. Aus Holztafelbauteilen, deren brennbare Bauteilschichten augenscheinlich thermisch beansprucht wurden, wurden alle Wärmedämmstoffe entfernt. Die Oberflächentemperaturen wurden weiterhin mit den Wärmebildkameras der Einsatzkräfte festgestellt.

Das Entfernen der Brandschutzbekleidung mit Einreißhaken und Feuerwehraxt der Feuerwehr erwies sich als zeitaufwändig und unter der zusätzlichen Belastung von Atemschutzgerät und Sauerstoffversorgung als körperlich anstrengend. Die thermisch beanspruchten Brandschutzbekleidungen ließen sich mit Löschwasser im Vollstrahl einfacher entfernen, ein wesentlicher Teil des verwendeten Löschwassers ist auf diese Praktik zurückzuführen.

In den Versuchen 1, 3 und 4 wurden mobile Druckbelüfter der Feuerwehr eingesetzt. In den Versuchen 2, 3 und 4 wurde die jeweilige Wand 2, eine Holztafelbauwand gegenüber der Brandraumöffnung, auf einer Fläche von ca. 1 m² geöffnet. Es wurde nur eine geringe Wirksamkeit zur Entrauchung festgestellt. Die Einsatzkräfte der Feuerwehr verwendeten daher durchgängig umluftunabhängige Atemschutzgeräte. In Versuch 1 und 3 erfolgte der Löschangriff nach 92 Minuten und 150 Minuten, zu diesem Zeitpunkt waren die Holzkrippen weitestgehend verbrannt. In Versuch 4 begünstigte die Druckbelüftung vermutlich ein Wiederentzünden der augenscheinlich gelöschten Holzkrippen, wodurch eine erneute Wasserbeaufschlagung notwendig wurde.

Nach erfolgreichem Löschangriff und den Nachlöscharbeiten gaben die Einsatzkräfte der Feuerwehr den gelöschten Brandraum frei. In den Versuchsprotokollen der Belegversuche in diesem Kapitel wurden weitere Löscharbeiten dokumentiert. Diese resultierten einerseits aus den besonderen Randbedingungen der Versuchsaufbauten, beispielsweise waren in den Belegversuchen V1 und V3 Löscharbeiten im Anschlussbereich zwischen Brandraum und Fassadenschild notwendig. Andererseits wurden notwendige Löscharbeiten erst infolge späterer Nachkontrollen festgestellt. In den Belegversuchen V2 und V3 sind einzelne Glimmbrände am Ständer der Holztafelbauwände oder der Oberflächen der Brettsperrholzwände erst Stunden nach dem Ende der Löscharbeiten aufgetreten. Diese späten Glimmbrände verdeutlichen die Notwendigkeit einer Nachkontrolle, bzw. der wiederholten Begehungen des Brandorts

durch sachkundige Einsatzkräfte. Ein sich wieder entwickelnder Glimmbrand kann bei rechtzeitiger Erkennung durch die Verwendung von Handlöschgeräten beendet werden.

Brandraumtemperaturen

Eine Gegenüberstellung der Brandraumtemperaturen erfolgt über die Messdaten der Plate-Thermoelemente (PL), welche entsprechend [66] 100 mm unterhalb der Decke angeordnet sind. Abbildung 241 zeigt die Gegenüberstellung der Versuchsdaten, zusätzlich ist die normative Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve zur Einordnung mit dargestellt.

Zunächst wird deutlich, dass die Brandraumtemperaturen in der Brandentwicklungsphase infolge identischer mobiler Brandlastdichte sowie Zündvorgang nahezu keine Unterschiede aufwiesen. Die ab der ca. 10. Versuchsminute einsetzende stationäre Brandphase zeigte bis zur 40. Versuchsminute nur geringfügige Unterschiede im Temperaturverlauf ($\Delta T < 150 \text{ K}$) auf. Der Einfluss der ungeschützten bzw. anfänglich geschützten Holzbauteile war erst nach der 40. Versuchsminute sichtbar.

Für V0 ließ sich nach der stationären Brandphase die Abklingphase erkennen, welche sich durch das vollständige Umsetzen der mobilen Brandlast (Ausbrand) darstellte. Aufgrund der über alle Versuche gleichbleibenden Randbedingungen, \pm Ventilationsbedingung und mobile Brandlastdichte, \pm endete die stationäre Brandphase der mobilen Brandlast im Zeitbereich 40. – 50. Versuchsminute je nach Menge der sich am Brand beteiligten Holzflächen. Der Verlauf der Brandraumtemperaturen im Anschluss der stationären Brandphase (Abkühlphase) wurde somit primär über die sich am Brand beteiligten Holzflächen (strukturelle Brandlast) definiert.

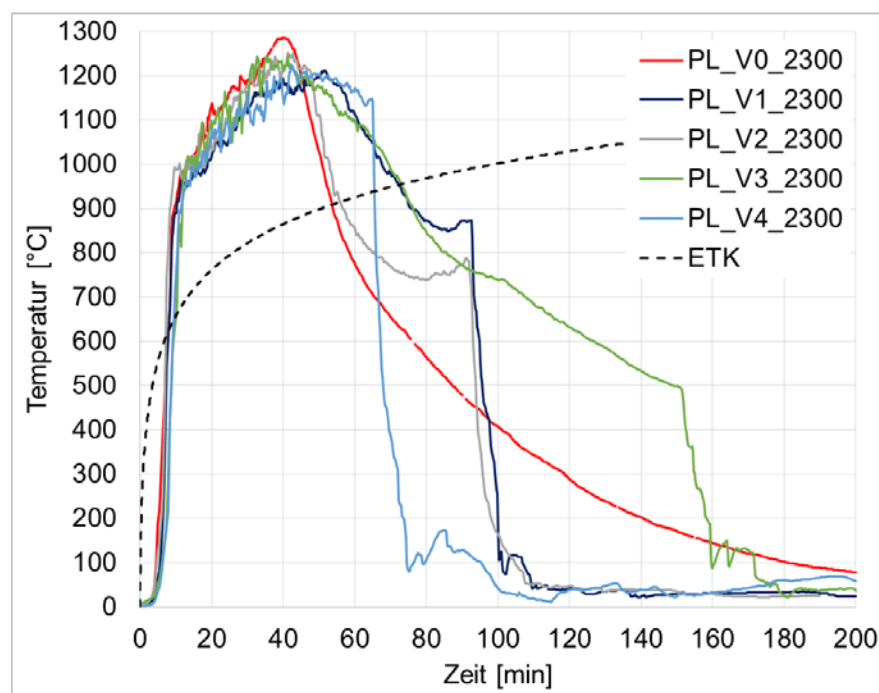


Abbildung 241: Vergleich der Brandraumtemperaturen der Belegversuche in 2300 mm Höhe

Zu V1 ist anzumerken, dass die Brandschutzbekleidung der Massivholzwände aus 1 x 18 mm Gipsfaserplatten nach ca. 35 Minuten versagten und anschließend ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Wände stattfand. Als Versagen der Brandschutzbekleidung wird in diesem Vorhaben die Überschreitung einer Temperatur von 300 °C in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Trägerkonstruktion definiert, da ab diesem Punkt ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktion nicht mehr auszuschließen ist. Die Abkühlphase setzte ab der 50. Versuchsminute ein. Zur 90. Versuchsminute war ein erneuter Anstieg der Brandraumtemperaturen zu erkennen, welcher zeigte, dass es nicht zum Selbstverlösch kam. Zusammen mit dem, gemäß den Temperaturmessungen im ungeschützten Massivholzbauteil, abgeleiteten Restquerschnitte wurde der Versuch in der 92. Versuchsminute abgebrochen und die abwehrenden Maßnahmen der Feuerwehr setzten ein.

Mit der ungeschützten Ausführung von zwei sich gegenüberliegenden Wänden, in V2, und zweilagiger Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm Gipsfaserplatten der restlichen Bauteile zeigte sich bis zur 60. Versuchsminute ein nahezu identischer Verlauf der Brandraumtemperaturen vergleichend zu V0. Mit dem ab dieser Versuchsdauer erfolgten Versagen der Brandschutzbekleidung der Holztafelbauteile war ein erneutes Ansteigen der Brandraumtemperaturen verbunden. Für diesen Versuch ließ sich somit kein Selbstverlöschchen erwarten. Der erneute Temperaturanstieg gekoppelt mit dem verbleibenden Restquerschnitt der ungeschützten Wände wurde der Versuch in der 92. Versuchsminute abgebrochen und durch die einsetzenden Löschmaßnahmen beendet.

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

Das größte Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Bauteilflächen mit 58 %, bei dem auch die linearen Bauteile (Unterzug + 2 Stützen) ins Verhältnis eingehen, in V4 zeigte bis zum Beginn der Abkühlphase keine wesentlichen Unterschiede zu den anderen Versuchen. Zur Analyse der Wirksamkeit von Löschmaßnahmen wurde der Versuch nach der 65. Versuchsminute, bei Brandraumtemperaturen oberhalb 1100°C mit Versagen der Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm durch einen einsetzenden Löschangriff beendet.

Versuch V0:

Die Temperaturen des Referenzversuches in der Abbildung 189, der als nicht brennbar ausgeführt war, ergeben sich rein aus dem Abbrand der mobilen Brandlast. Die Temperaturen steigen aufgrund des Öffnungsfaktors erwartungsgemäß schnell im gesamten Brandraum an. Es werden nach ca. 12 min über alle gemessenen Höhen im Brandraum Temperaturen um ca. 1.000 °C registriert. Ab diesen Zeitpunkt reduziert sich der Anstieg der Brandraumtemperaturen vergleichsweise drastisch, so dass die weitere Erhöhung der Temperatur auf 1.200 °C bis zur Minute 30 andauert. Dieser Temperaturbereich von 1.100 °C bis maximal 1.200 °C hält sich ca. 10 min konstant im Raum aufrecht. Ab der 40. Minute beginnt die Abkühlphase aufgrund der sich aufbrauchenden mobilen Brandlast und die Brandraumtemperaturen fallen bis zur 60. Minute schnell auf 600 °C. Nach der 60. Minute zieht sich die Abkühlphase etwas in die Länge und die Brandraumtemperaturen sinken über einen längeren Zeitraum auf unter 200 °C. Hierbei ist zu beachten, dass zum Ende des Versuches leider mehrere Temperaturmessstellen ausfallen, weshalb ab dem Versuch V2 Thermoelemente mit einem stärkeren Durchmesser verwendet wurden.

Versuch V1:

Bei dem Versuch V1 wurde die Decke sichtbar ausgeführt und die Bekleidung der Wände bestand aus einmal 18 mm Gipsfaserplatten. Diese Eigenschaften des Brandraumes haben einen deutlichen Einfluss auf den Temperatur-Zeit-Verlauf, der in Abbildung 204 zu sehen ist. Zum Beginn des Versuches ist im Vergleich zu V0 kaum ein Unterschied in der Temperaturentwicklung zu erkennen. Es werden wiederum nach 12 min Temperaturen bis ca. 1.000 °C gemessen, woraufhin der weitere Anstieg verlangsamt auf bis zu 1.200 °C zur 35. Minute hin erfolgt. Ein Einfluss der sichtbar ausgeführten Holzdecke in dem Verlauf der Brandraumtemperaturen ist bisher nicht erkennbar. Der Beginn der Abkühlphase liegt hier ebenfalls bei der 40. Minute. In dieser Phase wird der Einfluss der sichtbaren Oberflächen und aufgrund des Versagens der Schutzbekleidung der Wände deutlich, die in der 40. Minute Rissbildungen aufweisen. Im Vergleich zu dem V0 bleiben die Brandraumtemperaturen in der Abkühlphase über einen längeren Zeitraum auf einem hohen Niveau sinken aber dennoch langsam. Im Vergleich zu dem V0, bei dem in der 60. Minute Brandraumtemperaturen von ca. 600 °C gemessen wurden, werden im V1 noch zu diesem Zeitpunkt ca. 1.000 °C registriert. Zum Ende des dargestellten Temperaturverlaufes ist kaum noch ein fallender Temperaturtrend zu erkennen. Entsprechend folgt in der 92. Minute der Löschangriff, was an den drastisch fallenden Temperaturen zu sehen ist.

Versuch V2:

Der V2 hat zwei sich gegenüberliegende Wände sichtbar ausgeführt. Alle weiteren Bauteile sind mit zweimal 18 mm Brandschutzbekleidung geschützt. Der Verlauf der Brandraumtemperaturen ist in der

Abbildung 216 dargestellt. Die ersten 40 Minuten des Temperaturverlaufes in diesem Versuch sind denen im Versuch V1 und V2 sehr ähnlich. Es kann wieder ein sehr schneller Anstieg bis auf 1.000 °C bei der 12. Minute registriert werden und es folgt daraufhin ein langsamerer Temperaturanstieg auf 1.200 °C bis zur 30. Minute. Der Beginn der Abkühlphase erfolgt, im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen, 5 Minuten später, bei der 45. Minute nach Zündung. Die Abkühlphase in diesem Versuch bildet sich wiederum etwas anders aus, als es bei den vorangegangenen Versuchen der Fall war. Anfänglich fallen die Temperaturen im Brandraum, trotz der beiden sichtbaren Holzwände, schnell ab. Das Bild des Temperaturverlaufes bis zu 55. Minute ist dem im Versuch V0 sehr ähnlich. Entsprechend kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Ursache für die sinkenden Brandraumtemperaturen die sich reduzierende mobile Brandlast ist. Der Einfluss der brennbaren Oberflächen der beiden Wände wird in den Messdaten nicht sichtbar. Anders sieht der Trend des Temperaturverlaufes nach der 55. Minute aus. Ab diesem Zeitpunkt fallen die Brandraumtemperaturen weniger intensiv und der Brandraum befindet sich damit im Vergleich zu Versuch V0 bei einem hohen Temperaturniveau, was gut im direkten Vergleich der Temperaturen bei Minute 60 zu erkennen ist. Zu diesem Zeitpunkt werden im V2 ca. 200 K höhere Brandraumtemperaturen als im V0 registriert. Im Vergleich zum V1 ist das hohe Temperaturniveau von ca. 1.000 °C nicht vorhanden, weil zu diesem Zeitpunkt die Bekleidung der übrigen Bauteile noch intakt waren. Das Versagen der Brandschutzbekleidung beginnt in diesem Versuch ab der 62. Minute und im weiteren Verlauf der Brandraumtemperaturen ist dieser Sachverhalt auch aufgrund von konstant hohen Temperaturen ab etwa Minute 70 erkennbar. Es kommt sogar in der 90. Minute zu einem leichten Anstieg der Brandraumtemperaturen, bevor dann in der 92. Minute der Löschangriff durchgeführt wird.

Versuch V3:

Der V3 ist der erste Versuchsaufbau mit einer doppelt so großen Grundfläche, als es bei V0 bis V2 der Fall war. Zusätzlich ist es der Versuch, bei dem das Untersuchungsziel darin bestand, einen Nachweis des Selbstverlöschens einer Holzkonstruktion zu zeigen. Entsprechend fällt die Versuchsdauer im Vergleich zu allen anderen Versuchen auch deutlich länger aus. Die Zeitachse in der Abbildung 232 bildet entsprechend einen größeren Zeitraum ab. Der Verlauf der Brandraumtemperaturen in diesem Versuch ist aufgrund des größeren Brandraumes zeitlich etwas nach hinten versetzt, ansonsten aber qualitativ, zumindest in der ersten Hälfte, den vorangegangenen Versuchen ähnlich. Es werden ca. 900°C Brandraumtemperatur sehr schnell, etwa nach ca. 12 min erreicht. Danach folgt ein langsamer Anstieg der Brandraumtemperaturen auf 1.200 °C bis zur 40. Minute. Die Abkühlphase setzt bei diesem Versuch in der 55. Minute ein. An diesem Punkt fällt die Brandraumtemperatur zunächst bis zur 80. Minute schnell ab. In der 67. Minuten versagen die ersten Bekleidungen vollständig, so dass sich die Konstruktion an dem Brand beteiligt. Ab der 80. Minute wird der fallende Trend der Brandraumtemperaturen aufgrund des Versagens der Brandschutzbekleidungen an allen Wänden gestört. Die Brandraumtemperaturen fallen zwar weiter, obwohl die Wandkonstruktionen sich an dem Brand beteiligen, aber vergleichsweise nur noch langsam. Am Ende ergibt sich in der 150. Minute ein Temperaturprofil über die Höhe des Brandraumes von 250 °C bis ca. 500 °C. In der 151. Minute muss der Löschangriff aus Sicherheitsgründen durchgeführt und der Versuch damit beendet werden. Am Ende waren die mobilen Brandlasten zu sehr großen Anteilen aufgebraucht, die Brandschutzbekleidungen hatten alle versagt und die Wandkonstruktionen haben sich entsprechend am Brand beteiligt. Die Decke war in der Fläche selbst verloschen, aber am Rand, wo durch die verbleibenden Überreste der mobilen Brandlast und dem brennenden Ständerwerk der Wände Flammen bis an die Decke bilden konnten, kam es zum Wiederentzünden der Decke. All diese Effekte sorgten für die ausgedehnte Abkühlphase im Versuch.

Versuch V4:

Der letzte Versuch in dieser Versuchsserie ist wiederum ein Gebäude mit großer Grundfläche, wie es bereits im V3 der Fall war. Von den Brandraumeigenschaften besitzt dieser Versuch den größten prozentualen Anteil an sichtbarer Holzoberfläche (58 %) in der gesamten Versuchsserie. Vom Versuchsaufbau war es vorgesehen die Brandentwicklung 60 Minuten zu beobachten und dann den Löschangriff durch die Feuerwehr einzuleiten, was in der Abbildung 240 am plötzlichen Sinken der Brandraumtemperaturen in der 65. Minute zu erkennen ist. Hintergrund für diese Vorgehensweise war es, die Einsatzkräfte mit einem Szenario zu konfrontieren, bei dem die Brandentwicklung noch intensiv ausgeprägt war. Entsprechend sahen sich die Einsatzkräfte einem Vollbrandszenario mit Brandraumtemperaturen im Bereich von 1.000 °C und höher gegenüber. Damit wurde dem Löschangriff in diesem Versuch eine höhere Bedeutung zugeteilt, als es in den anderen vorangegangenen Versuchen der Fall war.



Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entwickelt sich zum Beginn wie der im Versuch V3. Ein sehr schneller Temperaturanstieg bis ca. 900 °C bei ca. 12 min Versuchsdauer. Der darauffolgende Temperaturanstieg bis auf 1.200 °C fällt wiederum deutlich geringer aus und erstreckt sich bis zur 50. Minute. Dieses Temperaturniveau bleibt bis zum Löschangriff bestehen. Damit ist auch in diesem Versuch unter den gegebenen Randbedingungen ein Einfluss der sichtbaren Holzoberflächen nicht erkennbar. Der Beginn einer Abkühlphase kann in diesem Versuch ansatzweise in der 60. Minute vermutet werden, denn danach folgt bereits der Löschangriff.

Zusammenfassend können bei der Betrachtung der Temperatur-Zeit-Verläufe folgende Ergebnisse festgehalten werden. Der Anteil an sichtbaren Holzoberflächen hat in diesen Versuchen keinen messbaren Einfluss auf die Verläufe der Brandraumtemperaturen in der Aufheizphase. Bei allen Versuchen waren die höchsten Temperaturen im Bereich der 1.200 °C. Die Ausbreitung des Feuers im Raum ist bei allen Versuchen ähnlich schnell verlaufen, lediglich die Erhöhung der Raumgröße hatte einen geringen, aber erkennbaren Einfluss. Grund für dieses Verhalten in der Brandentwicklung im Raum ist die sehr hohe mobile Brandlastdichte, die für diese Versuche gewählt worden ist. Damit ein Einfluss der zusätzlichen brennbaren Oberflächen zum Tragen kommt, wären mehr Sauerstoff bzw. eine größere Öffnungsfläche erforderlich gewesen.

Bei der Abkühlphase der Brandversuche ist hingegen ein deutlicher Einfluss der sichtbaren Holzoberflächen, besonders, wenn die Brandschutzbekleidungen versagen, erkennbar. Die dadurch zusätzlich vorhandenen Brandlasten tragen dazu bei, dass die Abkühlphase länger anhält, die Brandraumtemperaturen also langsamer sinken oder sogar leicht ansteigen.

Wärmefreisetzungsrate

Die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate aus den Messdaten des Massenverlustes erfolgte über die Ermittlung der Massenverlustrate sowie unter Annahme eines Heizwertes von 17,28 MJ/kg 1, einer Holzfeuchte von 14 M.-% und einer Verbrennungseffektivität von 0,9. Aufgrund der stark oszillierenden Messdaten wurde zunächst ein gleitender Mittelwert über 9 Messzyklen (Aufzeichnungsfrequenz 1 s) gebildet. Anschließend folgte für die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate eine Verwendung der Messdaten im 30 s Rhythmus, wobei ein abschließender gleitender Mittelwert über fünf Messdaten (2,5 min) in Abbildung 242 und Abbildung 243 dargestellt ist.

Für die berechneten Wärmefreisetzungsraten des Bodens (mobile Brandlasten) in Abbildung 242 und des Gebäudes (strukturelle Brandlast) in Abbildung 243 zeigt sich trotz der Maßnahmen zur Glättung eine bestehende starke Oszillation. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass in den aufgezeichneten Versuchsdaten der Masse bzw. der ermittelten Massenverlusten und entsprechend auch in den dargestellten Wärmefreisetzungsraten der Dehydratationsverlust sowie das Abfallen von Bekleidungsstücken enthalten sind. Dieses führt dazu, dass die hier bereitgestellten Wärmefreisetzungsraten mit einer nicht benennbaren Unschärfe belastet sind.

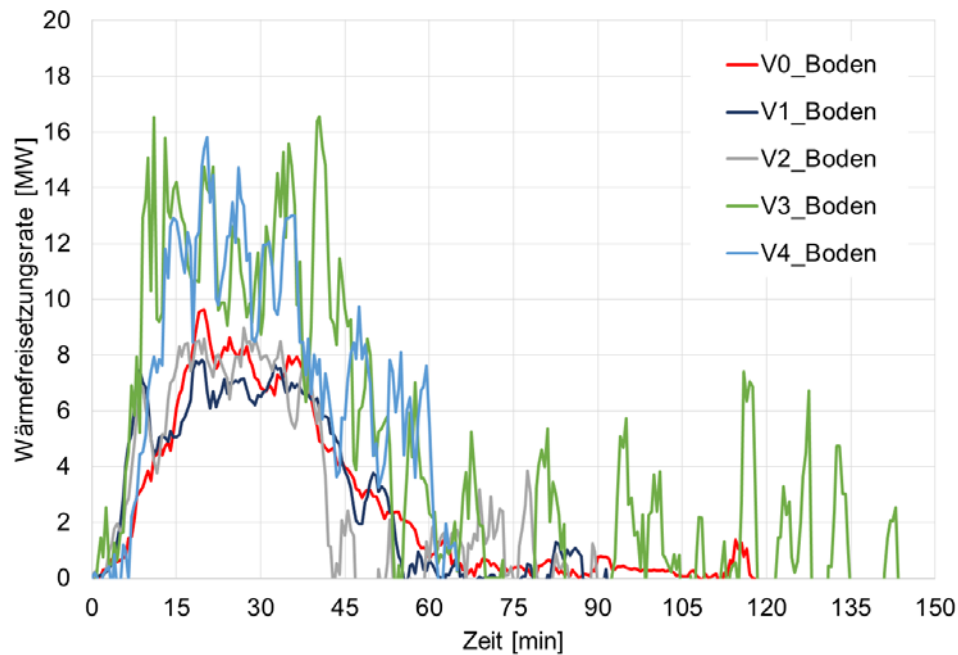


Abbildung 242: Vergleich der Wärmefreisetzungsrate der Belegversuche für den Boden (mobile Brandlast)

Für V0 lässt sich eine maximale Wärmefreisetzungsrate von ca. 8 MW ermitteln (siehe Abbildung 242). Wie schon an den Brandraumtemperaturen beschrieben, begann die stationäre Brandphase ab der 16. Versuchsminute und geht in der 40. Versuchsminute in die Abkühlphase über. Bei den Versuchen V0 bis V2, welche gleichbleibende Randbedingungen bzgl. mobiler Brandlastdichte und Ventilationsbedingung besaßen, ist ein weitestgehend gleicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate zu erkennen. Lediglich der Beginn der stationären Brandphase erfolgte etwas früher, aufgrund der vorhandenen ungeschützten Holzflächen in V1 und V2 zur 8. Versuchsminute mit dem Eintritt eines Flashovers.

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

Eine Aussage zu den berechneten Wärmefreisetzungsrate für die strukturellen Brandlasten (Gebäude) stellt eine deutlich größere Herausforderung dar, wie Abbildung 243 zeigt. Für V0 ergab sich durch die vollständig geschützte Ausführung keine zusätzliche Wärmefreisetzungsrate aus der strukturellen Brandlast. In V1 ist vom Brandübersprung auf die ungeschützte Decke (8. Versuchsminute) bis zum Versagen der einlagigen Brandschutzbekleidung der Wände ab 30. Versuchsminute die Wärmefreisetzungsrate der Decke erkennbar. Anschließend beteiligten sich auch die Umfassungswände am Brandgeschehen bis zum Versuchsabbruch in der 93. Minute. Einen äquivalenten Verlauf hierzu weist die Wärmefreisetzungsrate von V2 auf, da das Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Holzbauteilen vergleichbar war.

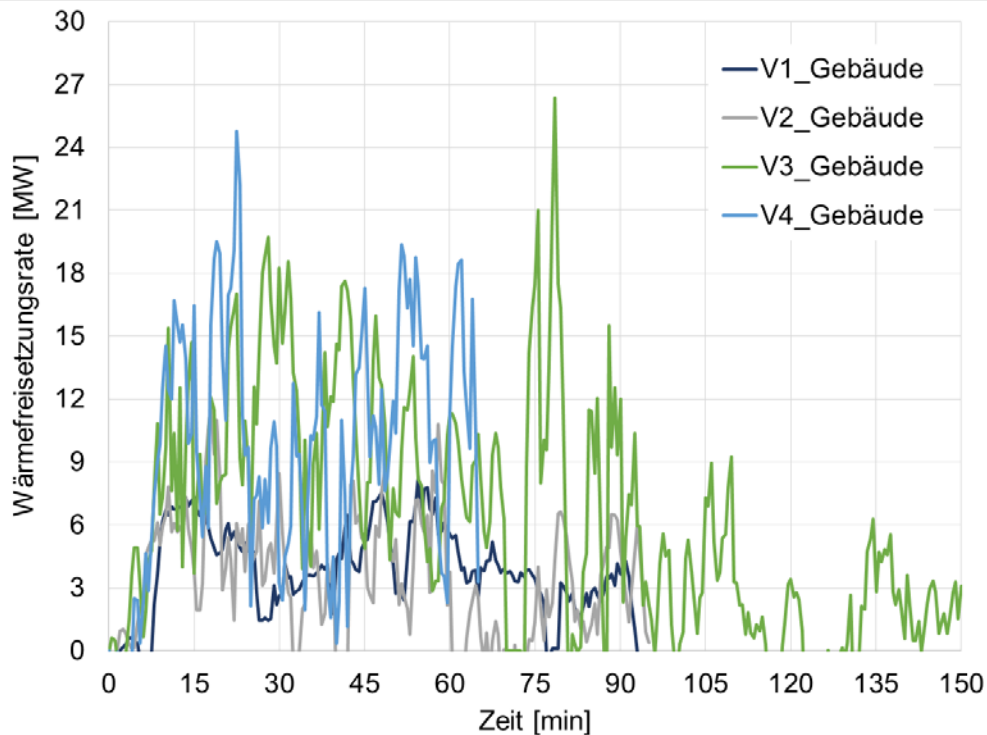


Abbildung 243: Vergleich der Wärmefreisetzungsraten der Belegversuche für das Gebäude (strukturelle Brandlast)

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

Fassadentemperatur

Aufgrund der stark oszillierenden Messdaten der Mantelthermoelemente vor der Fassade, durch die aus der Öffnung schlagenden Flammen sowie den Wettereinflüssen der Freibrandversuche, wurde eine Glättung mittels gleitendem Mittelwert über 30 s vorgenommen. Die in Abbildung 244 und Abbildung 246 dargestellten Temperaturen vor der Fassade beziehen sich auf eine vertikale Messachse mittig der Öffnung. Von den über die Höhe verteilten Thermoelementen werden hier nur die Messdaten in 0,5 m, 3,0 m und 5,0 m oberhalb der Brandraumöffnung (Sturz) betrachtet.

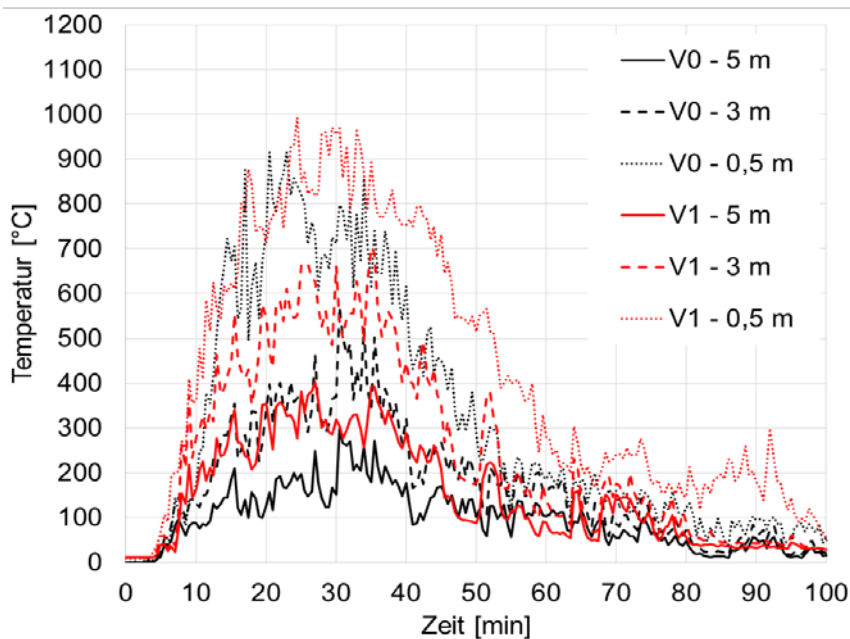


Abbildung 244: Vergleich der Temperaturen vor der Fassade der Versuche V0 und V1 in verschiedenen Höhen



Abbildung 245: Aufnahmen während der Versuchsdurchführung (stationäre Brandphase) von V0 (links) und V1 (rechts)

Aus Abbildung 244 lässt sich der zusätzliche Beitrag der strukturellen Brandlast auf die Temperaturentwicklung vor der Fassade ablesen. Für den vollständig geschützten Versuch V0 wurden geringere Temperaturen in 0,5 m ($\Delta T \approx 100$ K) und 3,0 m ($\Delta T \approx 200$ K) Höhe gemessen, vergleichend zu Versuch V1, welcher eine ungeschützte Decke zu Brandbeginn vorwies. An der Messstelle in 5,0 m Höhe zeigte sich der Einfluss der strukturellen Brandlast erst ab dem Versagen der Brandschutzbekleidung (1 x 18 mm GF) der Wände zur 35. Versuchsminute.

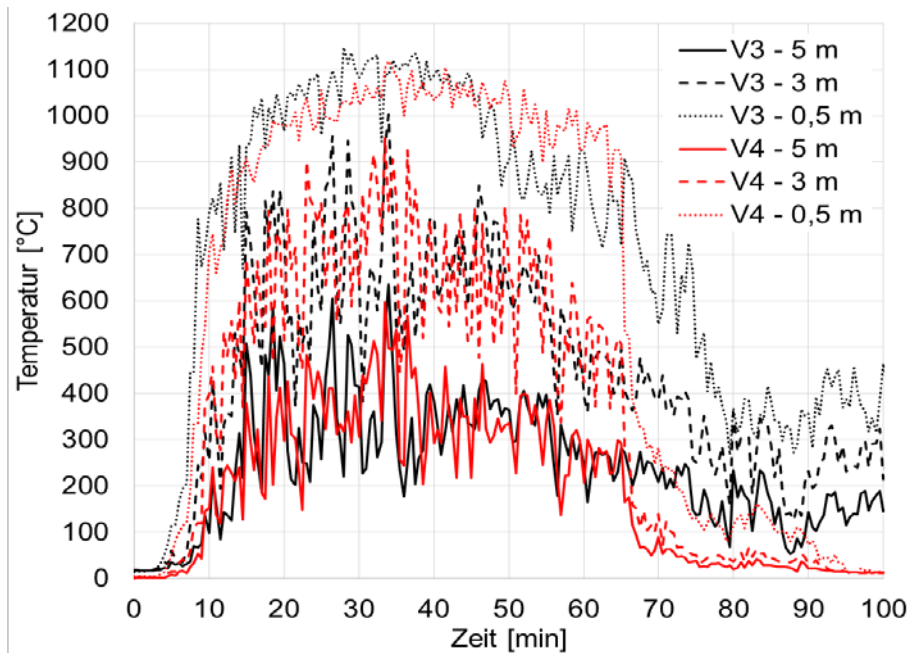


Abbildung 246: Vergleich der Temperaturen vor der Fassade der Versuche V3 und V4 in verschiedenen Höhen

Eine visuelle Gegenüberstellung der aus der Öffnung schlagenden Flammen der Versuche V0 und V1 ist in Abbildung 245 ersichtlich. Ein signifikanter Unterschied der Flammenlängen auf der Fassade lässt sich nicht feststellen.

Die Gegenüberstellung der Temperaturen vor der Fassade in Abbildung 246 zeigt, dass bei unterschiedlichem Verhältnis von ungeschützten zu geschützten Holzbauteilen (V3 → 42 % und V4 → 58 %) sich bei den gleichen Ventilationsverhältnissen von $O=0,094 \text{ m}^{0,5}$ in diesen Messwerten kein merklicher Unterschied einstellt.

Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung der Brandräume und an der Fassade:

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung und an der Fassade erfolgten durch bidirektionale Sonden, die es ermöglichen, den Differenzdruck, verursacht durch eine Strömungsbewegung, an der Sonde, zu messen und entsprechend eine richtungsabhängige Strömungsgeschwindigkeit berechnen. Leider sind die bidirektionalen Sonden anfällig für die Witterungsverhältnisse, bei denen die Versuche stattfanden. Entsprechend hat sich während der Versuche und bei der nachfolgenden Auswertung gezeigt, dass trotz größter Anstrengungen einige der Sonden ausgefallen sind und entsprechend hier keine Daten erhoben werden konnten. Dies betrifft besonders den Versuch V3 sowie die rechte Seite in der Öffnung des Versuches V2 und andere Positionen. Die nachfolgende Auswertung zeigt die Ergebnisse der erfassten Messdaten.

Strömungsgeschwindigkeiten in der Brandraumöffnung:

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten in und aus dem Brandraum wurde auf beiden Seiten in 60 cm Abstand vom Rand der Brandraumöffnung durchgeführt. Die Vorzeichendefinition der Geschwindigkeiten im Eingang ist in der Abbildung 247 dargestellt. Die Auswertung erfolgt durch den Vergleich der Geschwindigkeitsprofile in der Öffnung zur 12. Minute, weil zu diesem Zeitpunkt der anfänglich schnelle Temperaturanstieg in den Brandräumen bis 900 °C bzw. 1.000 °C abgeschlossen und danach nur noch leichte Änderungen im Temperaturverlauf zu registrieren sind. Als zweiten Wert für den Vergleich zwischen den Versuchen wird das Ende des Temperaturanstieges kurz vor Beginn der Abkühlphase bei der 40. Minute nach Zündung herangezogen. In allen Versuchen wurde zu diesem Zeitpunkt das höchste Temperaturniveau erreicht und entsprechend intensiv sollten die Strömungsprofile ausfallen. Die Profile sind in der Abbildung 248 dargestellt.

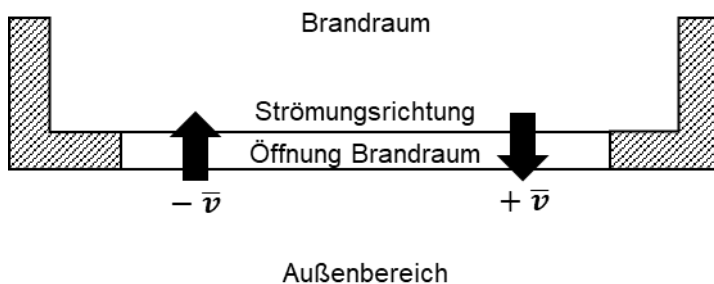


Abbildung 247: Vorzeichendefinition der Geschwindigkeiten für die Strömungsrichtung in der Öffnung der Brandräume

Die Strömungsprofile von V0 und V1 sind sich im direkten Vergleich sehr ähnlich. Der Vergleich der Geschwindigkeitsprofile zwischen den dargestellten Messdaten der einzelnen Versuche in Abbildung 248 zeigt anschaulich, dass sich hingegen die Strömungsprofile zwischen der linken und rechten Seite der Öffnung unterschiedlich ausbilden. Dies gilt sowohl in der 12., wie auch in der 40. Minute des Versuches. Auffällig ist, dass die Höhe, bei dem das Strömungsprofil von ausströmenden Rauchgasen ($+ \bar{v}$) zu einströmender Luft ($- \bar{v}$) wechselt, auf den beiden Seiten des Einganges der Versuche V0 und V1 unterschiedlich ausfällt. Auf der linken Seite der Öffnung in den Versuchen V0, V1 und V2 bei der 12. Minute nach Zündung liegt dieser Punkt bei ca. 50 cm Höhe. Auf der rechten Seite der Öffnung befindet sich dieser Punkt in einer Höhe von ca. 100 cm. Gleiches Bild ergibt sich auch in der 40. Versuchsmi-nute. Ursache hierfür sollte der Beginn der Zündung auf der linken Seite des Brandraumes sein. Da die Zündung auf dieser Seite erfolgt, ist die Brandentwicklung dort auch am weitesten fortgeschritten und entsprechend fallen mehr Rauchgase als auf der rechten Seite an. Somit wird die erforderliche Luft für die Verbrennung zu einem kleinen Teil über die linke Seite der Öffnung realisiert. Der restliche und weitaus größere Anteil an Luft für die Verbrennung erfolgt über die rechte Seite, da dort der Umschlags-punkt bei 100 cm Höhe liegt und die Strömungsgeschwindigkeiten mit ca. 1 – 2 m/s ähnlich hoch wie auf der rechten Seite ausfallen.

Die dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung des Brandraumes V4 weisen diesen Un-ter-schied in der Höhe des Umschlagpunktes von einströmenden zu ausströmenden Fluid nicht auf. In allen vier dargestellten Diagrammen liegt dieser bei ca. 100 cm Höhe. Eine Auffälligkeit stellt der sehr hohe Unterschied der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen linker (ca. $\bar{v} = 6 \text{ m/s}$) und rechten Seite (ca. $\bar{v} = 15 \text{ m/s}$) nach 40 Minuten Branddauer da. Ursache hierfür könnte die sichtbar ausgeführte Wand auf der rechten Seite sein, die sich an dem Brand mit beteiligt und somit mehr Rauch- Pyrolyse-gas auf dieser Seite freigesetzt wird.

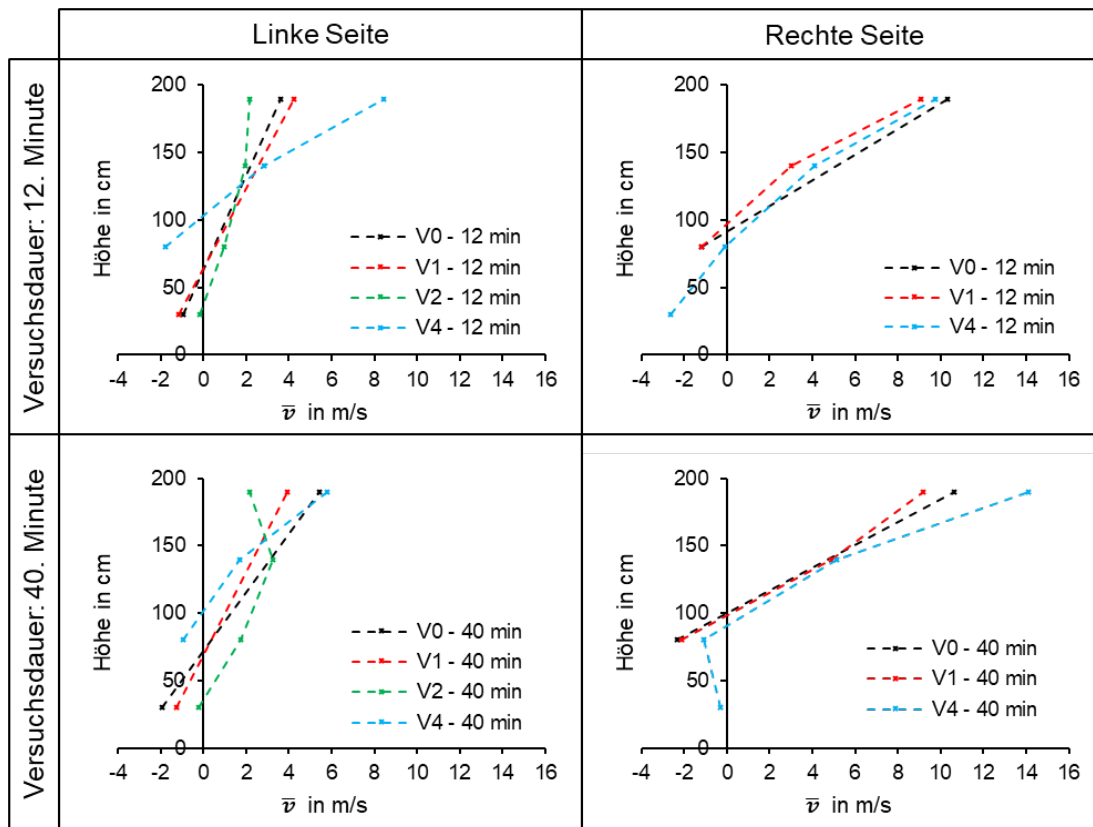


Abbildung 248: Linkes und rechtes Profil der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung der Brandräume bei der 12. und 40. Minute Versuchsdauer

Die Geschwindigkeitsprofile in den Öffnungen zeigen, dass in den Versuchen mit der 4,5 m x 4,5 m großen Grundfläche das Strömungsprofil zwischen rechter und linker Seite der Öffnung unterschiedlich ausfällt. Die Position der Zündung hat somit scheinbar einen Einfluss auf die Ventilationsverhältnisse. Anders sieht es bei dem Versuch V4 aus, dessen Grundfläche doppelt so breit wie bei den Versuchen V0, V1 sowie V2 ist und dementsprechend auch eine größere Öffnung besitzt. Hier sind die Geschwindigkeitsprofile an den Rändern der Öffnung auf beiden Seiten bezüglich der Höhe des Umschlagpunktes gleich. Auffällig ist, dass die sichtbare Holzwand auf der rechten Seite des Brandraumes im Versuch V4 einen Einfluss auf das Strömungsprofil in Form von deutlich mehr austretenden Rauchgasmenge hat, da die Geschwindigkeit in der 40. Minute im oberen Bereich sehr hoch ausfällt. Ansonsten sind im direkten Vergleich der Strömungsprofile zwischen V0 und V1, bei denen die Öffnung und Brandlasten gleich waren, keine nennenswerten Unterschiede feststellbar, was anhand der ähnlichen Brandraumtemperaturen und dem Brandverhalten zu erwarten war.

Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassade

Die Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassade eines jeden Versuches wurden mittig über der Brandraumöffnung in zwei Höhen gemessen. Die erste Messstelle befand sich 1 m über der Brandraumöffnung, die zweite Messstelle wurde in 2 m Höhe platziert. Für beide Messpositionen sind die Strömungsgeschwindigkeiten über die Versuchszeiten für V0, V1 und V2 in Abbildung 249 (1 m) und Abbildung 250 (2 m) dargestellt. In beiden Diagrammen sind Schwankungen in den Messwerten zu verzeichnen, welche die Folge von leichten Windbewegungen sind, die besonders an der Fassade einen hohen Einfluss auf die Messwerte hatten. Der Vergleich der Daten in 1 m Höhe zwischen den Versuchen V0 und V2 zeigt einen ähnlichen Verlauf. Bei V2 fallen an der 1 m Messposition sogar die Strömungsgeschwindigkeiten etwas geringer aus als beim Referenzversuch V0, wohingegen in der 2 m Messposition die Strömungsgeschwindigkeiten bei V2 gegenüber V0 im Bereich des Vollbrandes und der Abkühlphase höher ausfallen. Die Ursache hierfür ist in der längeren und intensiveren Brandentwicklung in der Abkühlphase aufgrund der sich am Brand beteiligenden Konstruktion zu finden. Wichtig bei der Betrachtung

tung der Daten von V2 ist der Hinweis, dass zum Ende des Versuches leichter Regen auftrat. Entsprechend ist anzunehmen, dass die dargestellten Geschwindigkeiten von V2 unter gleichen Versuchsbedingungen wie bei V0 zum Ende des Versuches tendenziell größer ausgefallen wären.

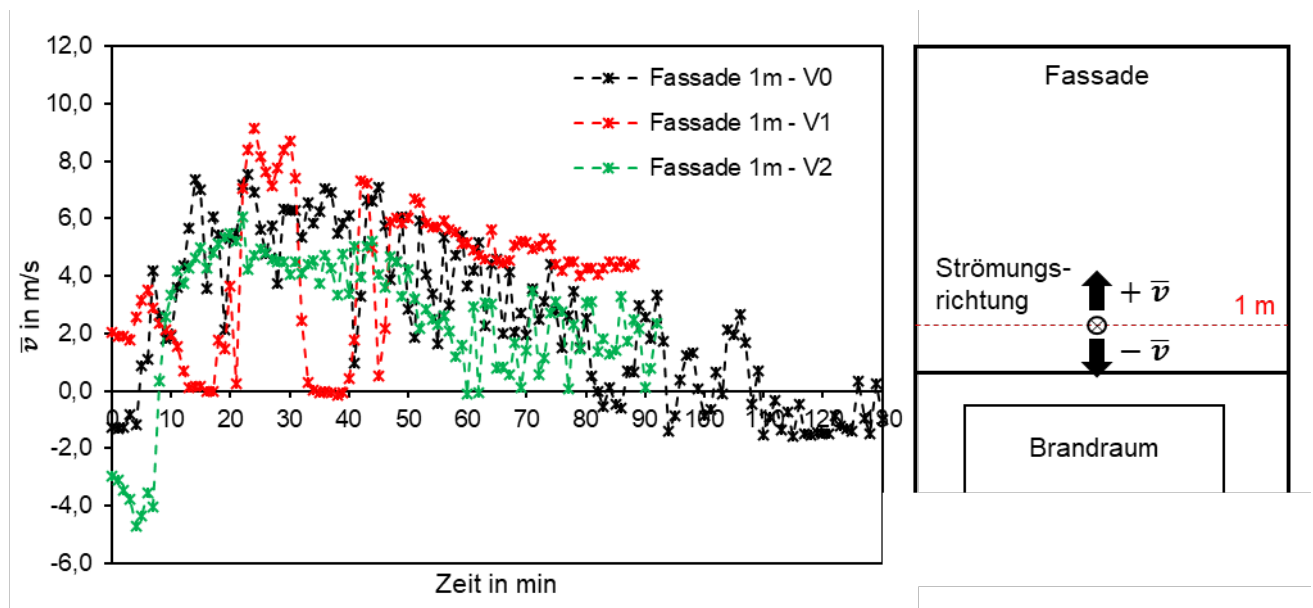


Abbildung 249: Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassade in 1 m Höhe über der Brandraumöffnung für V0 / V1 / V2 (links) und Darstellung der Vorzeichendefinition der Geschwindigkeit für die Strömungsrichtung (rechts)

Die Daten von V1 sind leider aufgrund der auftretenden Schwankungen teilweise schwierig zu deuten. Dennoch lassen sich im direkten Vergleich der beiden anderen Versuche stellenweise Unterschiede feststellen. Bei V1 fallen die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen der 20. Minute bis zur 40. Minute vergleichsweise sehr hoch aus, was aufgrund der sichtbar ausgeführten Decke und dem Versagen der Bekleidungen und dem damit hohen Anteil an mitbrennenden Holzoberflächen zu erwarten ist. Besonders auffällig ist in der Abbildung 249 der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit von V1 ab der 65. Minute. In den beiden anderen Versuchen V0 und V2 sinken die Strömungsgeschwindigkeiten in der Abkühlphase schnell. Bei V1 fällt dieser Trend deutlich geringer aus, teilweise befindet sich die Strömungsgeschwindigkeit auf einem gleichbleibend hohen Niveau. Auch hier ist der Effekt der versagenden Bekleidungen und der damit verbundenen Beteiligung aller Oberflächen im Brandraum am Brandgeschehen und der längeren Abkühlphase zu erklären. Gleiches, aber in geringerer Intensität, ist auch in der Abbildung 250 an der 2 m-Messposition zu erkennen.

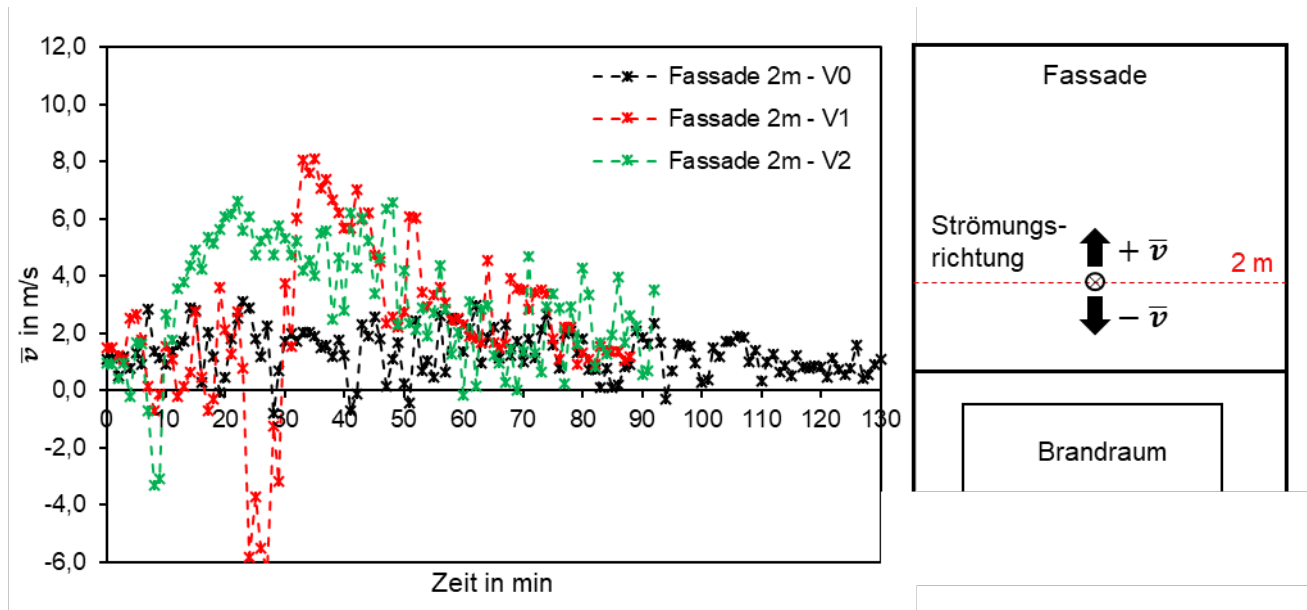


Abbildung 250: Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassade in 2 m Höhe über der Brandraumöffnung für V0 / V1 / V2 (links) und Darstellung der Vorzeichendefinition der Geschwindigkeit für die Strömungsrichtung (rechts)

Zusammenfassend deuten die höheren Strömungsgeschwindigkeiten an der 2 m Position in den Versuchen V1 und V2 auf mehr Rauchgase und möglicherweise größere Flammenlängen bei sichtbar ausgeführten Oberflächen im Brandraum hin. Ebenfalls fiel die Beanspruchung der Fassade durch das Versagen von Schutzbekleidungen im Brandraum länger aus, als es beim V0 der Fall war. Eine Auswertung der Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassade von V3 und V4 war leider aufgrund fehlender Daten durch defekte Messtechnik nicht möglich.

Bauteiltemperaturen

Für die Analyse der Bauteiltemperaturen wird sich nachfolgend auf die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Trägerkonstruktion beschränkt. In Abbildung 251 ist die Position der Thermoelemente vom Typ K in der Bauteilfläche schematisch dargestellt, welche während der Vorfertigung montiert wurden. Die kurzen Wände (4,5 m Länge) waren mit zwei Achsen und die langen Wände (9,0 m Länge) mit vier Achsen ausgestattet, wobei jeweils vier über die Höhe verteilte Thermoelemente positioniert waren. Analog zur langen Wand besaß auch die Decke vier Achsen mit jeweils vier über die Länge verteilte Thermoelemente. Für die Wand 04, welche die Öffnung beinhaltet, wurden unabhängig der Wandlänge nur zwei Achsen installiert. Die Lage der Achsen bei den Holztafelbauteilen war so gewählt, dass diese entweder in der Mitte eines Gefaches oder auf einem Ständer verliefen.

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

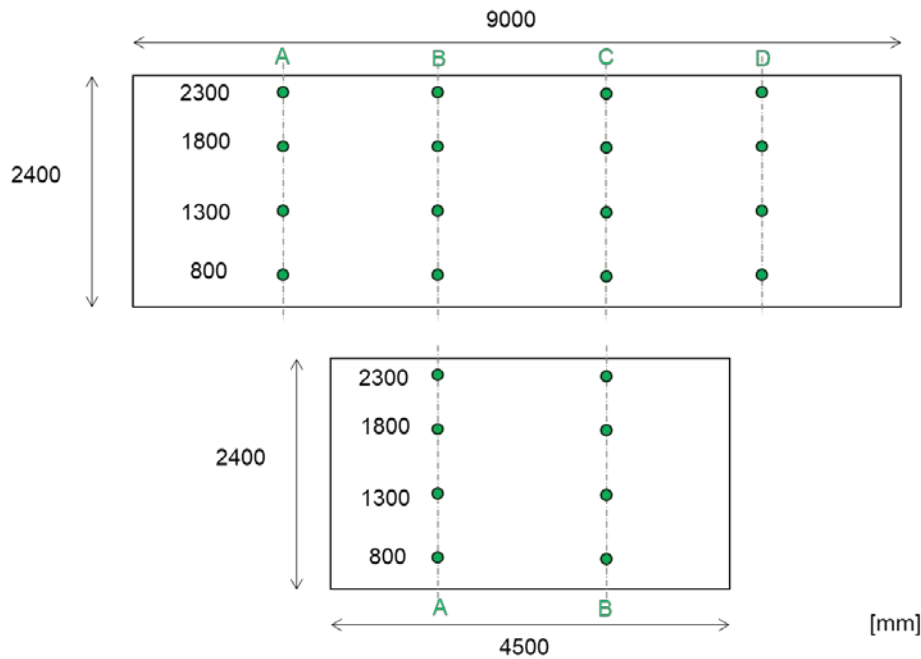


Abbildung 251: Schematische Darstellung der Temperaturmesspunkte in den Wänden

Abbildung 252 zeigt die Temperaturentwicklung hinter den 2 x 25 mm dicken Gipskarton-Feuerschutzplatten für V0. Anhand der geringen Temperatur in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion ($T_{\max} < 120 \text{ °C}$) ist die vollständig geschützte Ausführung erkennbar. Entsprechend zeigt Abbildung 253 keine Verfärbungen oder Verkohlungen der freigelegten Massivholzflächen.

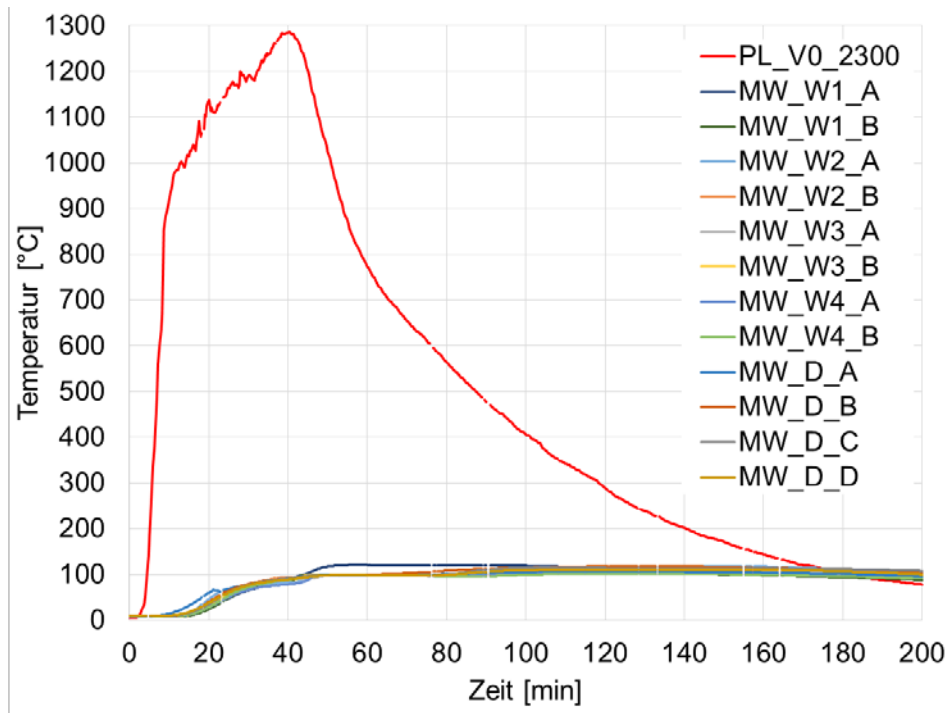


Abbildung 252: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion für V0



Abbildung 253: 360° Drohnenaufnahme der Massivholzoberfläche nach Demontage der Brandschutzbekleidung für V0

Die Schutzwirkung der Brandschutzbekleidung für die Massivholzwände bestehend aus 1 x 18 mm GF ist in Abbildung 254 ersichtlich. Wie zu erwarten, erfolgte ein Versagen der Brandschutzbekleidung und das anschließende Mitbrennen der anfänglich geschützten Massivholzwände ab der 35. Versuchsminute. Der Verlauf in der Abkühlphase zeigt, dass aufgrund des Mitbrennens der strukturellen Brandlast ein Absinken der Brandraumtemperaturen verhindert wurde, keine Anzeichen für ein Selbstverlöschen erkennbar waren und damit der Versuchsabbruch zu begründen war.

Wie aus Abbildung 254 zu entnehmen, und in Abbildung 241 verdeutlicht, zeigte sich hier kein signifikanter Anstieg der Brandraumtemperaturen aufgrund des Mitbrennens der anfänglich geschützten Wände ab der 35. Versuchsminute. Der zusätzliche Beitrag aus der strukturellen Brandlast lässt sich erst ab der 40. Versuchsminute sowie in der Abkühlphase bzw. im Nachbrandverhalten erkennen.

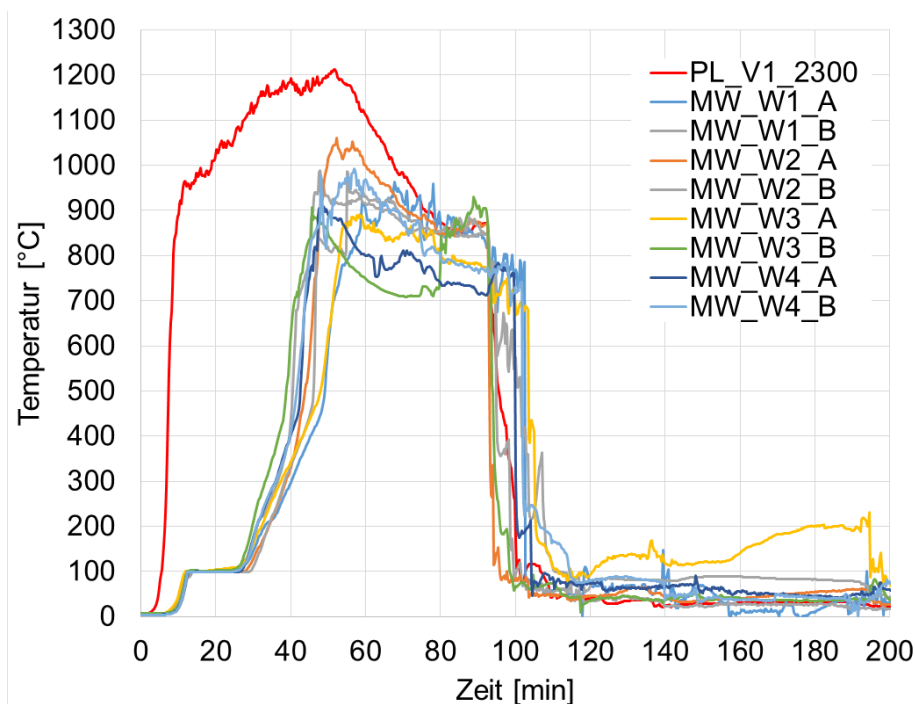


Abbildung 254: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion für V1

Ab der 93. Versuchsminute begannen die Löschmaßnahmen der Feuerwehr. Für den Löschangriff wurde in allen Versuchen ein klassisches C-Hohlstrahlrohr und als Löschmittel standardmäßig Wasser mit 1 % Netzmittel verwendet. Die Gesamtmenge an Löschmittel betrug in diesem Versuch ca. 1.800 l für den Löschangriff inklusive der Nachlöscharbeiten.

Nach Demontage der Bekleidungsreste konnte das in Abbildung 255 ersichtliche Verkohlungsbild der Bauteile festgestellt werden. Die Abbrandtiefe im ungestörten Bereich der ausgekühlten Wandbauteile betrug durchschnittlich 35 mm und für die ungeschützte Decke 80 mm.



Abbildung 255: 360° Drohnenaufnahme der Massivholzoberfläche nach Demontage der Brandschutzbekleidung für V1

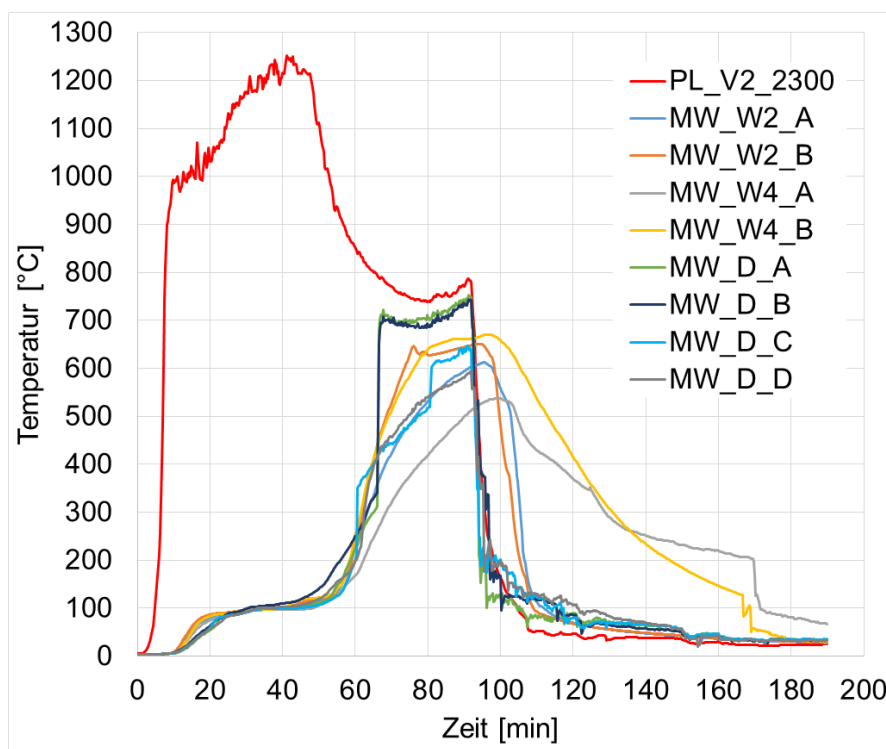


Abbildung 256: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V2

Die Entwicklung der Temperaturen in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für den Versuch V2 ist in Abbildung 256 dargestellt. Die Brandschutzbekleidung der Decke und zweier Wände bestanden aus einer Kombination von 2 x 18 mm Gipsfaserplatten. Das Versagen der Brandschutzbekleidung und ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktion ist ab der 60. Versuchsminute ersichtlich. Wie schon bei V1 führte auch in V2, zusammen mit dem Beitrag der zwei ungeschützten Bauteile, das Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktionen dazu, dass die Brandraumtemperaturen zur 80. Versuchsminute erneut ansteigen. Die zur 92. Versuchsminute beginnenden Löschmaßnahmen der Feuerwehr, welche eine Löschmittelmenge (inkl. Nachlöscharbeiten)

von ca. 1.600 l erforderten, beendeten den Versuch. Der Versuch wurde beendet, da die vorher festgelegte Begrenzung der Abbrandtiefe der ungeschützten Wände von 58 mm erreicht wurde.

Nach Abschluss der Löscharbeiten, der Demontage der Bekleidungsreste und dem Entfernen der Gefachdämmung zeigte sich das in Abbildung 257 dargestellte Verkohlungsbild. Die beim Rückbau durchschnittliche festgestellte Abbrandtiefe der ungeschützten Wände betrug 75 mm. Für das Ständerwerk der anfänglich geschützten Holztafelbauteile konnte eine Abbrandtiefe von ca. 30 mm festgestellt werden.



Abbildung 257: 360° Drohnenaufnahme der Bauteiloberflächen nach Demontage der Brandschutzbekleidung und Gefachdämmung für V2

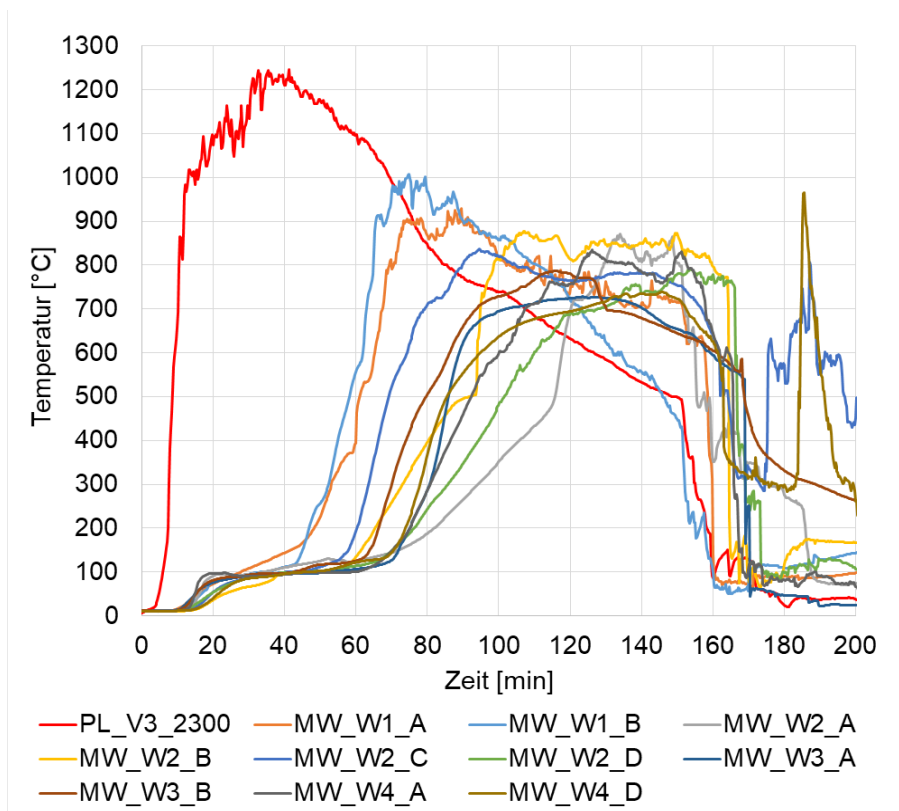


Abbildung 258: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V3

Aus Abbildung 258 ist die Temperaturentwicklung hinter der Brandschutzbekleidung der Holztafelbauteile im V3 zu entnehmen. Es gilt zu beachten, dass die Bekleidung von Wand 01 (W1) aus 2 x 12,5 mm Gipsfaserplatten mit dahinterliegender 12 mm OSB-Trägerplatte und der Wände 02 – 04 aus 2 x

18 mm Gipsfaser- bzw. Gipskarton-Feuerschutzplatten bestanden. Erwartungsgemäß erfolgte das Versagen der 2 x 12,5 mm Bekleidung bereits nach der 50. Versuchsminute, während die 2 x 18 mm Kombination erst ab der 60. Versuchsminute ein Mitbrennen der anfänglich geschützten Konstruktion zuließ. Erkennbar ist auch ein deutlich größeres Streuband innerhalb der Aufheizphase der Messdaten der 2 x 18 mm Kombinationen, welches sich im Temperaturbereich von 300 °C über einen Zeitraum von 30 Minuten erstreckt. Als Begründung hierfür ist zum einen die Lage der Achse (auf Ständer, OSB-Platte oder auf Gefachdämmung) und zum anderen durch die Lage der Stoßfugen oder Risse der Brandschutzbekleidungen zu benennen. Der Beitrag der strukturellen Brandlast aus der ungeschützten Decke und dem Anteil der anfänglich geschützten Wände zeigte sich erst in der Abkühlphase durch eine sehr langsam sinkende Brandraumtemperatur.

Der Versuchsabbruch erfolgte in der 152. Versuchsminute aufgrund der geringen verbleibenden Restquerschnitte der tragenden Konstruktion. Die ungeschützte Massivholzdecke wies zu diesem Zeitpunkt kein sichtbares Mitbrennen mehr auf. Für den Löschangriff und die Nachlöscharbeiten wurde eine Löschmittelmenge von ca. 1.500 l benötigt. Wie der Temperaturverlauf in Abbildung 258 bereits zeigt gestalteten sich die Nachlöscharbeiten durch das Mitbrennen der Holztafelbauteile (siehe Abbildung 259) etwas aufwendiger, da ein Großteil der Brandschutzbekleidung sowie die nichtbrennbare Gefachdämmung zuerst entfernt werden musste.

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



Abbildung 259: Belegversuch V3 kurz vor Beginn der Löscharbeiten

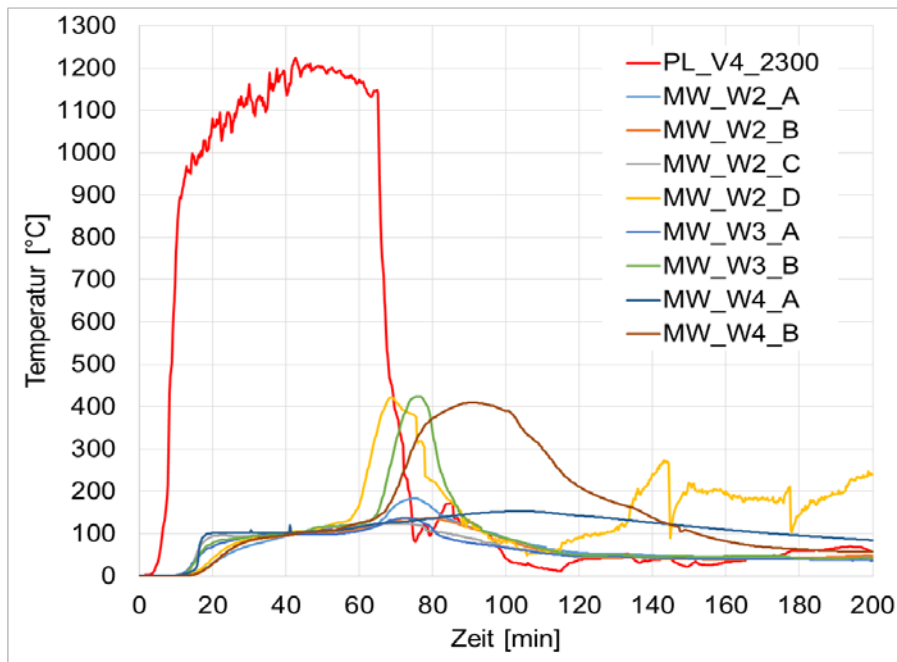


Abbildung 260: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V4

Abbildung 260 stellt die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V4 dar. Das Versagen der Schutzwirkung der Bekleidung (2 x 18 mm Gipsplatten) ist zur 60. Minute ersichtlich. Der Zeitpunkt des Versagens der Brandschutzbekleidung ist im Vorfeld für den Beginn der Löschmaßnahmen festgelegt worden. Entsprechend wiesen die anfänglich geschützten Bauteile kein Beitrag zum Brandgeschehen auf.



Abbildung 261: Versuch V4 kurz vor Beginn der Löschmaßnahmen

Für den Löschangriff wurde eine Löschmittelmenge von ca. 1.500 l verwendet, während die Nachlöscharbeiten weitere 2.000 l benötigten. Ein zusätzlicher Grund für den großen Löschmittelbedarf war, neben der hohen Brandraumtemperatur, die erschwerte Löscharbeit der Holzrippen, welche zu diesem Zeitpunkt erst zu ca. 70 % umgesetzt waren. Abbildung 261 zeigt den Brandraum von Versuch V4 kurz vor Beginn der Löschmaßnahmen, wobei die verbleibende Restmenge der Holzrippen sichtbar ist.

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

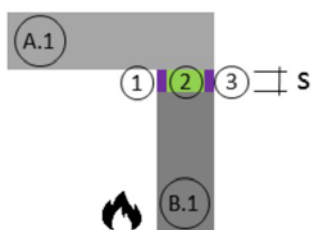
Anschlüsse und Fügungen

Im Holzbau gehören die Konstruktion und Ausführungen von Bauteilanschlüssen sowie Elementfügungen zu den bauphysikalischen Herausforderungen. Fehlerhafte Bauteilanschlüsse oder Elementfügungen können die Wirksamkeit hinsichtlich des Wärme-, Feucht-, Brand- und Schallschutzes der angeschlossenen Bauteile, wie z. B. Decken oder Wände, erheblich negativ beeinflussen. Besonders bei hochwertigen Bauteilen, die sehr gute Leistungseigenschaften in diesen Bereichen aufweisen, ist der Einfluss von Fehlstellen wesentlich ausschlaggebender. Die Vorfertigung von Holzbauteilen wurde in den letzten Jahren immer mehr zum Standard bei dem mehrgeschossigen Holzbau, dadurch sind auch die verbauten Holzbauteile durchschnittlich hochwertiger geworden und dementsprechend ist die Relevanz einer guten Konstruktion und Ausführung von Bauteilanschlüssen sowie Elementfügungen gestiegen.

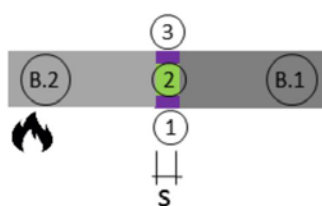
Bereits in anderen Forschungsvorhaben, wie z.B. bei dataholz.de [255], pr-EN 1995-1-2, E DIN 4102 4/A1 und Belegversuche [256] oder HolzbauRLBW [258], und fachspezifischen Veröffentlichungen, wie z.B. in [65] oder [257], ist die brandschutztechnische Konstruktion und Ausführung von Bauteilanschlüssen und Elementfügungen im Holzbau betrachtet worden. In der Baupraxis kommt es bei Bauteilanschlüssen und Elementfügungen immer wieder zu Veränderungen und Anpassungen an die spezifischen Gegebenheiten, daher existiert eine große Varianz an bautypischen Detailpunkten im Holzbau. Durch [65] wurde eine Systematik eingeführt, die bei der Differenzierung der brandschutztechnischen Maßnahmen hilft. Wie in Abbildung 262 dargestellt, werden die brandschutztechnisch möglichen Maßnahmen im Bereich der Bauteilanschlüsse und Elementfügungen nach ihren drei möglichen Positionen innerhalb der Fügung sortiert.

Diese Systematik und damit verbundenen Erkenntnisse zur Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen dient bei der Konstruktion und Ausführung der Bauteilfügungen für die Realbrandversuche in Garching als Grundlage. Bei den ausgeführten Bauteilanschlüssen und Elementfügungen der Realbrandversuche werden die verschiedenen brandschutztechnischen Maßnahmen kombiniert, damit die Wirkung auch unter Realbrandbeanspruchung dargelegt wird, weil die bisherigen Erkenntnisse nur unter Normbrandbeanspruchung der Einheits-Temperaturzeitkurve erhoben sind.

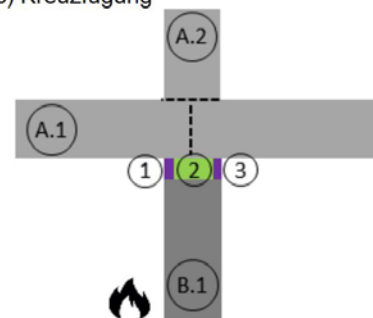
a) Fügung Ecke



b) Fügung in der Ebene



c) Kreuzfügung



- | | | | |
|---|---|---------|------------------------------------|
| 1 | Maßnahme auf der brandzugewandten Seite | A1 / A2 | raumabschließendes Bauteil/Element |
| 2 | Maßnahme in der Fuge | B1 / B2 | raumabschließendes Bauteil/Element |
| 3 | Maßnahme auf der brandabgewandten Seite | | |

Abbildung 262: Systematik zur konstruktiven Ausführung von Anschlüssen für Element- und Bauteilfügungen nach [65]

Bei der Durchführung der Realbrandversuche in Garching konnte ein Versagen der handwerklich einwandfrei ausgeführten Bauteilanschlüsse und Elementfügungen während der Versuchsdauer nicht beobachtet werden. Grundsätzlich lässt sich bisher sagen, dass die bisherigen Erkenntnisse aus den vorherigen Forschungen auch unter der Realbrandbeanspruchung bei den Versuchen in Garching nicht zu revidieren sind. Auf die richtige Ausführung ist während der Bauphase besonders zu achten.

Zusammenfassung

Die abschließenden Realbrandversuche dienen als „Beleg“ der innerhalb des Forschungsvorhabens TIMpuls gewonnenen Erkenntnisse für mehrgeschossige Holzgebäude. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Labor-, Klein- und Großbrandversuchen sollen diese Realbrandversuche - im Vorhaben Belegversuche genannt - zum Ende des Vorhabens die Ergebnisse abschließend unter realen Randbedingungen und natürlichen Brandlasten nachweisen. Dabei werden bautypische, im mehrgeschossigen Holzbau übliche Kombinationen aus verschiedenen Konstruktionsformen (z.B. Brettspertholz, Brett-schichtholz und Holztafelbau) berücksichtigt. Es werden sowohl Decken und Wände mit bekleideten als auch mit sichtbaren Holzoberflächen berücksichtigt. Die Versuche sollen für alle Interessenvertreter/innen ein klareres Bild liefern, wie sich die gesamte Holzkonstruktion im Brandfall und während des Löschvorgangs durch die Feuerwehr unter realen Bedingungen verhält. Mit den gewonnenen Erkenntnissen soll die bauordnungsrechtliche Öffnung der Gebäudeklasse 4 und 5 für den mehrgeschossigen Holzbau bekräftigt werden. Bezogen auf die sehr hoch angesetzte mobile Brandlast sind diese Versuche zum aktuellen Zeitpunkt einzigartig.

- Unter Berücksichtigung des hier gewählten „kritischen Falls“ (große Öffnung, hohe Brandlast) lässt sich in der Aufheizphase kein signifikanter Einfluss des Baustoffes Holz auf die Brandentwicklung erkennen, vgl. Abbildung 263. Bei der Abkühlphase der Brandversuche ist hingegen ein deutlicher Einfluss der sichtbaren Holzoberflächen erkennbar. Die zusätzlich vorhandenen Brandlasten führt zu einer Verlängerung der Abkühlphase.

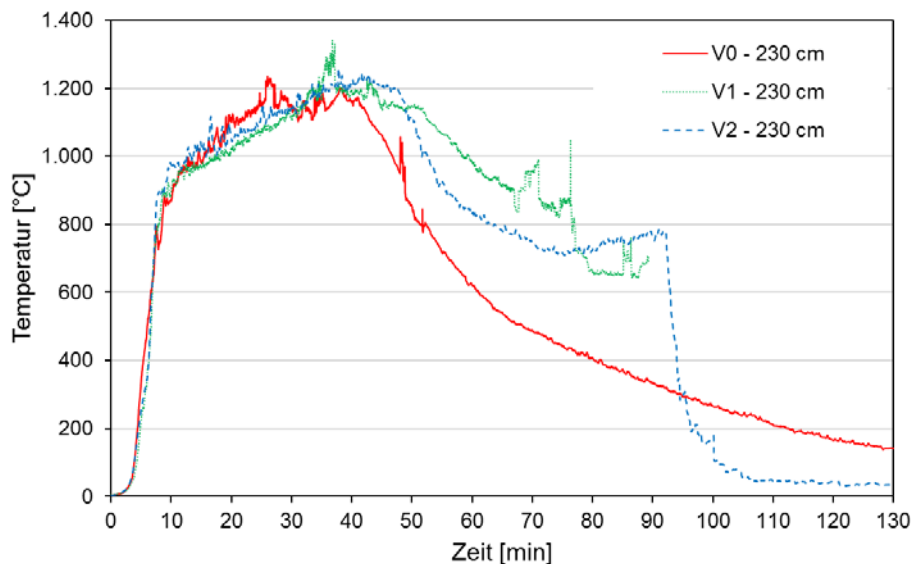


Abbildung 263: Vergleich Temperatur-Zeit-Verläufe V0, V1, V2 im Brandraum in 230 cm Höhe (Mittelwert)

- Das Vorhandensein zusätzlicher immobilier Brandlast führt bei einem Brand zu einer zusätzlichen Einwirkung auf die Fassade. Diese ist nach aktuellem Stand der Auswertung bei großen Öffnungen und hoher mobiler Brandlast nicht stark ausgeprägt. Hier sind jedoch weitere Auswertungen und Betrachtungen vor einer finalen Aussage notwendig, vgl. Abbildung 264.

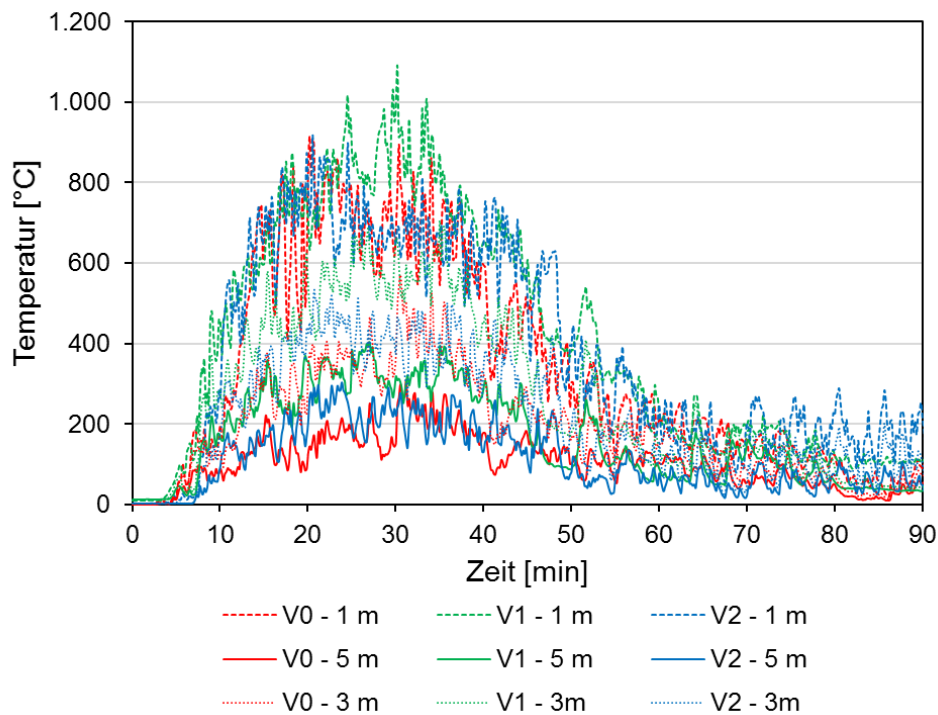


Abbildung 264: Vergleich der Temperatur-Zeit-Verläufe in der Mitte des Fassadenschildes in den Höhe 1 m und 5 m über die Brandraumöffnung für die Versuche V0, V1, V2

- Die technischen Löscharbeiten waren bei allen Versuchen und Konstruktionen zielführend und ohne besondere Maßnahmen oder erweiterten Technikeinsatz möglich.
- Die Stoß- und Fügungsbereiche von Bauteilen und Elementen mit Ausnahme der bewusst mit Fehlstellen versehenen Bereichen erzielten unter Naturbrandbeanspruchung raumabschließende Wirkung und verhinderten eine Übertragung von Feuer und Rauch wirkungsvoll.

3.1.3 Arbeitspaket 3 Nachbrand und Löschverhalten

3.1.3.1 Recherche zum Selbstverlöschten internationaler Großbrandversuche mit Holzbauweisen

Im Abschnitt „Arbeitspaket 2 Brandversuche und numerische Untersuchungen“, wurden die Brandversuche im Forschungsvorhaben TIMpuls umfangreich dokumentiert und das jeweilige Nachbrand- und Löschverhalten beschrieben. In Tabelle 38 folgt die Darstellung internationaler Großbrandversuche. Die orientierende Kurzbezeichnung in der linken Spalte 1 sind an die Übersicht aus [73] angelehnt.

Tabelle 38: Übersicht internationaler Großbrandversuche und Feststellung des Selbstverlöschens von Bränden in Räumen in Holzbauweisen

	Autorenreferenz	Anzahl Versuche	Jahr	Selbstverlöschten der Bauteile
A	Lennon [271]	1	1999	-
B	Hakkarainen [272]	4	2001	(keine Bauteiltemperaturen)
C	Frangi & Fontana [220]	6	2005	(keine Bauteiltemperaturen)
D	Chen [273]	2	2008	(keine Bauteiltemperaturen)
E	Frangi et al. [125]	1	2008	-
F	Kampmeier [90]	1	2009	-
G	Lennon et al. [274]	3	2010	-
H	Peng et al. [221]	6	2011	-
I	McGregor [163]	5	2012	-
J	Li et al. [275]	6	2014	-
K	Hevia [276]	3	2013	-
L	Su & Loughheed [124]	4	2014	-
M	Su & Muradori [277]	1	2015	-
N	Kolatis et al. [278]	1	2014	-
O	Janssens [279]	2	2015	-
P	Hox [222]	2	2015	-
Q	Hadden et al. [75]	5	2017	Selbstverlöschten
R	Janssens [280]	3	2017	-
S	Just & Brandon [281]	1	2018	-
T	Li [200]	10	2016	Selbstverlöschten
U	Zelinka et al. [123]	5	2018	-
V	Su et al. [282]	6	2018	-
W	Su et al. [201]	5	2018	Selbstverlöschten

Leider lassen sich nur wenige der erfassten 23 Forschungsprojekte, mit jeweils einem bis zehn Großbrandversuchen, auf die hier untersuchte Rahmenbedingungen des Selbstverlöschens von entzündeten Holzbauteilen hin auswerten. Viele Großversuche waren nur mit bekleideten Bauteilen ausgeführt, verfügten über keine (oder nicht veröffentlichte) Temperaturmessstellen in den Holzbauteilen oder wurden durch Löscharbeiten beendet, da ein Abkühlen und Selbstverlöschten mehrere Stunden zur Beobachtung in Anspruch genommen hätte. Weiterhin muss die jeweilige Ausführung der konstruktiven Details im Hinblick auf das Selbstverlöschten berücksichtigt werden. Die Mehrheit der erfassten Großbrandversuche wurde mit Brettsperrhölzern durchgeführt.

Im Allgemeinen konnten auf Grundlage der vorangegangenen Forschungsarbeiten und Großbrandversuche zwei Systematik festgestellt werden, welche das Abkühlen und Selbstverlöschten von Bränden in Räumen in Holzbauweisen beeinflussen: das Abfallen der Holzkohleschicht (bzw. die Delamination) und die Begrenzung des Anteils der brennbaren Oberflächen.

In den Großbrandversuchen von Hadden (Tabelle 38, Zeile Q) [75] wurde ein Brandraum mit den Abmessungen von ca. 2,7 m x 2,7 m x 2,7 m in verschiedenen Kombinationen mit Wand- und Decken aus Brettsperrholz ausgeführt (Abbildung 265). Als Brandlast wurden Holzkrippen mit einer Brandlastdichte von 132 MJ/m² verwendet.

Der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in Versuch Beta 2 (Abbildung 266) verdeutlicht den Effekt der Delamination von Brettsperrholz. Erreicht die Verkohlung bei Brettsperrholz die Tiefe der Klebeschicht,

kann dies zum Ablösen (Delamination) der oberen, verkohlten Brettlage führen. Die darunterliegende, unverbrannte Holzschicht steht dem Brandverlauf anschließend uneingeschränkt zur Verfügung. Dies resultiert in neue Zersetzungsprozesse und einen Wiederanstieg der Wärmefreisetzungsrate. Im Versuch Beta 1 hingegen wurden Delaminationen von geringem Umfang festgestellt. Der Brandraum kühlte ab und verlösch selbstständig. Als praktikabler Lösungsansatz kann Brettsperrholz produziert werden, dessen oberen Plattenlagen eine ausreichende Dicke zur Verkohlung ohne Delamination aufweist. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von widerstandsfähigeren Klebstoffen, welche ihre Verbundwirkung im Brandfall erhalten und eine Delamination im Brandfall verhindern.

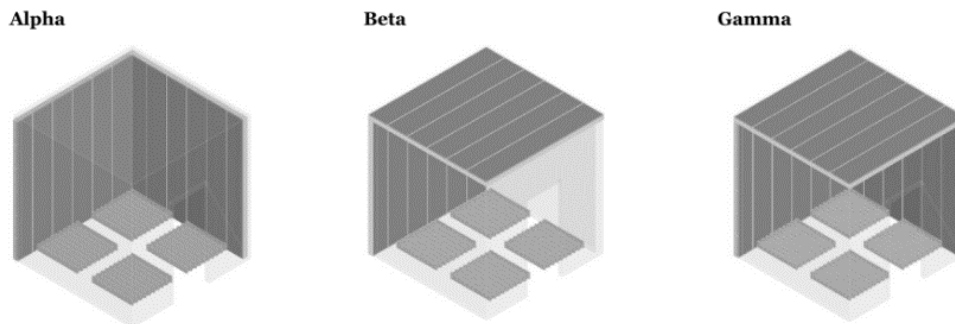


Abbildung 265: Schematischer Versuchsaufbau der Brandversuche in [75]

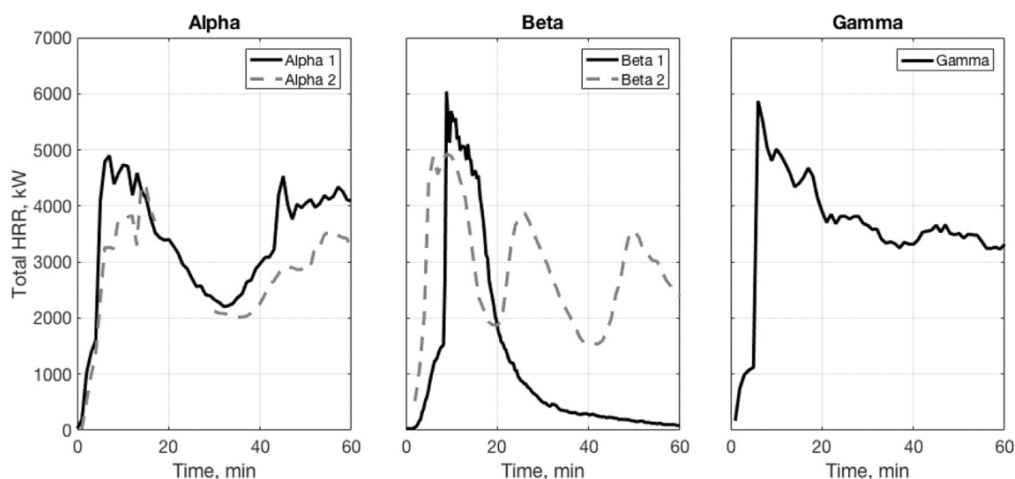
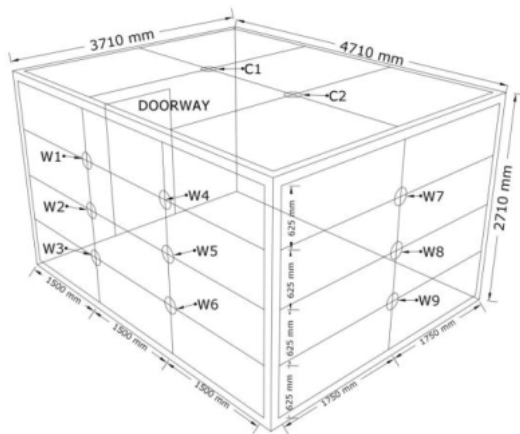


Fig. 6. Total heat release rates for all experiments. Data are incomplete for Alpha-2 between 17 and 28 min after ignition due to a data acquisition problem.

Abbildung 266: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate der Brandversuche in [75]

Mit zunehmender Menge an brennbaren Oberflächen im Brandraum erhöht sich die insgesamt freigesetzte Wärmeenergie in diesem, dies wirkt sich in der Nachbrandphase entscheidend auf das Selbstverlösch der Bauteile aus. Im Versuch Gamma wurden zwei Wände und die Decke mit unbekleidetem Brettsperrholz ausgeführt. Werden mehrere Bauteiloberflächen brennbar ausgeführt, besteht die Gefahr, dass sich durch die Wärmestrahlung der brennenden Oberflächen diese gegenseitig beeinflussen (Kreuz- oder Rückstrahlung) und somit, obwohl die mobile Brandlast bereits aufgebraucht ist, kein Selbstverlösch eintritt.

Dieser Effekt konnte auch in der Arbeit von Li [200] (Tabelle 38, Zeile T) festgestellt werden. In einem Brandraum von ca. 3,7 m x 4,7 m x 2,7 m (L x B x H) wurden Brände mit einem Gasbrenner (Brandlastdichte 753 MJ/m²) und Möblierung (550 MJ/m²) durchgeführt. Der Brandraum und die Variation der Testbedingungen sind in Abbildung 267 dargestellt. Die Tests 1 bis 7 wurden mit bekleidetem und unbekleidetem Brettsperrholz durchgeführt. In den vollständig bekleideten Brandversuchen sowie im Versuch 7, mit nur einer unbekleideten Brettsperrholzwand, wurde ein Selbstverlösch des Raumbrandes festgestellt.



Test #	Interior linings*	Fuel source
1	Fully unprotected	Propane
2	Fully protected	Propane
3	Fully unprotected	Furniture
4	Fully protected	Furniture
5	2 adjacent walls unprotected	Furniture
6	2 facing walls unprotected	Furniture
7	1 side-wall unprotected	Furniture
8	Fully protected LTF with 2 GB	Furniture
9	Fully protected LTF with 1 GB	Furniture
10	Fully protected LSF with 1 GB	Furniture

*12.7 mm fire-rated gypsum board(s) (denoted as GYB)

Abbildung 267: Darstellung des Brandraumes und Versuchskonfiguration in [200]

Su (Tabelle 38, Zeile W) [201] führte fünf Großbrandversuche mit den Abmessungen von ca. 4,5 m x 2,5 m x 2,7 m (L x B x H) durch. Die Brandlastdichte der Holzkrippen betrug 550 MJ/m². Die voneinander abweichenden Versuchsaufbauten sind in Abbildung 268 dargestellt. Test 1 war vollständig mit Gipsplatten bekleidet, brannte aus und verlösch selbstständig. In Test 2 wurden die Wand A und 10 % der Decke unbekleidet mit Brettsperrholz ausgeführt. Die unbekleideten Bauteile vor dem Brandversuch und zur 240. Versuchsminute sowie der Verlauf der Brandraumtemperatur sind in Abbildung 269 dargestellt. Der Brandverlauf deutete auf ein Selbstverlösch hin, die mobile Brandlast war bereits aufgebraucht, der restliche Flammenbrand wurde nach 240 Minuten gelöscht. In Test 4 wurde die Decke sowie im Brandraum aufgestellte Stützen und ein Unterzug, unbekleidet ausgeführt, siehe Abbildung 270. Es wurde ein vollständiges Verlösch der Flammenbrände nach 170 Minuten festgestellt.

Test	Interior Surface Area							
	CLT Wall A 4.5 m x 2.7 m	CLT Wall B 2.4 m x 2.7 m	CLT Wall C 4.5 m x 2.7 m	CLT Wall D 2.4 m x 2.7 m	CLT Ceiling 4.5 m x 2.4 m	CLT Floor 4.5 m x 2.4 m	Glulam Beam 327 mm x 457 mm	Glulam Column 457 mm x 457 mm
1	3GB	3GB	3GB	3GB	3GB	3GB	-	-
2	exposed (= 33% of perimeter)	2GB	2GB	2GB	10% exposed 90% 2GB	2GB	-	-
3	2GB	2GB	2GB	2GB	2GB	2GB	exposed (4.54 m ² = 11.5% of perimeter)	exposed (9.62 m ² = 24.5% of perimeter)
4	2GB	2GB	2GB	2GB	100% exposed	2GB	exposed (2.46 m ² = 6.4% of perimeter)	exposed (4.81 m ² = 12.6% of perimeter)
5	2GB	exposed (= 17.5% of perimeter)	2GB	exposed (=17.5% of perimeter)	100% exposed	2GB	-	-

3GB: 1 layer of 15.9 mm thick Type X gypsum board + 2 layers of 12.7 mm thick Type X gypsum board
 2GB: 2 layers of 12.7 mm thick Type X gypsum board

Abbildung 268: Versuchsübersicht der Großbrandversuche aus [201]



Abbildung 269: unbekleidete Wand A und teilweise unbekleidete Decke im Brandversuch Test 2 [201], vor (links), zur 240. Versuchsminute (Mitte) und der Temperaturzeitverlauf im Brandraum (rechts)

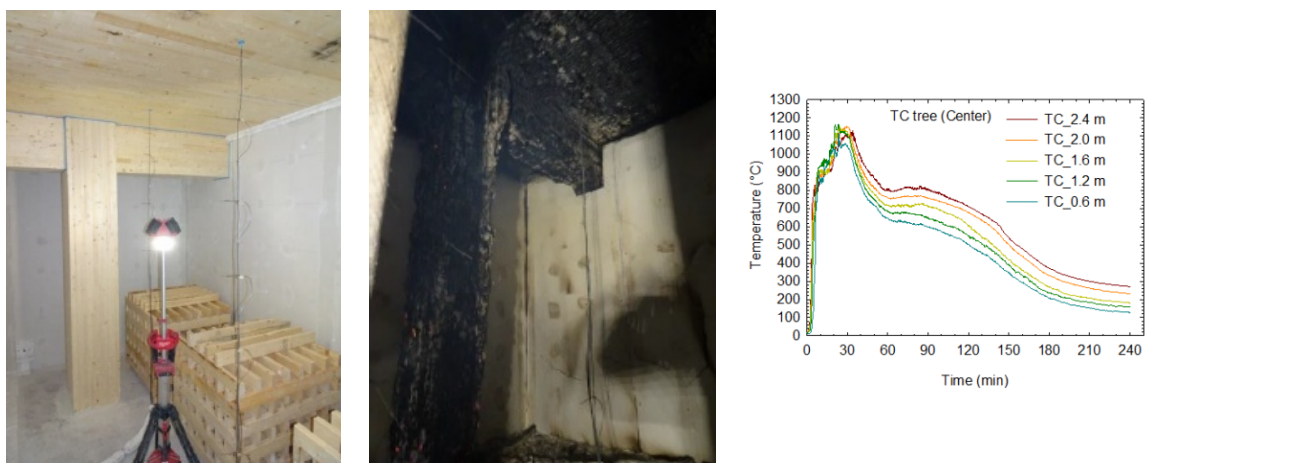


Abbildung 270: unbekleidete Wand, Stütze und Unterzug im Brandversuch Test 4, vor (links), zur 220. Versuchsminute (Mitte) und der Temperaturzeitverlauf im Brandraum (rechts) [201]

Neben einer Begrenzung der brennbaren Oberflächen und der Delamination ist für selbstverlöschende Brandräume in Holzbauweise maßgebend, dass die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung der übrigen Bauteile über den kompletten Brandverlauf, einschließlich der Nachbrand-/Abkühlphase, nicht versagt. Die Brandraumabkühlung wird durch die Zufuhr kühlender Frischluft, durch ausreichend dimensionierte Raumöffnungen, begünstigt. Da die Messung der Luftvolumenströme auf der Oberfläche von Bauteilen in Brandräumen unüblich ist, lassen sich bisher nur unzureichende Erkenntnisse über die konvektive Kühlwirkung oder das Wiederentzünden brennbarer, schwelender Bauteiloberflächen (aufgrund der erhöhten Sauerstoffzufuhr) feststellen.

3.1.3.2 Nachbrandverhalten von ungeschützten Holzbauteilen

Die im Forschungsvorhaben TIMpuls durchgeführten Raumbrandversuchen (Abschnitt 3.1.2.1) und abschließenden Belegversuche (Abschnitt 3.1.2.12) belegen die Feststellungen der Literaturrecherche (Abschnitt 3.1.3.1).

Sofern keine Löscharbeiten durchgeführt werden, wird die mobile Brandlast im Verlauf ihres Abbrands aufgebraucht. Ist die Gebäude-, bzw. Raumkonstruktion aus nichtbrennbaren Baustoffen ausgeführt, werden die Flammenbrände nach Aufzehren der mobilen Brandlasten verlöschen und es erfolgt ein Abkühlen der Brandraumtemperatur. Das gilt auch für Holzbauteile, die mit einer ausreichend dimensionierten, brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung vor einer Entzündung geschützt sind und sich dementsprechend nicht am Brand beteiligen. Sind die Bauteiloberflächen hingegen unbekleidet, mit sichtbaren Holzoberflächen ausgeführt, besteht die Möglichkeit, dass die brennbaren Bestandteile selbstständig fortlaufend, bis zu ihrem vollständigen Aufzehren der Holzmasse, verbrennen oder ein Selbstverlöschen eintritt.

Die Laboruntersuchungen im Cone-Kalorimeter (Abschnitt 3.1.2.4) verdeutlichen, dass die durch den Holzabbrand freigesetzte Energie alleine nicht ausreicht, um den Flammenbrand aufrechtzuerhalten. Dies wurde in internationalen, vergleichbaren Untersuchungen [162], [74] bestätigt. Entscheidend für das Selbstverlöschen ist die Energiebilanzierung des Verbrennungsvorganges. Grundlegende, theoretische Ansätze und Untersuchungen zum Entzünden und Verlöschen von Feststoffen bestehen bereits seit Jahrzehnten [172], [173], [174]. Eine vollumfängliche Quantifizierung der Rahmenbedingungen des Selbstverlöschens ist bisher allerdings nicht möglich. Die Wärmefreisetzung des Flammenbrandes und seine untere Explosions-, bzw. Zündgrenze sind von der Zusammensetzung der brennbaren Gase abhängig und dieses ist nicht vollständig vorhersagbar. Weiterhin wird der Wärme- und Gastransport durch die sich zunehmend bildende und nur unzureichend prognostizierbare Holzkohleschicht gestört.

Betrachtet man das Selbstverlöschen von Holz nicht nur auf einer einzelnen Oberfläche, sondern auf den raumbildenden Bauteilen (Wände und Decken) im Brandraum, ergeben sich weitere Einflüsse auf das Selbstverlöschen. Maßgebend für das Abkühlverhalten und ein vollständiges Selbstverlöschen des Raumbrandes sind die unterschiedlichen Anteile unbekleideter Holzbauwände/-decken. In den Raumbrandversuchen (Abschnitt 3.1.2.1) mit nur einer brennbaren Holzoberfläche wurde eine Selbstverlöschen der Flammenbrände und Abkühlen der Brandraumtemperaturen beobachtet, sofern die Brandquelle abgestellt (Kiesbettbrenner) wurde oder aufgezehrt ist (ca. 30 M.-% Brandleistung der Holzkrippe verbleibend). Ebenso wurde eine Tendenz zum Selbstverlöschen der Holzbauteile festgestellt, wenn maximal eine Wand und die Brandraumdecke unbekleidet ausgeführt wurden. Raumbrandversuche mit zwei sich gegenüberliegenden, unbekleideten Wandbauteilen verlöschen nicht selbstständig. Dieses kann auf die bereits erläuterte Kreuz- oder Rückstrahlung (Abschnitt 3.1.3.1) der sich gegenseitig beeinflussenden Wandbauteile zurückgeführt werden. Durch die von den brennenden Oberflächen ausgehende Wärmestrahlung und den geringen Abstand der Wände (2,4 m) führt der einwirkende Wärmestrom zu einer anhaltenden Pyrolyse, bzw. Verbrennung der Holzoberflächen.

Diese Erkenntnisse werden durch die Belegbrandversuche (Abschnitt 3.1.2.12) bestätigt. Der mit 2 x 25 mm dicken Gipskarton-Feuerschutzplatten vollständig bekleideter Brandraum V0 verlöschte selbstständig (nach ca. 120 min auf ungefähr 200 °C abgekühlt, siehe Abbildung 189) und ohne Löschmaßnahmen der Feuerwehr.

Die Belegversuche V1 (Brettschichtholzdecke unbekleidet, alle Wände 1 x 18 mm dicke Gipsfaserplatten) und V2 (zwei gegenüberliegende Brettspertholzdecken unbekleidet) kühlen gegenüber V0 langsamer ab, siehe Abbildung 263.

In beiden Belegversuchen wurde ein Abkühlen auf ca. 700 °C zur ungefähr 75. Versuchsminute festgestellt, allerdings mussten beide Brandversuche aufgrund einer vorher definierten maximalen Abbrandtiefe der Wand-/Deckenbauteile nach ca. 90 Versuchsminuten gelöscht werden. Belegversuch V3 (Brettschichtholzdecke unbekleidet, drei Wände 2 x 18 mm und eine Wand 2 x 12,5 mm dicke Gipsplatten) kühlte ab der 50. Versuchsminute von der Vollbrandphase mit ca. 1200 °C, bis zur 150. Versuchsminute auf ca. 500 °C ab. Zu diesem Zeitpunkt waren die 2 x 12,5 mm abgefallen, die darunter angeordnete OSB-Platte verbrannt und die Ständer verkohlt. Die bekleideten Wandbauteile mit 2 x 18 mm dicken Gipsplatten brannten im späteren Versuchsverlauf aus Fugen und Rissen. Zur 150. Versuchsminute waren die Flammenbrände fast vollständig selbstverloschen. Der Versuch wurde aufgrund einer erreichten, vorher definierten maximalen Abbrandtiefe gelöscht.

Ein selbstständiges Verlöschen der Flammenbrände und das Abkühlen der Bauteile konnte in den Realbrandversuchen nachgewiesen werden. Es erscheint möglich, dass Brandräume mit nur einer Wand oder der Decke mit ungeschützter Holzoberfläche ohne einen Löschangriff selbstverlöschend sein können, jedoch konnte der Beleg in diesem Projekt nicht abschließend geführt werden.

3.1.3.3 Nachbrandverhalten von anfänglich geschützten Holzbauteilen

Das Brandverhalten von einem anfänglich durch eine Brandschutzbekleidung, geschützten Holzbauteil wurde im Forschungsvorhaben TIMpuls experimentell in klein- und großmaßstäblichen Skalen untersucht. Die Untersuchungen erfolgten orientierend mit der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) als auch mit repräsentativen Naturbrandkurven zur Analyse des Nachbrandverhaltens. Das Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Kombinationen von Brandschutzbekleidungen. Die Leistungsfähigkeit wird anhand des Verhinderns einer Entzündung der anfänglich geschützten Holzflächen auf Basis der gemessenen Temperaturen in der Grenzschicht Brandschutzbekleidung – Holzoberfläche sowie des Verkohlungsbildes dieser bewertet.

Infolge der thermischen Materialeigenschaften von Gips, welche eine hohe Wärmespeicherfähigkeit aufweisen, stellt sich eine Nacherwärmungsphase ein. Diese sorgt für eine anhaltend thermische Beanspruchung der zu schützenden Holzoberfläche, sogar während der Abklingphase der Naturbrandbeanspruchung. Entsprechend kann eine Entzündung der anfänglich geschützten Holzflächen in der Abklingphase einer Naturbrandbeanspruchung erfolgen. Erst durch ein Umkehren des thermischen Gradienten, im weiteren Verlauf der Abklingphase, erfolgt das Absinken der Temperatur in der Grenzschicht. Bei ausreichender Dimensionierung der Brandschutzbekleidung konnte das Entzünden und selbstständige Weiterbrennen der Holzoberflächen verhindert werden (Abschnitt 3.1.2.3). Ein Auftreten von Verfärbungen und lokalen Verkohlungen der Holzoberflächen war teilweise festzustellen.

Im Belegbrandversuch V0 (Abschnitt 3.1.2.12) wurde festgestellt, dass eine Brandschutzbekleidung aus 2 x 25 mm dicken Gipskarton-Feuerschutzplatten eine thermische Zersetzung der geschützten Holzbauteile über den gesamten Naturbrandverlauf verhindert.

Eine weitere Möglichkeit zur Ausführung selbstverlöschender Holzbauteile wäre die Anordnung einer Brandschutzbekleidung in der Bauteiltiefe, unterhalb einer Holzschicht. Die Brandschutzbekleidung wäre in einer Tiefe anzuordnen, die gleich oder größer dem zu erwarteten Abbrand der Holzschicht ist. Im Falle eines Brandereignisses würde die mobile Brandlast zusammen mit der Holzschicht bis zu der Brandschutzbekleidung abbrennen. Anschließend würde der Brand voraussichtlich selbstständig verlöschen. Das Bauteil müsste statisch so ausgelegt werden, dass der Restquerschnitt weiterhin tragend ist. Als Brandschutzbekleidung könnten Plattenwerkstoffe auf Gips- oder Zementbasis eingesetzt werden.

3.1.3.4 Nachbrandverhalten und Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken im Naturbrand

Im Rahmen des Forschungsvorhabens TIMpuls wurde auch das Brandverhalten von HBV-Deckenbauteilen im Naturbrand in den Abschnitten 3.1.2.7 und 3.1.2.8 untersucht. Folgend wird die prinzipielle Bemessung von Holz-Beton-Verbunddecken unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Naturbrandversuche beschrieben.

Aufgrund des technologischen Fortschritts, Schallschutzerfordernungen und im mehrgeschossigen Gebäudebau vor allem aus Gründen des Brandschutzes, haben sich in der Vergangenheit Stahlbetondecken durchgesetzt. Allerdings ist die Verwendung von Beton ein maßgebender Faktor in der Diskussion zum nachhaltigen Bauen. Zum einen bedingt Beton einen massiven Rohstoffabbau von Sand [202], der sowohl zur Herstellung des Betons als auch für den Zement benötigt wird. Weiterhin wird dem Zement ein Anteil von 8% am weltweiten CO₂-Ausstoß zugerechnet [203]. Im Hinblick auf ein nachhaltiges und ressourcenschonendes Bauen bietet die Verwendung von Holz, zur Reduzierung von Stahl und Beton in Massivbaudecken, eine ökologische und statisch effiziente Alternative.

Ursprünglich wurde die HBV-Decke zur Sanierung von Altbaudecken entwickelt. Beispielsweise ergeben sich aufgrund einer Nutzungsänderung erhöhte Deckenlasten oder durch das Wegfallen von tragenden Wänden vergrößerte Deckenspannweiten. Durch das Aufbetonieren der Betonschicht vergrößert sich die statische Höhe. Das einwirkende Moment wird durch eine Druckkraft im Beton und einer Zugkraft im Holz aufgenommen. Aufgrund ihrer günstigen statischen Eigenschaften können HBV-Decken bei verhältnismäßig geringem Eigengewicht und geringer Bauhöhe große Spannweiten erreichen. Im Vergleich zu normalen Holzbalkendecken verfügen sie außerdem über ein günstiges Schwingungsverhalten und gute akustische Eigenschaften. Neben den physikalischen und ökologischen Vorteilen werden sie außerdem aus ästhetischen Gründen zunehmend von Bauherren im mehrgeschossigen Büro- und Wohnungsbau gewünscht, da sie von unten eine sichtbare Holzoberfläche aufweisen können.

Die Holzschicht einer HBV-Decke kann mit Holzbalken oder einer flächigen Massivholzschicht, in Form von Brettstapel- oder Brettschichtholzelementen, ausgeführt werden. Die Wahl des Verbindungsmittels zwischen Holz und Beton ist entscheidend für die Übertragung der Schubkräfte und die Spannungsverteilung in den Teilquerschnitten. Der Verbund zwischen Holz- und Betonschicht kann durch Verbindungsmittel aus Stahl (Schrauben, Metallstreifen) oder Kerben im Holz gewährleistet werden.

Bauordnungsrechtliche Grundlagen

Die Verwendung von HBV-Decken in den Gebäudeklassen 1 bis 3 ist problemlos möglich. Ihre Nutzung in den Gebäudeklassen 4 und 5 ist jedoch aufgrund brandschutztechnischer Anforderungen eingeschränkt (siehe Abschnitt 2.2).

Das brandschutztechnische Sicherheitsniveau wird durch bauliche, anlagentechnische, organisatorische und abwehrende Maßnahmen gewährleistet. Die baulichen Maßnahmen werden unter anderem auch über die Feuerwiderstandsklassen der Bauteile bestimmt. Diesen liegen Bauteilprüfungen mit einem Brandverlauf nach der ETK zugrunde. Dieser stellt die Temperaturentwicklung während einer Vollbrandphase dar und bietet damit eine sichere und rechtsverbindliche Grundlage zur Anwendung tabellarischer sowie vereinfachter Bemessungsverfahren in Kombination mit den Brandschutzteilen der Eurocodes sowie der Normreihe DIN 4102. Neben der in den Bauordnungen verankerten Brandschutzbemessung auf Basis der ETK bietet die DIN EN 1991-1-2 [1] in Verbindung mit dem nationalen Anhang [21] zudem die Möglichkeit einer brandschutztechnischen Auslegung und Beurteilung von Bauteilen und Tragwerken mittels Naturbrandverfahren.

Naturbrandmodelle bilden ein worst-credible Szenario ab, das von den tatsächlich vorhandenen Brandlasten, Brandraumgeometrien und Ventilationsbedingungen, aber auch den auftretenden Wahrscheinlichkeiten und Risiken der Brandentstehung und -entwicklung bestimmt wird. Dies schließt somit die vorhandenen Bedingungen des anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzes ein. Es wird dabei der Nachweis erbracht, dass das Bauteil die gesamte Branddauer, einschließlich der Abkühlphase ohne Versagen der Tragfähigkeit bzw. des Raumabschlusses übersteht. Damit ist eine realitätsnähere Bewertung der entstehenden Temperaturen sowie des Tragverhaltens von Bauteilen und Konstruktionen im Brandfall möglich.

Bei Anwendung des Naturbrandmodells nach DIN EN 1991-1-2/NA [21], ist der Löschangriff der Feuerwehr oder/ und der Nutzer mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von jeweils 50 % zu berücksichtigen. Das bedeutet für Bauteile aus brennbaren Baustoffen, dass diese vollständig abbrennen könnten. Im Falle

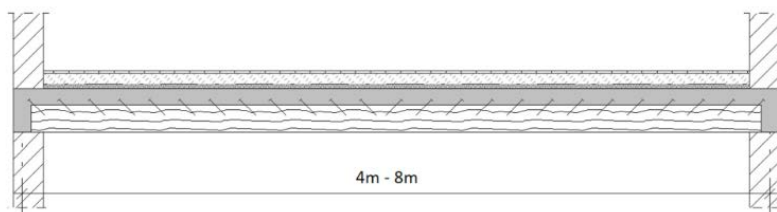
der hybriden Bauweise einer HBV-Decke kann der übrige, nichtbrennbare Betonquerschnitt der Decke so dimensioniert werden, dass er die Anforderungen des Lastfalls Brand allein erfüllt.

Es gilt zu berücksichtigen, dass Naturbrandverläufe stets in Bezug auf ihren konkreten Anwendungsfall zu ermitteln sind. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass infolge der unterschiedlichen Parameter und Annahmen Naturbrandverläufe festgestellt werden, welche sich gegenüber der gewählten Naturbrandkurve (Abschnitt 3.1.1.5) als kritischer darstellen. In diesem Fall sind die folgenden Ergebnisse der Brandversuche rational zu beurteilen und gegebenenfalls weitere Brandversuche notwendig.

Bemessung

Statisches System und Bemessungsgrundlagen

Üblicherweise werden HBV-Decken als einachsig gespannte Einfeldträger bemessen. Dabei erhält der oberliegende Betonquerschnitt vorwiegend Druckspannungen, während das Holz auf der Unterseite durch Zug beansprucht wird. Auf eine Ausführung als Mehrfeldplatte wird aufgrund der zusätzlich notwendigen Bewehrung und der Tatsache, dass die Holzelemente – je nach Spannweite – ohnehin am Auflager gestoßen werden, verzichtet. Bei gestoßenen Holzelementen erreicht man am Mittelaufleger somit nur eine reduzierte Biegesteifigkeit, welche die Durchlaufwirkung entsprechend reduziert. Die untersuchte HBV-Decke ist in Abbildung 271 dargestellt.



- Einfeldträger (gelenkige Auflagerung)
- Holz: flächig, Brettstapelelement, C24
- Beton: C25/30, XC1, $c_{nom} = 20$ mm
- Betonstahl: B500 A
- Kategorie A (Wohn- und Aufenthaltsräume), Nutzungsklasse 1 (beheizte Innenräume)
- Spannweite: 4 m bis 8 m

Abbildung 271: Beispiel einer HBV-Decke mit Auflagern [205]

Als einwirkende Last wurde eine übliche Belastung aus Eigengewicht des Deckenaufbaus und Nutzung einer Geschossdecke des allgemeinen Wohnungsbaus berücksichtigt [205]. Die Einwirkungen wurden je nach Bemessungssituation und Grenzzustandsbetrachtung in den entsprechenden Einwirkungskombinationen nach DIN EN 1990/NA [31] mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN EN 1992-1-1 [82] sowie DIN EN 1995-1-1 [152] beaufschlagt. Das Eigengewicht des Holzes wurde eurocodekonform auf der sicheren Seite liegend, auch bei seinem vollständigen Abbrand, in allen Bemessungssituationen berücksichtigt.

Bemessung der HBV-Decke

Die HBV-Decken wurden zunächst unter Normaltemperatur bemessen. Als Verbundmittel wurden SFS-Verbundschrauben und Kerven untersucht. Zur Bemessung der HBV-Decken mit SFS-Verbundschrauben (Abbildung 272, links) wurde das γ -Verfahren nach DIN EN 1995-1-1 [152] als Rechenverfahren für Biegeträger mit nachgiebig angeschlossenen Teilquerschnitten verwendet. Die Verbundwirkung der SFS-Verbundschrauben wurde nach Z-9.1-342 [79] und ETA-13/0699 [80] unter Berücksichtigung der Steifigkeitsminderung unter Langzeitwirkung angenommen. Für die Berechnung der HBV-Decke mit Kerven (Abbildung 272, rechts) wurde das Alpha-Verfahren nach [81] verwendet.

SFS-VB-48-7,5 x 100; einsinnige Anordnung

$s = 200\text{mm}$, $e = 240\text{mm}$ für 4-7m Spannweite

$s = 200\text{mm}$, $e = 200\text{mm}$ für 8m Spannweite

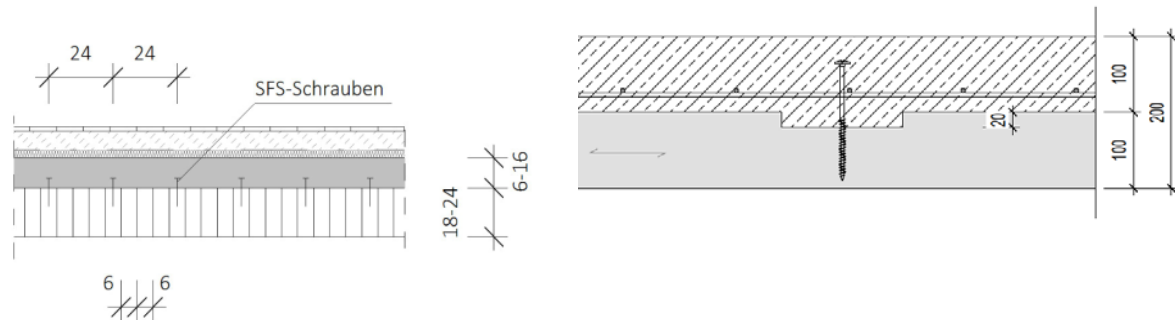


Abbildung 272: Querschnitt einer HBV-Decke mit SFS-Schrauben [205] Längsschnitt HBV-Decke mit Kerfen

Nach erfolgreicher Ermittlung der Querschnittshöhen unter Normaltemperatur erfolgt die Heißbemessung unter Berücksichtigung eines Naturbrandszenarios. Wie bereits erläutert wird auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass ein vollständiger Abbrand der Holzschicht stattfindet. Der Nachweis der Tragfähigkeit erfolgt somit ausschließlich über den restlichen Stahlbetonquerschnitt.

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Holzschicht dennoch so dimensioniert sein muss, dass sie die Betonschicht zumindest solange schützt, bis die Brandraumtemperatur wieder unter 400 °C abgefallen ist oder vereinfacht angenommen die mobile Brandlast aus der Nutzung aufgebraucht ist. Inwiefern die in der DIN EN 1995-1-2 [42] aufgeführten konstanten Abbrandraten, welche unter ETK bestimmt wurden, zur Dimensionierung von Holzschichten im Naturbrandverlauf anwendbar sind, ist ebenfalls Gegenstand des Forschungsvorhabens TIMpuls (siehe Abschnitt 3.1.2.2). Die Brandversuche belegen, dass die Abbrandrate über die Naturbrandphasen (Aufheiz-, Vollbrand-, Abkühlphase) nicht konstant ist, der Gesamtabbrand der Holzbauteile nach Versuchsende allerdings mit den Abbränden nach ETK vergleichbar bleibt und diese für die Dimensionierung verwendet werden können. Üblicherweise werden baupraktisch Holzschichten von mindestens 100 mm ausgeführt. Unter der Annahme einer fiktiven, konservativen und konstanten Abbrandrate (in Anlehnung an Tabelle 6) von $1,0\text{ mm/min}$ würde diese Holzschicht erst nach 100 min vollständig aufgebraucht sein.

Nach dem Abkühlen des Naturbrandes aufgrund des Aufbrauchs der mobilen Brandlast, könnte die restliche Holzschicht aufgrund der Kohleschichtbildung entweder selbstständig verlöschen oder vorrangig durch Glimm- und Schwelvorgänge zersetzt werden. Die Betrachtungen zum Nachbrandverhalten und Selbstverlöschen von Bränden in Räumen in Holzbauweisen (Arbeitspaket 3 Nachbrand und Löscherhalten) dieses Abschlussberichtes erläutern, dass Brandräume mit nur einer brennbaren (unbekleideten) Bauteiloberfläche zum Selbstverlöschen neigen. Sollte die Restholzschicht weiterhin Glimmen oder Schwelen können die Pyrolysetemperaturen im Holz bei etwa 300 °C bis 450 °C [83] angenommen werden.

Die Heißbemessung der HBV-Decke, bzw. der verbleibenden Betonschicht, ist somit ohne temperaturbedingte Reduzierungen der Materialparameter des Betons und der eingelegten Bewehrung möglich. Entsprechend DIN EN 1992-1-2 [78] werden die Festigkeitseigenschaften der Bewehrungslage erst ab einer Stahltemperatur von 400 °C reduziert. Die in den Brandversuchen festgestellten Maximaltemperaturen der Bewehrungslagen befanden sich deutlich unter diesem Wert. Als Bemessungsmethode wurde dabei das μ_{eds} Verfahrens analog DIN EN 1992-1-1 [82] unter Begrenzung der Druckzonenhöhe auf $\xi_{\text{lim}} = 0,45$ gewählt. Hierbei wurde die Tragfähigkeit unter Ertüchtigung der einzulegenden Stahleinlagen auf übliche Bewehrungsquerschnitte des Hochbaus untersucht. Die raumabschließenden Funktionen der HBV-Decken sind entsprechend den Brandversuchen (siehe Abschnitt 3.1.2.8) nachgewiesen.

Bemessung der Stahlbetondecken

Die Bemessung der vergleichbaren Stahlbetondecke erfolgte unter Normaltemperatur auf Basis des μ_{eds} Verfahrens nach DIN EN 1992-1-1 [82], unter Ermittlung der erforderlichen Betonstahlbewehrung sowie der dabei erforderlichen Querschnittshöhe. Die Druckzonenhöhe wird ebenfalls auf $\xi_{\text{lim}} = 0,45$ begrenzt. Abhängig von der Spannweite ergeben sich Betonschichtthöhen, bzw. Plattendicken $\geq 160\text{ mm}$.

Der Feuerwiderstandsnachweis der Stahlbetondecke wurde näherungsweise unter ETK mittels des tabellarischen Bemessungsverfahrens nach DIN EN 1992-1-2 Tabelle 5.8 [78] geführt (Abbildung 273). Diese fordert für REI 90 eine Plattendicke von 100 mm und einen Achsabstand der Bewehrung von 30 mm. Für die Dimensionierung der vergleichenden Stahlbetondecken ist somit die Tragfähigkeit infolge der Kaltbemessung maßgebend. Ein Naturbrandnachweis der Stahlbetondecken, zum Nachweis eventuell schlanker Decken im Brandfall, ist somit nicht erforderlich. Weiterhin erfüllen die Stahlbetondecken entsprechend Abbildung 273 die Anforderungen an den Raumabschluss für die Gebäudeklassen 5 (EI 90).

Tabelle 5.8 — Mindestmaße und -achsabstände für statisch bestimmt gelagerte, einachsig und zweiachsig gespannte Stahlbeton- und Spannbetonplatten

Feuerwiderstandsklasse	Mindestabmessungen (mm)			
	Plattendicke h_b (mm)	einachsig	Achsabstand a	
			$l_x/l_y \leq 1,5$	$1,5 < l_x/l_y \leq 2$
1	2	3	4	5
REI 30	60	10*	10*	10*
REI 60	80	20	10*	15*
REI 90	100	30	15*	20
REI 120	120	40	20	25
REI 180	150	55	30	40
REI 240	175	65	40	50

l_x und l_y sind die Spannweiten einer zweiachsig gespannten Platte (beide Richtungen rechtwinklig zueinander), wobei l_x die längere Spannweite ist.
Bei Spannbetonplatten ist die Vergrößerung des Achsabstandes entsprechend 5.2 (5) zu beachten.
Der Achsabstand a in den Spalten 4 und 5 gilt für zweiachsig gespannte Platten, die an allen vier Rändern gestützt sind. Trifft das nicht zu, sind die Platten wie einachsig gespannte Platten zu behandeln.
* Normalerweise reicht die nach EN 1992-1-1 erforderliche Betondeckung aus.

Abbildung 273: Mindestabmessungen für Stahlbetondecken, Tabelle 5.8 der DIN EN 1992-1-2 [78]

Ergebnisse der Bemessung

Die wesentlichen Ergebnisse der Bemessung werden in Tabelle 39 gegenübergestellt. Die Beton- und Holzquerschnitte sowie Bewehrungsgrade für SFS-Verbundschrauben und Kerfen sind vergleichbar und werden in Tabelle 39 unter „HBV-Decken“ zusammengefasst.

Tabelle 39: Ergebnisse der Bemessung der HBV- und Stahlbetondecken

		HBV-Decken (mit SFS-Verbundschrauben oder Kerfen)			Stahlbetondecken	
Spannweite	Druckfestigkeitsklasse des Betons	Beton-schicht	Holz-schicht	Feldebewehrung	Beton-schicht	Feldebewehrung
		h_c	h_t	a_s	h_c	a_s
4 m	C25/30	10 cm	10 cm	R 424 A	16 cm	R 524 A
5 m	C25/30	12 cm	10 cm	R 524 A	18 cm	Ø 10, s = 12,5 cm
6 m	C25/30	14 cm	10 cm	Ø 12, s = 15 cm	24 cm	Ø 12, s = 10 cm
7 m	C25/30	14 cm	10 cm	Ø 12, s = 10 cm	24 cm	Ø 12, s = 10 cm
8 m	C25/30	16 cm	10 cm	Ø 12, s = 10 cm	28 cm	Ø 12, s = 8,5 cm

Die weiterführende Untersuchung der unterschiedlichen HBV- sowie Stahlbetondecken zeigt, dass die Betongüte selbst keinen signifikanten Einflussfaktor hinsichtlich der auftretenden Spannungen darstellt [205]. Die Betrachtung relevanter Ertüchtigungsmaßnahmen ist daher auf eine Betongüte der Überwachungskategorie 1 (C25/30) eingegrenzt.

Die Heißbemessung der HBV-Decken erfolgte unter der Annahme eines vollständigen Holzabbrandes und der Gewährleistung der Tragfähigkeit ausschließlich über den Betonquerschnitt mit für den Hochbau üblichen Bewehrungseinlagen. Die erforderlichen Betonquerschnittshöhen betragen abhängig von der Spannweite 10 cm bis 16 cm. Bei Spannweiten von 4 m bis 5 m wurden bei 10 cm bis 12 cm Betonschicht eine Mattenbewehrung in Form einer Lagermatte R424, bzw. R524 als ausreichend ermittelt. Spannweiten ab 6 m konnten hingegen nur unter Einlage einer Stabstahlbewehrung nachgewiesen

werden. Hierbei wurde ein Bewehrungsquerschnitt von mind. $7,54 \text{ cm}^2/\text{m}$ erforderlich, wobei die Betonquerschnitte ab 7 m Spannweite nicht unter $11,31 \text{ cm}^2/\text{m}$ als tragfähig nachgewiesen werden konnten. Spannweiten von 8 m bedingten unter gleicher Bewehrungseinlage zudem eine Erhöhung des Betonquerschnittes auf 16 cm.

Auflagerdetails

Im Folgenden werden die Auflagerdetails einer üblichen HBV-Decke (Abbildung 274) und einer HBV-Decke mit Betonbocke, unter der Annahme eines vollständigen Holzabbrandes (Abbildung 275), dargestellt.

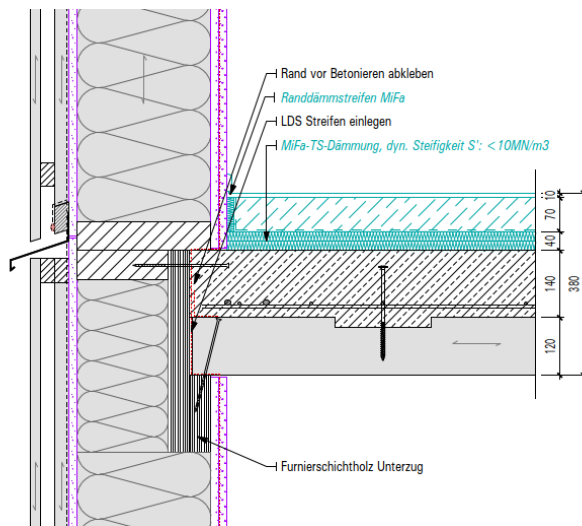


Abbildung 274: Standardauflagersituation einer HBV-Decke (links) (Bild : PIRMIN JUNG Deutschland GmbH)

Das Detail in Abbildung 274 setzt einen erforderlichen Restquerschnitt des Holzes der HBV-Decke im Zuge der Heißbemessung voraus. Die Decke wird – auch im Brandfall – direkt auf dem Randunterzug aufgelagert. In diesem Fall besteht der Randunterzug aus L-förmig zusammengeklebten Querschnitten aus Furnierschichtholz. Die Querkräfte der HBV-Decke werden bei dieser Systematik allein durch den Restquerschnitt des Holzes übertragen. Im Kaltbemessungsfall erfolgt die Querkraftübertragung über den gesamten Holzquerschnitt. Der Betonbereich hinter der letzten Kerne bis zur Außenwand ist sozusagen eine Schubtote Zone. Hier wird der Beton nicht über eine Schubbeanspruchung zur Lastabtragung aktiviert. Die Lasten werden aus der Decke über die Holzschicht in das Auflager eingeleitet. Damit wird das Holz quer zur Faser beansprucht. Für den Fall, dass die Holzschicht im Zuge der Heißbemessung nicht mehr als tragend angesetzt wird, ist in Abbildung 275 eine brandschutztechnisch optimierte Auflagersituation dargestellt.

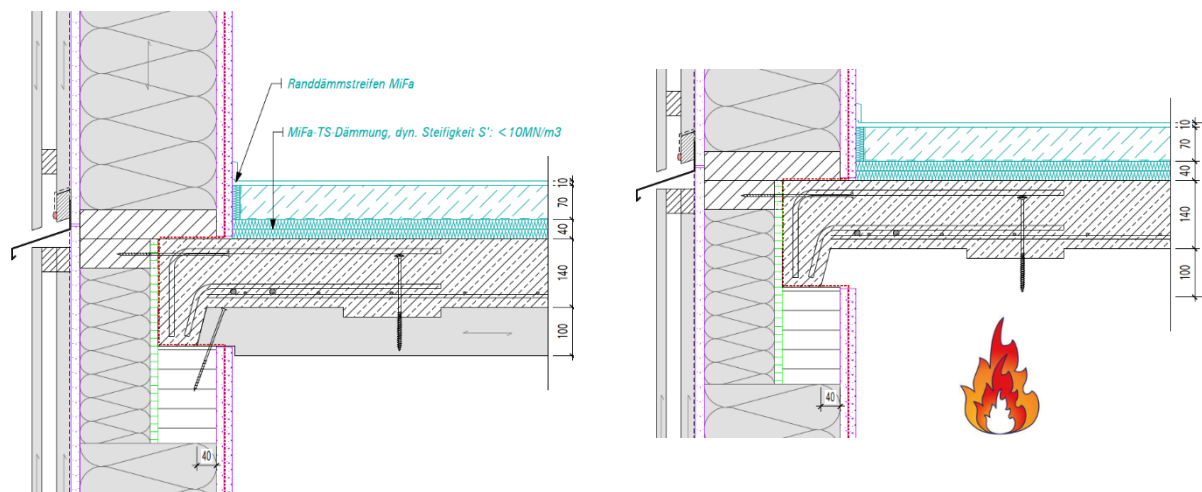


Abbildung 275: Alternatives Auflager einer HBV-Decke mit Auflagernocke, nach dem Abbrand der Holzschicht
(Bild: PIRMIN JUNG Deutschland GmbH)

Diese Konstruktionsart mit einer Auflagernocke, welche im Brandfall das Auflager der Decke ausbildet, ermöglicht ein vollständiges Wegbrennen der Holzlage, ohne den Verlust einer kraftschlüssigen Lasteinleitung in das Auflager. Die dargestellte Auflagernocke dient der Lastübertragung des Überbetons auf den Randunterzug bei Wegfall der Holzschicht. Mit dieser Konstruktion ist gewährleistet, dass kein Holz im Bereich des Auflagers zur Lastübertragung im Zuge des Tragfähigkeitsnachweises für den Brandfall aktiviert werden muss. Die Auflagernocke bildet somit eine direkte Auflagerung des Überbetons im Brandfall. Durch eine entsprechende Zulagebewehrung wird die Nocke in die Überbetonplatte eingespannt, sodass auch durch größere Verformungen entstehende Zwängungsspannungen aufgenommen werden können.

Das Holz lässt man grundsätzlich auf dem Randunterzug aufliegen, damit keine indirekte Auflagerung ausgebildet werden muss. Wenn das Holz nicht auf den Randunterzug geführt würde - also im Falle einer indirekten Lagerung, müsste man die Holzschicht aufwendig – mittels Schraubenverbindung - in den Überbeton "hochhängen".

Bei Auflagerung der Holzschicht auf dem Unterzug erfolgt die Querkrafteinleitung durch den Holzquerschnitt.

Der Randunterzug, auf dem die Auflagernocke aufgelagert ist müsste, aufgrund der Annahme eines vollständigen Holzabbrandes, vor seiner Entzündung geschützt werden. Einerseits besteht die Möglichkeit, die brandschutztechnische Bekleidung der tragenden, unteren Wand zwischen dieser und dem Randunterzug fortzuführen. Sollte die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung in diesem Fall bis unter die Auflagernocke geführt werden, ist die Lastweiterleitung über die brandschutztechnische wirksame Bekleidung zu prüfen. Weiterhin könnte der Randunterzug aus nichtbrennbaren Baustoffen ausgeführt werden. Im Falle der Kaltbemessung ändert sich bei diesem System gegenüber der vorher dargestellten Standardauflagerung nichts. Auch hier erfolgt die Querkraftübertragung im rechnerischen Ansatz ausschließlich über den Holzquerschnitt.

Weiterhin erfolgte eine ökologische Bewertung der HBV-Decken gegenüber der vergleichbar bemessenen Stahlbetondecke, siehe Arbeitspaket 7 Lösungsansätze hinsichtlich Nachhaltigkeit, Sanierungsmöglichkeit, Wirtschaftlichkeit .

3.1.4 Arbeitspaket 4 Abwehrender Brandschutz

3.1.4.1 Ergebnis aus der Recherche zum Einfluss des Holzbaus anderer Länder auf die Einsatztaktiken der Feuerwehren

Die Recherche internationaler Literatur, wie Zeitschriften, Fachbücher und Forschungsberichte zeigen, dass das Thema „Einsatztaktik zur Brandbekämpfung im Holzbau“ bereits in einigen Ländern einiges an Aufmerksamkeit erfährt. Somit kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass es einen Einfluss durch den Holzbau auf die Einsatztaktiken in der Brandbekämpfung zu geben scheint.

Allgemeines Ergebnis der durchgeführten Recherche ist, dass sich die Empfehlungen für die Feuerwehren bezüglich der Vorgehensweise und der Nutzung von Einsatzmaterialien sowie der Einsatztaktik zur Brandbekämpfung im Holzbau in den verschiedenen Ländern sehr ähnlich gestalten. Es konnten für alle Phasen eines Einsatzes (Erkundungsphase, Maßnahmen zur Brandbekämpfung, Nachbereitung des Einsatzes) Informationen eingeholt werden. Auch im Bereich der Ausbildung von Feuerwehreinsetzungskräften sowie der Ausstattung an Einsatzmitteln sind Empfehlungen in anderen Ländern definiert. Diese Punkte werden nachfolgend nun im Detail dargestellt.

Erkundungsphase (Forderungen an den Einsatzleiter & Führungskräfte der Feuerwehren)

Das Ziel der Erkundungsphase jedes Einsatzes ist, die Art und den Umfang der Gefahrenlage zu erkennen und Hinweise auf mögliche Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu erhalten [97]. Aufgrund der Vielfältigkeit der möglichen Einsatzszenarien für die Einsatzkräfte der Feuerwehren ist für die Abarbeitung dieser Phase kein Patentrezept vorhanden. Jede Art Gefahrenlage birgt ihre eigenen Besonderheiten und Anforderungen an den Einsatzleiter. Dies trifft auch für die Brandbekämpfung im Holzbau zu. Der Einsatzleiter ist hier vor allem mit seinem fachlichen Wissen über Baumaterialien, Konstruktionsarten und bautechnischen Gegebenheiten bezüglich des vorbeugenden Brandschutzes von Holzgebäuden gefragt [98]–[100]. Darüber hinaus muss dieser Kenntnisse über die Branddynamik und die Brandentwicklung besitzen, um die Gefahren für die eigenen Einsatzkräfte abschätzen und mögliche Folgen der getroffenen Maßnahmen für die Brandbekämpfung auf den Brandverlauf voraussagen und bewerten zu können. In diesem Zusammenhang wird oftmals in der Literatur davon gesprochen, dass die baulichen Gegebenheiten die Einsatztaktik vorgeben [101]. Sowohl schwedische [102], [103] wie auch eine kanadische Studie [104] zu Bränden in mehrgeschossigen Wohngebäuden aus brennbaren Baumaterialien zeigen, dass das Wissen über den Gebäudeaufbau und die damit gewählte optimalere Einsatztaktik durch den Einsatzleiter hätte Schäden am Gebäude vermeiden können. Auf Grundlage dieser analysierten Zusammenhänge werden in diesen und anderen Ländern die Forderungen nach Aus- und Fortbildungen im Bereich des vorbeugenden baulichen Brandschutzes, des Brandverhaltens von Baustoffen sowie Bauteilen und der Branddynamik, wie auch der Brandausbreitung in Holzgebäuden für Einsatzkräfte der Feuerwehr geäußert [105]–[107]. Neben dem Einholen von Informationen wird auch verstärkt der Einsatz einer Wärmebildkamera von außen als Hilfsmittel für die Erkundung und während des gesamten Einsatzes zur Einschätzung der aktuellen Lage bereits teilweise eingesetzt oder soll zukünftig zum Einsatz kommen [108]. Auch hier sind sich viele Autoren einig, dass eine vertiefende Ausbildung in der Handhabung und vor allem der Interpretation der Daten bei den Einsatzkräften erforderlich sei [106], [108].

Maßnahmen zur Brandbekämpfung (Ventilation, Erkundung)

Die dargestellten Maßnahmen und Methoden zur Brandbekämpfung setzen erst nach einer potenziellen Menschenrettung an. Denn selbstverständlich gilt auch in Holzgebäuden, dass die Maßnahmen zur Rettung von Menschenleben zeitlichen Vorrang vor der eigentlichen Brandbekämpfung haben.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Brandbekämpfung in Holzgebäuden ist die Problematik der Hohlraumbrände. Der Fokus liegt besonders auf einer schnellen Lokalisierung solcher Brände mittels Wärmebildkamera und der Brandbekämpfung unter Beachtung der Ventilation. Damit ist besonders die Problematik der Sauerstoffzuführung durch das notwendige Öffnen der Konstruktion zur Brandbekämpfung gemeint. Hierfür wurden Forschungsarbeiten über Sondereinsatzmitteln durchgeführt. Ziel war es, den Einsatzkräften im Innenangriff ein Hilfsmittel für das Löschen eines Hohlraumbrandes oder zu mindestens zur Kühlung des verdeckten Brandnestes ohne großflächiges Öffnen der Konstruktion zu ermöglichen.

Ein weiteres Thema im Holzbau ist die Nutzung der taktischen Ventilation. Die Innenbrandbekämpfung nutzt die taktische Ventilation in Kombination mit verschiedensten Brandbekämpfungsmethoden, da bei den anfallenden Rauchgasmenge eine schnelle und sichere Personen- oder Brandherdsuche kaum

noch zu betreiben ist [110], [111]. Jedoch nimmt in vielen Ländern der Holzbau bezüglich der Anwendung einer taktischen Ventilation mit Lüftern eine Sonderstellung ein. Es wird davon abgeraten, mittels einer Druckbelüftung das Gebäude im Holzbau rauchfrei zu bekommen, da der erhöhte Überdruck in den Räumen Sauerstoff in die brennbaren Holzkonstruktionen drückt und somit die Brandentwicklung wie auch die Brandweiterleitung enorm beschleunigen kann [106], [109].

Nachbereitung des Einsatzes (Ventilation, Absuchen)

In der Nachbereitung der Brandbekämpfung in Holzgebäuden wird in vielen Ländern auf eine intensive Untersuchung des Brandobjektes, auch mehrere Stunden nach dem eigentlichen Einsatz, sehr viel Wert gelegt [101], [106], [107]. Auch an dieser Stelle wird der Einsatz der Wärmebildkamera empfohlen, um die Dauer der Nachbereitung zu reduzieren und mögliche wieder aufglimmende Brandnester sicher zu lokalisieren. Der Einsatz einer Brandwache zur Überwachung des Brandobjektes wird in der Literatur grundsätzlich gefordert.

Einsatzmittel Wärmebildkamera

Die Nutzung einer Wärmebildkamera hat sich in Deutschland und in vielen anderen Ländern als ein wichtiges Einsatzmittel bei den Feuerwehren in verschiedensten Einsatzszenarien etabliert. Dementsprechend ist es nicht überraschend, dass die Wärmebildkamera auch bei der Brandbekämpfung im Holzbau ohne Ausnahme als ein zentrales Hilfsmittel angesehen und bewertet wird. Besonders hervorgehoben wird die Wärmebildkamera oftmals als Einsatzmittel für die Lokalisierung von verdeckten Brandnestern. Es wird aber auch darauf aufmerksam gemacht, dass die Daten als Bewertungskriterium für den Erfolg oder Misserfolg jeder durchgeführten taktischen Maßnahme herangezogen werden können. Besonders in diesem Bereich wurden in einigen Ländern bereits Forschungsvorhaben, die nicht nur auf den Holzbau ausgerichtet waren, umgesetzt [106], [109]. Genaugenommen soll die Wärmebildkamera in allen Einsatzphasen, ob bei der Erkundung, Brandbekämpfung oder in der Nachbereitung eines Einsatzes, ihren Nutzen haben. Jedoch äußern hier die meisten Autoren Bedenken bezüglich der Ausbildung der Einsatzkräfte und deren Fähigkeiten, die Daten einer Wärmebildkamera richtig zu interpretieren und die korrekten Einsatzmaßnahmen davon abzuleiten. Aus diesem Grund werden Forderungen nach einer verstärkten Ausbildung in der Handhabung von Wärmebildkamerasystemen, besonders im Zusammenhang mit taktischen Einsatzmaßnahmen zur Brandbekämpfung, gefordert [106], [109].

Löschmittel

Eine grundsätzliche Änderung der eingesetzten Löschmittel zur Brandbekämpfung konnte für den Holzbau aus der Literatur nicht recherchiert werden. Es werden hauptsächlich Hinweise zur Benutzung von Netzwasser gefunden, um die Oberflächenspannung des Löschwassers zu reduzieren und damit die Eindringtiefe zu erhöhen [106]. Ein oft in der Literatur auftretendes Thema in Bezug auf die verwendeten Löschmittel, ist die Reduzierung des Einsatzes an Löschmittel für die Brandbekämpfung. Damit soll die Gebäudestruktur durch den Einsatz von Löschwasser nicht in Mitleidenschaft gezogen werden. Diese Anforderung der Brandbekämpfung ist jedoch nicht spezifisch für den Holzbau festgelegt, sondern stellt eine allgemeine Vorgehensweise in den Feuerwehren dar, um das Schadensausmaß, soweit möglich, zu verringern und Sachwerte zu schützen. Im Buch „Falsche Taktik – Große Schäden“ macht Markus Pulm [112] auf weitere Sachverhalte aufmerksam. Zur Schadensvermeidung bzw. –minimierung soll beispielsweise die Rauchausbreitung, während eines Einsatzes möglichst vermieden werden. Bei Gebäuden aus biogenen Materialien wird speziell die effiziente Nutzung von Löschwasser hervorgehoben, weil die Materialien anfälliger für eine Schimmelbildung sind. Aus diesem Grund wird z.B. für Hohlraumbrände nach alternativen Löschmitteln, wie z.B. diversen Gasen, geforscht. Besonders in historisch bedeutenden Holzgebäuden erhoffen sich hier Länder wie Schweden und Norwegen eine verbesserte Brandbekämpfung mit möglichst geringen Folgeschäden [113].

Sondereinsatzmittel (Löschlanzen, Schneidlöschsysteme, Rettungssägen)

Die Ausbringung der Löschmittel erfolgt bei einem allgemeinen Raumbrand mittels eines Hohlstrahlrohres, das Standard-Einsatzgerät zur Brandbekämpfung. Bei verdeckten Hohlraumbränden oder Bränden innerhalb der Konstruktion müssen geeignete Öffnungswerkzeuge vorhanden sein. In vielen Ländern wird hierfür der Einsatz der Rettungssäge und einer angepassten Ausbildung der Einsatzkräfte gefordert [101], [106]. Mit der Standardausrüstung der Feuerwehren ist zum Löschen eines Hohlraumbrandes die Schaffung einer Öffnung in der Konstruktion erforderlich. Dadurch wird jedoch Sauerstoff in die brennenden Hohlräume geleitet, was bei allgemein unterventilierten Bränden in der Konstruktion zu einer steigenden Brandintensität [109] und Weiterleitung des Brandes sowie zu weiteren Schäden führen

kann. Um Abhilfe für die Einsatzkräfte der Feuerwehren zu schaffen, werden Löschanzen (Fog Nails) [110] und Schneidlöschsysteme (z.B. Cobra-Löschsystem) [106] auf ihre Eignung für die Brandbekämpfung von Hohlraumbränden in einigen Ländern erforscht sowie Ausbildungskonzepte entwickelt. Ziel der Forschungsarbeiten ist die Kühlung des brennenden Materials und der Gase in den Hohlräumen. Auf diese Weise soll das Risiko der steigenden Brandintensität oder sogar die Bildung von extremen Brandphänomenen beim Öffnen der Konstruktion und Ablöschen des verbliebenen brennenden Materials reduziert werden [113]–[115]. In Deutschland sind beide Systeme ebenfalls für die Innenbrandbekämpfung bekannt aber kaum vertreten. Wird das eigentliche Anwendungsfeld dieser beiden Geräte betrachtet, nämlich die Kühlung von sich im Brand befindenden geschlossenen Räumen, wie z.B. Frachtcontainer, ohne diese vorher betreten zu müssen [116], stellt sich die Frage, ob eine direkte Nutzung für kleine und enge Hohlräume möglich ist. Wahrscheinlich ist für eine effektive Nutzung dieser Sondereinsatzgeräte für Hohlraumbrände noch Entwicklungsarbeit erforderlich.

Neben den bereits erwähnten Anpassungen der Einsatztaktiken über die Phasen eines Einsatzes werden oftmals noch weitere Forderungen/ Empfehlungen in verschiedenen Literaturquellen angegeben. Eine häufige Forderung ist z.B. die Verwendung von mehr Einsatzkräften bei einem Brand in Holzgebäuden. In den USA teilt die National Fire Protection Association (NFPA) die Gebäude in 5 verschiedene Gebäudeklassifikationen ein. Die Holzrahmenkonstruktionen entsprechen hierbei der Klasse 5. Die Einsatzempfehlung lautet hierfür, dass mehr Einsatzkräfte nachzufordern sind [117].

Zusammenfassend kann anhand der Recherche festgehalten werden, dass in alle Phasen des Einsatzes der Brandbekämpfung, durch die Nutzung des Baumaterials Holz ein Einfluss feststellbar ist. Darüber hinaus zeigt die Recherche auch, dass in einigen Ländern entsprechend die Ausbildungen der Führungskräfte, wie auch der Einsatzkräfte, auf die Herausforderungen der Brandbekämpfung im Holzbau angepasst, erweitert und spezialisiert wurden. Interessanterweise sind einige der recherchierten Thematiken bereits vor einigen Jahren im deutschsprachigen Raum, unabhängig von der Entwicklung des Holzbaus, in Kreisen der Feuerwehren angesprochen worden. Darunter fallen z.B. die Sachverhalte, dass die Gebäudekonstruktion die Taktik vorgibt oder das ein geringer, aber effektiver Einsatz von Löschmitteln durch Sonderausrüstung in Kombination mit Daten einer Wärmebildkamera möglich ist. Die erwähnten Thematiken wurden unter dem Begriff „Schadensarme Einsatztaktik“ beschrieben und führten in einigen Einsätzen nachweislich zum Erfolg. Dieses Thema wird in dem Buch „Die neue Taktik im Feuerwehreinsatz“ von Dr. Widetschek 2014 [118] näher erläutert. Somit kann auf gewisse Erfahrungen in den Kreisen der Feuerwehren zurückgegriffen werden, um mit den Herausforderungen des Holzbaus umgehen zu können. Dennoch muss aufgrund dieser Recherche darauf aufmerksam gemacht werden, dass das Wissen aus den Bereichen der Forschung im Holzbau zwingend den Feuerwehren und Feuerweherschulen in Deutschland zur Verfügung gestellt werden sollte. Außerdem ist zu empfehlen weitere Forschungsvorhaben verstärkt in enger Zusammenarbeit mit den Feuerwehren oder den Feuerweherschulen in Richtung der Brandbekämpfung von Holzkonstruktionen anzuschließen. Auf diese Weise erfolgt nicht nur die Vermittlung von der Theorie des Holzbaus, sondern den Einsatzkräften können geeignete Einsatzmittel und erweitertes Wissen für eine effizientere und sichere Brandbekämpfung im Holzbau zur Verfügung gestellt werden. Die Ergebnisse solcher Forschungsvorhaben sollten dementsprechend immer Bausteine für eine Weiterentwicklung der Ausbildung von Einsatzkräfte sein.

3.1.4.2 Ergebnis der Onlineumfrage

Im Rahmen des Projektes, konkret im Arbeitspaket 4.2, wurde die Meinung der Organisationen des abwehrenden Brandschutzes in der Bundesrepublik Deutschland zur Entwicklung des Holzbaus mittels eines Fragebogens erfasst. Hierfür ist im Rahmen dieses Forschungsprojektes eine Onlineumfrage durchgeführt worden, auf deren wesentliche Ergebnisse an dieser Stelle eingegangen wird.

Bei der bundesweiten Onlineumfrage haben insgesamt 75 Feuerwehren den Fragebogen ausgefüllt. Davon beteiligten sich, wie in Abbildung 276 zu sehen, 41 Berufsfeuerwehren, 16 Freiwillige Feuerwehren, 3 Werkfeuerwehren und 15 Brandschutzdienststellen. Bei der Betrachtung aller möglichen Teilnehmer ergibt sich ein aussagefähiger Datensatz unter der Gruppe der Berufsfeuerwehren. Für nachfolgende Auswertung des Fragebogens wurden dementsprechend die Antworten der Berufsfeuerwehren herangezogen.

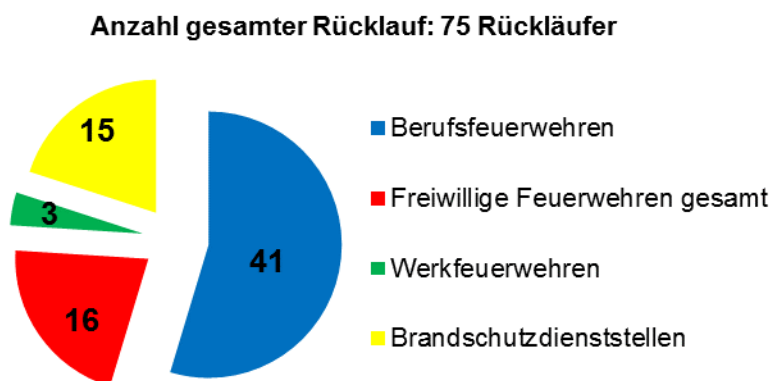


Abbildung 276: Anzahl der an der Umfrage teilgenommenen Organisationsformen

Eine der ersten Fragen befasste sich mit den Erfahrungen der Feuerwehren zur Brandbekämpfung in mehrgeschossigen Holzgebäuden. Insgesamt gaben 10 Feuerwehren an, dass sie bereits in der Vergangenheit Erfahrungen mit Brandeinsätzen in mehrgeschossigen Holzgebäuden hatten, wobei es sich hier hauptsächlich um Gebäude mit max. drei Obergeschossen handelte. Zudem gab der überwiegende Teil an, dass Brände in Holzgebäuden in den letzten 2 Jahren etwa 1- bis 2-mal oder 3- bis 5-mal auftraten. Hierbei darf nicht übersehen werden, dass in dieser Fragestellung auch Altbauten mit einem hohen Holzanteil als Baumaterial und Fachwerkhäuser mit einbezogen wurden. Die Anzahl an Bränden in modernen Holzhäusern fällt dementsprechend gering aus. Hier kann nicht auf mögliche Erfahrungen innerhalb der Feuerwehren zurückgegriffen werden, was bei den nachfolgenden Antworten in der Umfrage mit berücksichtigt werden muss.

Die Bewertung an vorbeugenden Brandschutzmaßnahmen zeigt, dass die Feuerwehren viel Wert auf einen hohen Feuerwiderstand der Baumaterialien legen. Auch die Verwendung von nicht brennbaren Dämmmaterialien sowie der Bau von Flucht- und Rettungswegen aus nicht brennbaren Bauteilen und Materialien stehen bei den Feuerwehren vorne an. Der Punkt Hohlräume in der Konstruktion stellt ein zentrales Thema dar, da allgemein von einer enorm erschwerten und zeitaufwendigen Brandbekämpfung ausgegangen wird. Aus diesem Grund ist es nachvollziehbar, dass der überwiegende Teil der Feuerwehren die Vermeidung von Hohlräumen als geeignete oder sogar unverzichtbare Brandschutzmaßnahme bewertet. Die Unterteilung der Gebäude in kleinere Brandabschnitte bewerten ein Großteil der Berufsfeuerwehren ebenfalls als geeignete Maßnahme.

Bei den anlagentechnischen Installationen fallen die Bewertungen der Feuerwehren etwas differenzierter aus. Die Installation eines Feuerwehraufzuges betrachtet ein Großteil als verzichtbar und einige sogar als ungeeignet. Halbautomatische / automatische Löschanlagen werden hingegen von etwa der Hälfte der Berufsfeuerwehren als geeignet bewertet, wohingegen die andere Hälfte solch eine Installation als verzichtbar oder ungeeignet ansieht. Hier spielt die Tatsache, dass Löschanlagen allgemein in Deutschland nicht üblich sind, sicherlich eine wesentliche Rolle für die gegebenen Antworten. Anders schaut es bei der Installation von Steigleitungen aus. Diese werden von 26 Berufsfeuerwehren als un-

verzichtbare oder als geeignete Brandschutzmaßnahme erachtet, wohingegen nur 12 der Berufsfeuerwehren die Installation von Steigleitungen als verzichtbar ansehen. Keine Feuerwehr bewertet diese Maßnahme als ungeeignet.

Ein Teil des Fragebogens diente als Selbstreflexion der Teilnehmer, in dem diese die Eignung ihrer derzeitigen Ausrüstung und Ausbildung für die Brandbekämpfung in einem mehrgeschossigen Holzgebäude einschätzen sollten. In den beiden Kreisdiagrammen in der Abbildung 277 sind die Ergebnisse hierfür zu sehen. Der erste Blick macht deutlich, dass sich die Berufsfeuerwehren in beiden Bereichen als gut aufgestellt sehen. Auffällig ist bei beiden der hohe Anteil derer, die an dieser Stelle keine Antwort gaben. Dieses Ergebnis ist bei der geringen Anzahl von 10 Berufsfeuerwehren mit Erfahrung in der Brandbekämpfung eines mehrgeschossigen Holzhauses durchaus nachvollziehbar. Ohne vorhandene Erfahrung in diesem Bereich ist die Bewertung der eigenen Einrichtung nur schwer vorzunehmen. Ein genauer Vergleich der beiden Grafiken macht jedoch auch deutlich, dass die Berufsfeuerwehren ihre derzeitige Ausbildung für die Brandbekämpfung im Holzbau schlechter einschätzen als die vorhandenen Einsatzmittel.

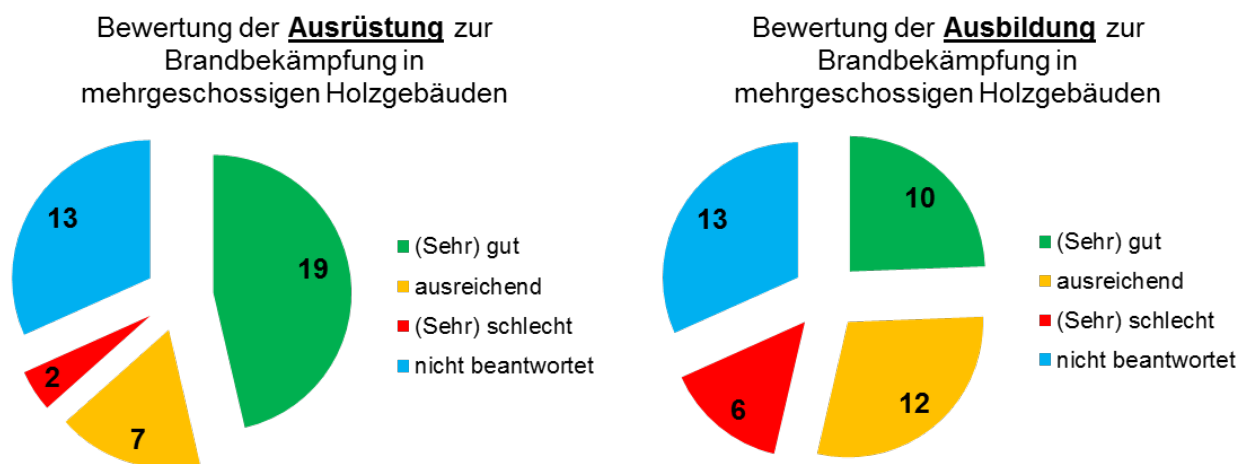


Abbildung 277: Bewertung der eigenen Feuerwehr bezüglich Ausrüstung (links) und Ausbildung (rechts)

Diese Feststellung wird mit der Betrachtung der gegebenen Antworten auf Fragen zu weiteren zusätzlichen Einsatzmitteln oder Ausbildungsinhalten, um für die Brandbekämpfung im mehrgeschossigen Holzbau vorbereitet zu sein, noch einmal deutlicher. In der Abbildung 278 sind die Antworten der Berufsfeuerwehren hierzu dargestellt. Bei den Einsatzmitteln sticht die Wärmebildkamera mit 26 Klicks deutlich heraus. Vermutlich sind die bisher gemachten Erfahrungen mit der Wärmebildkamera unter den Feuerwehren ausschlaggebend für diese Bewertung. In vielen Empfehlungen für Feuerwehreinsatzkräfte anderer Länder bei Brandeinsätzen im Holzbau und vor allem bei der Nachbereitung solcher Einsätze soll, wie in AP 4.1 erarbeitet, zur Identifizierung versteckter Brandnester die Wärmebildkamera als Unterstützung eingesetzt werden. Deshalb werden auch intensivere Ausbildungen und Übungen zur besseren Handhabung der Wärmebildkamera in der Literatur empfohlen [101], [106]. Als zweiter Punkt wurde 17-mal „Drehleiter/ Hubrettungsfahrzeuge“ angeklickt, die besonders bei mehrgeschossigen Holzgebäuden unterhalb der Hochhausgrenze eine zentrale Rolle für die Menschenrettung, über den zweiten Rettungsweg, haben. Mit 14 Klicks folgt darauf die Meinung, dass keine weiteren Einsatzmittel notwendig wären. Diese hohe Anzahl bestätigt die vorab getätigte gute Bewertung der vorhandenen Einsatz-ausrüstung. Neben der Auswahl von vorgegebenen Einsatzmitteln konnten durch die Befragten auch weitere mögliche Gerätschaften und Arbeitsmittel ergänzt werden. Die Feuerwehren haben in diesem Feld konkrete Systeme angesprochen. Besonders auffällig waren Löschlanzen und Schneidlöschsysteme, die als Sondergeräte für die Brandbekämpfung in Hohlräumen aufgelistet werden. Auch Geräte zur besseren Erreichbarkeit von Glutnestern in der Konstruktion, wie Motorkettensägen, wurden benannt.

Bei den gewünschten Ausbildungen fallen die Antworten konkreter aus. Hier sind lediglich drei Feuerwehren der Meinung, dass keine zusätzlichen Ausbildungen erforderlich sind. Dagegen stehen 35 Befürwortungen beim Thema „Einsatztaktiken zur Brandbekämpfung in mehrgeschossigen Holzgebäuden“, 34 gab es zur Kategorie „Brandverhalten und Gefahren von modernen Bauteilen und Materialien“ sowie 25 stimmten für vertiefende Lehrgänge im vorbeugenden Brandschutz von Holzgebäuden. Diese

Kombinationen an Antworten lassen die Annahme zu, dass die Feuerwehren ein Defizit in ihrer Ausbildung für die Brandbekämpfung in einem mehrgeschossigen Holzbau sehen. Im Rahmen des Projekts TIMpuls wurden einige der aufgerufenen Ausbildungsinhalte angestoßen. Entsprechend sollten aus dem Projekt auch Antworten für die Feuerwehren auf diese Frage folgen.

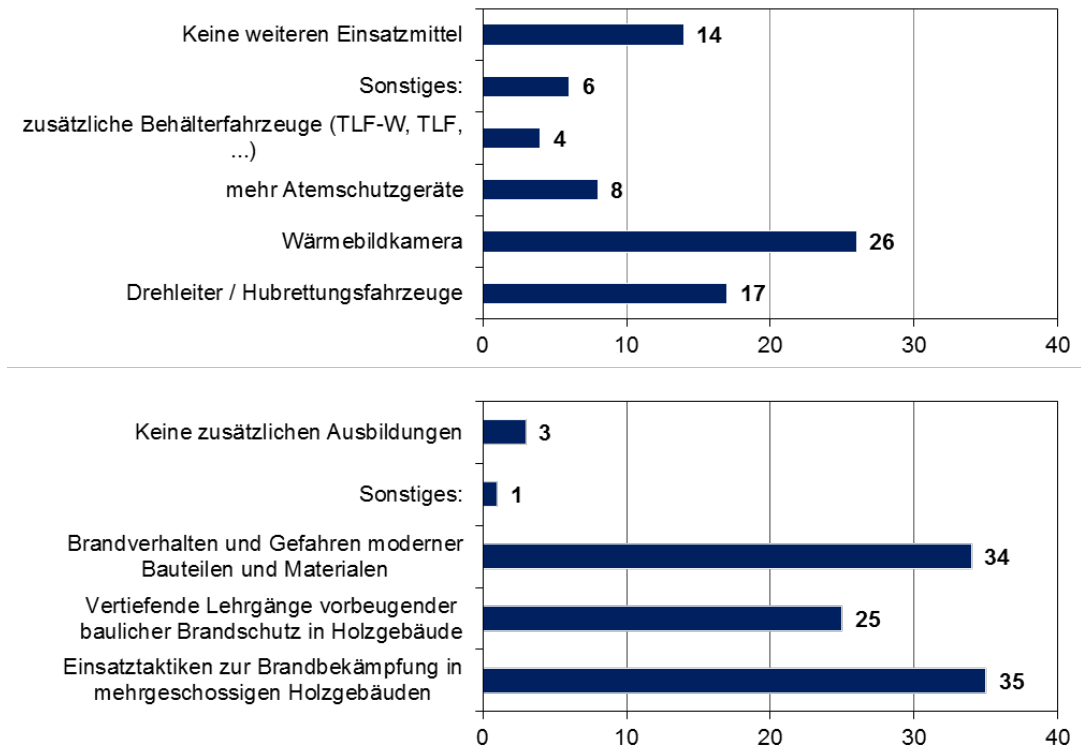


Abbildung 278: Antworten der Berufsfeuerwehren bezüglich zusätzlicher Einsatzmittel und Ausbildungen für die Brandbekämpfung in mehrgeschossigen Holzgebäuden

Das Ergebnis, ob die Feuerwehren den Holzbau befürworten würden, ist in der nachfolgenden Abbildung 279 zu sehen. Darin ist zu erkennen, dass der Holzbau in Deutschland sehr wohl vom überwiegenden Teil der Berufsfeuerwehren befürwortet wird. Lediglich vier Berufsfeuerwehren haben sich gegen die Entwicklung des Holzbaus entschieden und vier haben sich bei der Frage enthalten. Von den 33 Berufsfeuerwehren haben sich 32 für den Holzbau ohne Hohlräume und die Verwendung von ausschließlich nichtbrennbarem Dämmmaterial ausgesprochen. Ebenfalls würden sieben Berufsfeuerwehren den Holzbau mit Hohlräumen und die Verwendung von nichtbrennbarem Dämmmaterial akzeptieren. Jedoch muss darauf hingewiesen werden, dass keiner der 33 Berufsfeuerwehren sich für den Holzbau mit Hohlräumen und brennbaren Dämmungen ausgesprochen hat. Dieses Ergebnis veranschaulicht die geringe Akzeptanz von Hohlräumen in der Konstruktion und die Verwendung von brennbaren Dämmmaterialien bei der Errichtung von Gebäuden in Holzbauweise bei den Feuerwehren. Die Meinung wird auch bei der Bewertung von möglichen auftretenden Gefahren und Folgen für die Brandbekämpfung, die der Holzbau für die Einsatzkräfte mit sich bringt, vertreten. In dieser Bewertung wurde der Holzbau ohne Hohlräume und mit nicht brennbaren Dämmungen tendenziell als positiv bewertet. Mögliche Gefahren und negativen Folgen für Einsatzkräfte werden geringfügig höher oder gleichwertig mit der Brandbekämpfung in einem konventionellen Gebäude eingeschätzt. Besitzt ein Holzgebäude Hohlräume und/ oder werden brennbare Dämmmaterialien verwendet, geht ein Großteil der befragten Feuerwehren von erhöhten Gefahren und Folgen für die Einsatzkräfte aus. Von diversen vorgeschlagenen möglichen Gefahren und Folgen rechnet ein überwiegender Anteil der Befragten mit einen „höheren Kräfteinsatz“ und „längere Einsatzzeiten“.

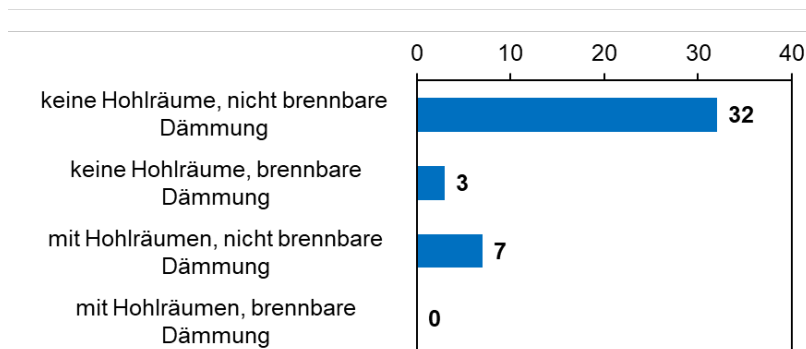
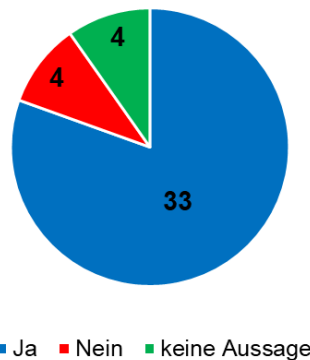


Abbildung 279: Meinungen der Feuerwehren zur Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus in Deutschland (oben) und Aufteilung der Zustimmung zum Holzbau nach den Eigenschaften mit/ ohne Hohlräume und nichtbrennbare/ brennbare Dämmmaterialien (unten)

Es wurde im Rahmen dieser Umfrage nach den Gründen für eine positive oder negative Meinung gegenüber der Entwicklung des Holzbaus in Deutschland gefragt. Ein überwiegender Teil der Berufsfeuerwehren (30 Berufsfeuerwehren), die die Entwicklung des Holzbaus befürworteten, gaben als Begründung den nachhaltigen Bau von Gebäuden an, 15 haben keine Bedenken bezüglich des Brandrisikos oder der Stabilität der Holzgebäude und 16 Berufsfeuerwehren sehen die Entwicklung des Holzbaus als positiv für die Schaffung von Wohnraum an. Von vier Berufsfeuerwehren, die die Entwicklung des Holzbaus ablehnen, sind drei der Meinung, dass die höhere Brandgefahr von mehrgeschossigen Holzgebäuden die Vorteile nicht aufwiegen. Weitere Gründe für die Ablehnung des mehrgeschossigen Holzbaus sind Bedenken bezüglich der Stabilität und den Mehrkosten für vorbeugende Brandschutzmaßnahmen in den Gemeinden sowie dem höheren Einsatzaufkommen im Brandfall.

Das Fazit aus dieser Umfrage bezüglich des Meinungsbildes der Feuerwehren ist, dass die befragten Berufsfeuerwehren überwiegend die Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus befürworteten. Jedoch muss dabei beachtet werden, dass die Feuerwehren Hohlräumen in der Konstruktion eher negativ gegenüberstehen. Zusätzlich ist festzuhalten, dass sie der Verwendung von brennbaren Dämmmaterialien im Holzbau bisher keine Akzeptanz entgegenbringen. Weiterhin zeigt der Fragebogen, dass ein Bedarf im Bereich der Ausbildung besteht. Die Feuerwehren fordern geeignete Ausbildungen, Schulungen und Übungen für die Brandbekämpfung in einem mehrgeschossigen Holzbau. Hier ist besonders die Vermittlung von Wissen im Bereich des Brandverhaltens von Konstruktionen sowie Bauweisen des Holzbaus, die Branddynamik in Räumen mit brennbaren Oberflächen sowie eine vertiefende Ausbildung in Bereichen des vorbeugenden Brandschutzes von Holzgebäuden bereitzustellen. Neben diesen theoretischen Themen werden auch erweiterte praktische Ausbildungen gefordert. Darunter fallen z.B. die fortgeschrittene Handhabung einer Wärmebildkamera, die Nutzung von Rettungskettensägen im Holzbau sowie Sonderausrüstung wie Löschlanzen und Schneidlöschsysteme als mögliche Hilfsmittel bei der Brandbekämpfung von Hohlraumbränden. Ansonsten bewerten die Feuerwehren ihre derzeitigen Einsatzmittel als ausreichend, um eine Brandbekämpfung in einem mehrgeschossigen Holzgebäude vornehmen zu können. Dennoch wären weitere Einsatzmittel wie Wärmebildkameras zur Erkundung von Brandnestern, Arbeitsgerät zur besseren Erreichbarkeit dieser und Sondergeräte wie Löschlanzen oder Schneidlöschsysteme für eine effizientere Brandbekämpfung in Hohlräumen wünschenswert. Der



Wissenstransfer dieser Themen würde die Einsatzkräfte der Feuerwehren nicht nur auf die Brandbekämpfung in Holzgebäuden vorbereiten, sondern bietet auch die Chance Vorurteile abzubauen und eine breitere Akzeptanz für den Holzbau zu erreichen.

3.1.4.3 Evaluierung der abwehrenden Brandschutzmaßnahmen in Bezug auf die erarbeiteten Forschungsergebnisse

Dieses Arbeitspaket hat das Ziel, Maßnahmen auf Grundlage der erarbeiteten Erkenntnisse im Projekt für den abwehrenden Brandschutz aufzuzeigen, damit dieser für die Herausforderungen der Brandbekämpfung in Gebäuden der Gebäudeklasse 5 in Holzbauweise gerüstet ist.

Unter Beachtung der großmaßstäblichen Belegversuche (AP 2.7), hier besonders der Versuch V4, kann festgehalten werden, dass die Feuerwehren mit der Standardausrüstung zur Brandbekämpfung eines Wohnungsbrandes ohne nennenswerte Besonderheiten den Raumbrand schnell löschen konnten. Dieses Ergebnis spiegelt auch die überwiegende Meinung der Feuerwehren bezüglich ihrer vorhandenen Ausrüstung, in der Umfrage (AP 2.2) wider. Darin hat ein überwiegender Teil der teilnehmenden Feuerwehren ihre vorhandene Ausrüstung für die Brandbekämpfung im Holzbau mindestens als ausreichend, die meisten sogar als gut bis sehr gut angegeben. Entsprechend wird für die direkte Brandbekämpfung bei den untersuchten Konstruktionen im Projekt keine spezielle Ausrüstung als notwendig erachtet.

In der Phase nach der eigentlichen Brandbekämpfung eines Wohnungsbrandes in einem Holzgebäude sind Einsatzhilfsmittel, wie Wärmebildkameras und geeignete Werkzeuge für das punktuelle Öffnen von Decken- und Wandkonstruktionen hilfreich, um verdeckte Brandnester darin zu lokalisieren und abzulöschen. Die Empfehlungen zur Verwendung solcher Einsatzmittel im Holzbau werden in der Literaturrecherche (AP 4.1) deutlich. Besonders im Zusammenhang mit der Lokalisierung von möglichen Bränden in Hohlräumen und der Konstruktion wird die intensive Nutzung der Wärmebildkamera hervorgehoben. In den Belegversuchen konnten unmittelbar nach der Brandbekämpfung, Brände in der Konstruktion, zwischen Bauteilanschlüssen sowie in Fugen kaum identifiziert werden. Diese Flächen wurden oftmals erst nach einigen Stunden in der Rückbauphase der Versuche sichtbar. Entsprechend wird empfohlen, die nochmalige Begehung des Brandobjektes, also die Nachschau, frühzeitiger und mehrfach in kleineren Zeitintervallen vorzunehmen. Auf diese Weise lassen sich nochmalige vollumfängliche Einsätze in dem gleichen Objekt vermeiden.

Zusätzlich sollte ein Maßnahmenpaket im Bereich des abwehrenden Brandschutzes darin bestehen, die Lokalisierung solcher Glimm- und Schwelbrände allgemein für Gebäude mit biogenen Baumaterialien weiter zu untersuchen, um Techniken für eine mögliche Vorgehensweise für die Einsatzkräfte herauszuarbeiten. Dieses Wissen sollte dann in Form eines Ausbildungs- und Übungskonzeptes an die Feuerwehren herangetragen werden.

Dreh- und Angelpunkt der Vorbereitung des abwehrenden Brandschutzes in Deutschland zur Brandbekämpfung im Holzbau ist die Wissensvermittlung der Theorie des Holzbaus in den Feuerwehren. Die Literaturrecherche (AP 4.1) hat deutlich gemacht, wie wichtig andere Länder das Wissen über die Konstruktionsweise der Holzgebäude bei den Einsatzkräften der Feuerwehren einschätzen, um eine schnelle und effiziente Brandbekämpfung vornehmen zu können. Auch zeigen Beispiele in der Literatur, dass mit diesem Wissen die Gefahren für die Einsatzkräfte besser eingeschätzt und damit die Sicherheit für die Menschen während der Brandbekämpfung erhöht werden kann. Auswertungen von bereits stattgefundenen Einsätzen in Holzgebäuden zeigen auch auf, dass durch die Kenntnis der Konstruktionsweisen zusätzliche Schäden durch die Feuerwehren am Gebäude vermieden werden können. Dieser Bedarf an Wissensvermittlung bei den Feuerwehren zum Holzbau wird auch anhand der Umfrage (AP 2.2) deutlich, wie in der Abbildung 278 zu sehen ist. Um diesem Bedarf bei den Feuerwehren gerecht zu werden, wird als ein weiteres Maßnahmenpaket die Entwicklung eines Ausbildungskonzeptes mit den Ergebnissen und Erkenntnissen aus dem Projekt TIMpuls für die Feuerweherschulen empfohlen. Dadurch sollte eine schnelle Verbreitung der Informationen gewährleistet werden können.

3.1.5 Arbeitspaket 5 Anlagentechnische Schutzmaßnahmen

3.1.5.1 Löschanlagen

Automatischen Löschanlagen sind fest installierte Brandbekämpfungseinrichtungen, „die – ausgelöst durch Brandfolgeerscheinungen wie Rauch oder Wärme – ihr Löschmittel weitgehend ohne aktive Beteiligung von Personen freisetzen. Sie werden eingesetzt, um einen Brand auf den Entstehungsbereich einzugrenzen, wenn infolge großer Brandabschnitte oder komplexer Gebäudegeometrie ein rechtzeitiges Eingreifen der Feuerwehr fraglich ist und/oder wenn mit einer sehr schnellen Brandausbreitung zu rechnen ist.“ [206].

Löschanlagen werden in unterschiedlichen Ausführungen in Bezug auf verschiedene Schutzziele (Personen- oder Sachschutz) verwendet. Die Löschwirkungen ist abhängig vom verwendeten Löschmittel, seinen Löscheffekten (siehe Abschnitt 3.1.1.6) und den Umständen der Löschmittelzuführung (bspw. Zeitpunkt, Sprühbild, Tropfengröße).

Gaslöschanlagen fluten im Brandfall den zu schützenden Bereich durch die Zugabe von Inertgasen (Stickstoff, Kohlendioxid, Edelgase). Eine Verbrennungsreaktion ist aufgrund einer zu geringen Sauerstoffkonzentrationen nicht mehr möglich. Ein wesentlicher Vorteil des Löschmittels ist, dass vergleichsweise geringe Brandfolgeschäden infolge der Löscharbeiten zu erwarten sind. Allerdings ist aufgrund der Sauerstoffverdrängung in Aufenthaltsräumen von Personen gegebenenfalls eine Auslöseverzögerung erforderlich, um den anwesenden Personen ausreichend Zeit für eine Evakuierung zu geben. In Gebäuden mit Wohnnutzung müssen schlafende Personen im Löschbereich erwartet werden, das Risiko infolge der Sauerstoffverdrängung ist hier unvertretbar hoch. Daher werden Gaslöschanlagen in Rahmen dieses Vorhabens nicht weiter berücksichtigt.

Schaumlöschanlage benötigen sowohl einen Löschwasser-, also auch Schaummittelvorrat. Entsprechend des Verhältnisses von Luft, Wasser und Schaummittel (Verschäumungszahl) werden, Schwer-, Mittel- und Leichtschäum unterschieden. Die Löschwirkung erfolgt einerseits durch die Kühlwirkung, andererseits durch die Bedeckung der Brandfläche mit Schaum, wodurch die Sauerstoffzufuhr und das Ausgasen des Brandgutes begrenzt werden. Schaumlöschanlagen werden daher im Bereich von Lagern und zum Löschen von Flüssigkeiten eingesetzt. Der Einsatz von Netzmittel im Löschwasser reduziert dessen Oberflächenspannung. Das Löschwasser kann tiefer in das Brandgut eindringen, ein Vorteil insbesondere bei porösen und verkohlten Oberflächen wie Holz. Allerdings wird aufgrund der geringen Aufschäumung kein Stickeffekt wirksam, daher sollte es von Schaummitteln differenziert betrachtet werden. Sowohl Schaum- als auch Netzmittel müssen bei der Beurteilung der Brandfolgeschäden und Sanierbarkeit als kontaminierende Stoffe berücksichtigt werden.

Wasserlöschanlagen nutzen Wasser als Löschmittel und werden aufgrund der unterschiedlichen Anordnung und Ausführung ihrer Düsen (Sprühbild, Tropfengröße) und ihrer Wasserversorgung (Durchfluss, Betriebsdruck) in weitere Anlagentypen wie Sprühwasserlöschanlage, Nieder- und Hochdrucknebellöschanlage sowie klassische Sprinkleranlagen untergliedert. Sprühwasserlöschanlagen bedienen verfügen über Auslöseelemente mit offenen Löschdüsen und fluten im Brandfall den Löschbereich. Sie werden im Objektschutz, beispielsweise bei Großbühnen, eingesetzt.

Sprinkleranlagen und Wohnraumsprinkler

Sprinkleranlagen sind die üblichste Form einer Wasserlöschanlage. Abhängig von der Auslösetemperatur der Sprinkler (Tabelle 40) platzt die Ampulle im Sprinklerkopf, das Wasser tritt aus und wird dem Sprühbild des Sprinklers entsprechend im Auslösebereich verteilt. Der Brand wird durch das austretende Wasser begrenzt oder gelöscht. Sprinkleranlagen wird eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 2 % (VdS/CEA Standard) [3] und ein Löscherfolg von über 90 % zugesprochen. 65 % der gemeldeten Brände wurden mit nur zwei ausgelösten Sprinklern und 77 % mit bis zu fünf Sprinklern unter Kontrolle gehalten [207].

Tabelle 40: Farbe der Flüssigkeit im Sprinkler und Nennauslösetemperatur nach DIN EN 12259-1 [208]

Farbe der Sprinklerampulle	Nennauslösetemperatur
Orange	57 °C
Rot	68 °C
Gelb	79 °C
Grün	93 °C
Blau	141 °C
Mauve	182 °C

Die jeweilige Nennauslösetemperatur wird von dem in der Ampulle eingeschlossenen Verhältnis von Luft zu Flüssigkeit bestimmt. Entsprechend DIN EN 16925 [209] müssen in Wohnbereichen Sprinkler mit Nennauslösetemperaturen von 57 °C bis 107 °C installiert werden, bei höheren Deckentemperaturen sind abweichend 79 °C bis 107 °C möglich.

Aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Sprinklerampulle, der Sprinklerdüse, des Leitungsnetzes und des darin enthaltenen Löschwassers, löst ein Sprinkler nicht unmittelbar aus, sobald die ihn umgebende Raumtemperatur die Nennauslösetemperatur erreicht. Die Auslösegeschwindigkeit, bzw. der Trägheitsindex eines Sprinklers wird „Response Time Index“ (RTI-Wert) genannt und ist das Maß für die thermische Ansprechempfindlichkeit des Sprinklers. Je niedriger der RTI-Wert, desto schneller erfolgt die Auslösung.

Bei einer zu erwartenden, schnellen Brandausbreitung sowie für Bereiche mit hoher Personengefährdung, empfehlen sich schnell auslösende Sprinkler ($RTI < 50 \text{ ms}^{1/2}$). Die Literaturrecherche zu anlagentechnischen Schutzmaßnahmen in internationalen Großbrandversuchen mit Holzbauweisen im folgenden Abschnitt bestätigt, dass eine Auslösung der Sprinkleranlage und die frühzeitige Brandbekämpfung in Räumen in Holzbauweise für den Löscherfolg maßgebend sind. Für die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Sprinkler als Wohnraumsprinkler in mehrgeschossigen Gebäuden, wird daher die Ausführung von Auslöseelemente mit kleinen Ampulldurchmesser empfohlen.

Historisch hat sich die Verwendung von Sprinkleranlagen vor allem bei Industrie- und Lagerflächen, zum Schutz wertvoller Sachgüter, entwickelt. Die Planung, der Einbau und die Bemessung von Sprinkleranlagen als selbsttätige Feuerlöschanlage für öffentliche Gebäude oder Industrieanlagen hat entsprechend der MVV TB (Anhang 14, Abschnitt 10.4.2) [186] nach DIN EN 12845:2016-04 [210] zu erfolgen. Für diese Systeme bestehen erhöhte Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Wasserversorgung. Aufgrund der daraus resultierenden Investitions- und Wartungskosten sowie dem zusätzlichen Platzbedarf erfolgt der Einsatz von Sprinkleranlagen in Wohngebäuden in Deutschland sehr selten. In den USA [211], aber auch Nordeuropa und der Schweiz haben sich in den letzten Jahrzehnten reduzierte und kostengünstigere Sprinkleranlagen, sogenannte „residential sprinkler / Wohnraumsprinkler“, zur Verwendung in Wohnhäusern entwickelt. In Neuseeland finden anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen in der Bauordnung unmittelbare Berücksichtigung, Wohnraumsprinkler als Direktanschluss an das Trinkwassernetz sind zulässig [223]. Anstelle der klassischen Löschwasserspeicher und des Pumpensystems zur Förderung des Löschwassers zur Sprinklerdüse, werden Wohnraumsprinkler an die lokalen (Trink-)Wassernetze im Hausanschlussraum (HAR) direkt angeschlossen. Der im HAR anliegende Leitungsdruck kann ggf. durch eine Druckerhöhungsanlage erhöht werden, ein Löschwasserspeicher wäre für dieses System nicht notwendig.

Das in den Leitungen der Sprinkleranlage dauerhaft stehende Löschwasser wird entsprechend DIN EN 1717 [213] in die Flüssigkeitskategorie 5 eingestuft. DIN EN 1717 legt europaweit einen einheitlichen Standard für die Trinkwasser-Installation zur Absicherung des Trinkwassers gegen Nichttrinkwasser fest. Flüssigkeiten der Kategorie 5 sind eine Gesundheitsgefährdung für Menschen durch die Anwesenheit von mikrobiellen oder viralen Erregern übertragbarer Krankheiten. Entsprechend Abbildung 281/Abbildung 280 sind Übergabestelle vom lokalen Trinkwassernetz in das Leitungsnetz der Löschanlage mit freien Ausläufen (AA, AB, AD, siehe Abbildung 280) zu sichern.

		Flüssigkeitskategorie				
Sicherungseinrichtung		1	2	3	4	5
AA	Ungehinderter freier Auslauf	*	●	●	●	●
AB	Freier Auslauf mit nicht kreisförmigem Überlauf (uneingeschränkt)	*	●	●	●	●
AC	Freier Auslauf mit belüftetem Tauchrohr und Überlauf	*	●	●	-	-
AD	Freier Auslauf mit Injektor	*	●	●	●	●
AF	Freier Auslauf mit kreisförmigem Überlauf (eingeschränkt)	*	●	●	●	-
AG	Freier Auslauf mit Überlauf durch Versuch mit Unterdruckprüfung bestätigt	*	●	●	-	-
BA	Rohmetzrenner mit kontrollierbarer Mitteldruckzone	●	●	●	●	-
CA	Rohrtrenner mit unterschiedlichen, nicht kontrollierbaren Druckzonen	●	●	●	-	-

Abbildung 280: Schutzmatrix der Sicherheitseinrichtungen und der zugeordneten Flüssigkeitskategorien [213]

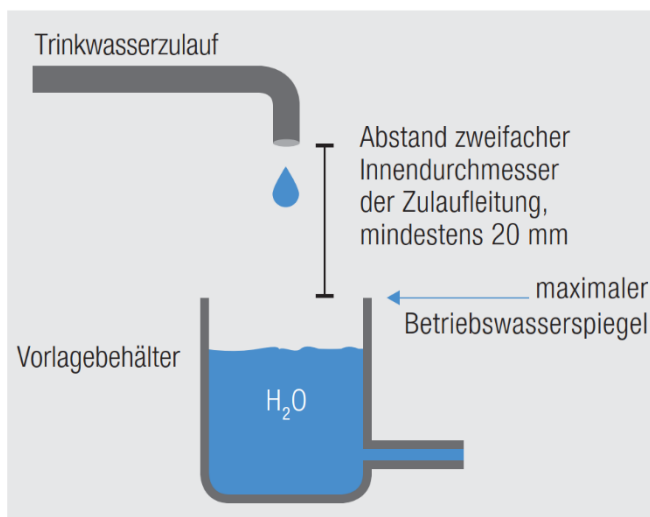


Abbildung 281: Schematische Darstellung des freien Auslaufs mit Vorlagebehälter (Bild: DVGW e.V)

Die DIN 1988-100 [214] legt zusätzlich zur DIN EN 1717 nationale Grundlagen zum Absichern von Trinkwasser gegen Flüssigkeiten bis zur Kategorie 5 fest. Entsprechend Abbildung 282 ist ein Direktanschluss von Wasserlöschanlagen mit geschlossenen Düsen an die Trinkwasserinstallation über eine Direktanschlussstation möglich. Die angeschlossenen Wasserlöschanlagen müssen den Anforderungen nach beispielsweise DIN 14489, DIN 14495, DIN EN 12845 [210], DIN CEN/TS 14816 sowie VdS CEA 4001 [226] und VdS 2109 entsprechen, der Trinkwasserzufluss darf ausschließlich im Brandfall erfolgen und der Auslegungsvolumenstrom ist auf 50 m³/h zu begrenzen. Die Direktanschlussstationen entleeren eine Teilstrecke des Leitungssystems, während der nachgelagerte Leitungsteil dauerhaft stagniert. Im Brandfall wird die Entleerung der Direktanschlussstation geschlossen und die Nachspeisung von Wasser aus dem Trinkwassernetz freigegeben.

DIN 1988-100 [214] weist explizit darauf hin, dass die öffentliche Trinkwasserversorgung in erster Linie der Versorgung der Bevölkerung mit hygienisch einwandfreiem Trinkwasser dient. In bestimmten Fällen kann der Löschwasserbedarf für den Objektschutz aus der Trinkwasserversorgung gedeckt werden. Ob dies möglich ist, kann nur durch das örtliche Wasserversorgungsunternehmen ermittelt werden. Abstriche bei der Aufrechterhaltung der Trinkwasserhygiene können nicht akzeptiert werden. In diesen Fällen müssen andere Lösungen für die Löschwasserversorgung gefunden werden. Dazu sind dem Wasserversorgungsunternehmen alle relevanten Planungsunterlagen zur Verfügung zu stellen und konkrete Angaben zum Löschwasserbedarf zu machen. Für die Bereitstellung von Löschwasser aus dem Trinkwassernetz ist in jedem Einzelfall die Zustimmung des Wasserversorgungsunternehmens einzuholen.

Übergabestelle	Anlagentyp						
	Anlagen mit zusätzlicher Einspeisung von Nichttrinkwasser, z. B. Löschmittelzusätze	Löschwasseranlagen „nass“ nach DIN 14462 mit Wandhydrant	Löschwasseranlagen „nass/trocken“ nach DIN 14462 mit Wandhydrant	Trinkwasser-Installation mit Wandhydrant Typ S nach DIN 14461-1	Feuerlösch- und Brandschutzanlage mit offenen Düsen, z. B. Sprühwasserlöschanlage	Wasserlöschanlage mit geschlossenen Düsen, z. B. Sprinkleranlage	Anlagen mit Unter- und Überflurhydranten nach DIN 14462
Freier Auslauf Typ AA, AB nach DIN EN 1717	X	X	X ^b	—	X	X	X
Füll- und Entleerungsstation nach DIN 14463-1	—	—	X ^b	—	—	—	X ^{b,d}
Füll- und Entleerungsstation nach DIN 14463-2	—	—	—	—	X ^b	—	—
Direktanschlussstation nach DIN 14464	—	—	—	—	X ^a	X ^a	—
Schlauchanschlussventil 1“ mit Sicherungseinrichtung nach DIN 14461-3	—	—	—	X ^c	—	—	—
Entnahmeeinrichtung für Über- und Unterflurhydranten nach DIN EN 14339 und DIN EN 14384	—	—	—	—	—	—	X ^{c,d}

^a Einschränkungen nach 4.3 beachten.
^b Spitzenvolumenstrom in der Füllphase beachten.
^c Bei ausreichend durchflossenen Trinkwasser-Installationen geeignet, siehe 4.2.1.
^d Entnahmesicherung siehe DVGW W 405-B1.

Abbildung 282: zulässige Anschlussarten an der Löschwasserübergabestelle DIN 1988-600 [214]

Zuverlässigkeit von Sprinkleranlagen und Wohnraumsprinklern

Es ist fraglich, inwiefern Statistiken von Sprinkleranlagen für Industrie- und Gewerbebetriebe auf Wohnraumsprinkler übertragen werden können. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die Zuverlässigkeit von Löschanlagen erfahrungsgemäß sowohl von der Qualität des Produktes als auch der Prozesse (Prüfung und Anerkennung von Produkten/System, Planung, Installation und Instandhaltung von Anlagen) maßgeblich beeinflusst wird. Bei einer Vereinfachung vom Designe der Löschanlagen einschließlich der Reduzierung der Anlagenbemessung sollte deshalb sowohl die Wirksamkeit nachgewiesen als auch die Zuverlässigkeit sichergestellt werden, ggf. durch Löschversuche und entsprechende Festlegungen zu Prozessqualität.

Bei Sprinkleranlagen für Industrie- und Gewerbebetriebe sind die Produkt- und Prozessqualität zudem bauaufsichtlich nur begrenzt geregelt. Erschwert kommt hinzu, dass der Einsatz vom Wohnraum-Sprinkler in Deutschland noch nicht verbreitet ist, weshalb umfangreiche Statistiken derzeit nicht existieren.

Wassernebellöschanlagen

Wassernebellöschanlagen entsprechen im grundlegenden Aufbau und ihren Merkmalen den klassischen Sprinkleranlagen. Ausgestattet mit Glasfassauslöseelementen produzieren sie mithilfe von Sprinklerdüsen und Druck im Brandfall einen feinen Wassernebel, siehe Abbildung 283.

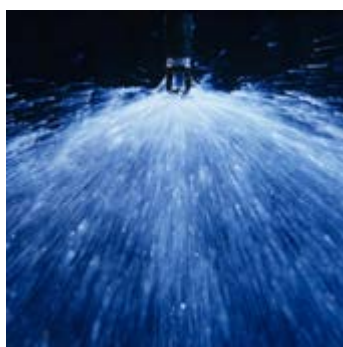


Abbildung 283: mögliche Wasserverteilung bei Sprinkleranlagen (links, Bild: Minimax GmbH) und Wassernebellöschanlagen (rechts, Bild: FOGTEC Brandschutz GmbH)

Der geringe Tropfendurchmesser im Wassernebel resultiert in eine größere, spezifische Wassertropfenoberfläche, was die Löschwirkung begünstigt. Kleine Tropfen erwärmen sich schneller als große und entziehen dem Brand seine Wärme, mit weit weniger Wassereinsatz als herkömmliche Sprinkleranlagen.

Dies ist jedoch nur gegeben, wenn die Tropfen die Reaktionszone erreichen. Maßgebend sind diesbezüglich die Ventilationsbedingungen, da kleine Tropfen leichter abgelenkt werden können als größere Tropfen sowie die kinetische Energie des Düsenkopfes, der Ausrichtung auf das Feuer und der Raumgeometrie. Der geringere Tropfendurchmesser und die Nebelbildung sind insbesondere bei Flüssigkeitsbränden vorteilhaft, da weniger Brandgut aufgeworfen wird. Wassernebellöschanlagen können unter Berücksichtigung ihres Betriebsdrucks unterschieden werden in Nieder- (bis ca. 12 bar), Mittel- (bis ca. 35 bar) sowie Hochdruckanlagen (mehr als 35 bar). Ein höherer Betriebsdruck resultiert in kleinere Tropfengrößen und einen geringeren Wasserverbrauch. Sowohl die Niederdruck- als auch die Hochdruckanlage eignen sich aufgrund des geringeren Löschwasserbedarfs sehr gut für den Einsatz im Holzbau. Ein geringerer Löschwasserbedarf ist maßgebend für den Umfang der Brandfolgeschäden.

An der Forschungsstelle für Brandschutz in Karlsruhe wurde der Einsatz von Wassernebellöschanlagen zur Verhinderung der Brandausbreitung innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe untersucht [215], [216]. Die Brandversuche erfolgten mit Niederdruckwassernebellöschanlagen, die über einen Hauswasseranschluss (minimaler Betriebsdruck 4 bar) betrieben werden könnten. Die Brandentstehungsphase wurde nicht berücksichtigt, die Brände der unbekleideten Holztreppe konnten mithilfe der Wassernebellöschanlagen erfolgreich gelöscht werden. Es wurde außerdem festgestellt, dass der Löschwasserverbrauch und die Löschwasserschäden insbesondere durch Löscharbeiten im Intervall (kurze Pausen während des Löschvorgangs) reduziert werden. Maßgebend für den Löscherfolg ist eine schnelle Auslösung der Löschanlage.

In [217], [218] wurde der Anwendungsbereich für Wassernebellöschanlagen und die notwendigen Löschwassermengen weitergehend untersucht. Im Wesentlichen wurde dokumentiert, dass Wassernebellöschanlagen aufgrund ihrer gleichmäßigen Wasserverteilung weniger Löschwasser benötigen, als Sprinkler mit einem Löschbereich in Form von Hohlkegeln. Allerdings bildete sich bei den Wassernebellöschanlagen mehr Wasserdampf aus, was zu größeren Sichteinschränkungen gegenüber den Sprinklern führte. Niederdruckwassernebellöschanlagen (4 bis 8 bar) wurde ein größerer Löscherfolg als bei Hochdruckwassernebellöschanlagen (80 bis 135 bar) festgestellt, was auf die größere Wassertropfen und den größeren Löschwasserdurchfluss zurückgeführt wurde. Die Brandlasten (Holzkrippen und Möbel) wurden wirksam gelöscht, ein zeitlich verzögertes Auslösen der Anlagentechnik begünstigte die Bildung von Glutnestern.

In [219] wurde die Anwendung von Sprinkler- und Wassernebellöschanlagen in Holzhochhäusern verglichen. Die Bewertung der Löschwassermenge, Löschzeit und des Extinktionskoeffizienten sowie die Angaben zur Löschwirkung beziehen sich dabei auf die hier erwähnten Untersuchungen mit Holztreppen [215], [216], [217]. Die Anlagenbewertung erfolgte durch den Verfasser dieses Arbeitspaketes und es ist geplant im Rahmen weiterer Untersuchungen eine Abfrage und Bewertung der Kriterien in den Fachkreisen vorzunehmen.

Auf das Ergebnis der Bewertung wirkte sich insbesondere die jeweils notwendige Löschwassermenge entscheidend aus. Empfohlen wurde eine Hochdruckwassernebellöschanlage, da sie über den geringsten Löschwasserbedarf verfügt, dementsprechend weniger Platz für die Wasserspeicher benötigt und kleinerer Leitungsdurchmesser bedarf. In [219] wird dargelegt, dass im Kontext des Hochhauses in Holzbauweise, unter Berücksichtigung einer Wirkfläche von 72 m² und einer Wirkdauer von 60 min, eine klassische Sprinkleranlage ungefähr 30.000 Liter Wasser benötigt, die bevorratet werden müssen. Eine Hochdruckanlage benötigt für die gleiche Wirkfläche etwa 4.500 Liter Wasser. Der zu erwartende Wässerschaden einer ausgelösten Löschanlage ist bei einer Hochdruckanlage daher erheblich geringer.

3.1.5.2 Recherche zu anlagentechnischen Schutzmaßnahmen in internationalen Großbrandversuche mit Holzbauweisen

In Tabelle 38 (Arbeitspaket 3 Nachbrand und Löschverhalten) sind internationale Großbrandversuchen mit Räumen in Holzbauweisen in Bezug auf die Untersuchung des Nachbrandverhaltens aufgeführt. Im Folgenden wird auf eben diese Großbrandversuche in Bezug auf die Untersuchung von Löschanlagen eingegangen.

Die Großbrandversuche von Frangi & Fontana (Tabelle 38, Zeile C) [220] untersuchen unter anderem die Wirkung von Sprinkleranlagen in der Brandentwicklungsphase. Der zweigeschossige Versuchsaufbau in Holztafelbauweise hatte Abmessungen von ca. 6,6 m x 3,1 m x 2,8 m, siehe Abbildung 284 (links). Von den sechs Brandversuchen wurden drei mit Sprinkleranlage und drei ohne Sprinkleranlage durchgeführt, siehe Abbildung 284 (rechts). Die Brandlastdichte in den Versuchen mit Sprinkleranlage betrug 365 MJ/m². Das Auslösen der Sprinkleranlage (Auslösetemperaturen 57 °C und 68 °C) erfolgt planmäßig in der Brandentwicklungsphase nach ca. 2 bis 4 Minuten und konnte in allen drei Versuchen einen Flashover verhindern.



Fire test	Time of mattress ignition [min]	Sprinkler on the ceiling Θ_a [°C] ^a t_a [min] ^b	Sprinkler on the wall Θ_a [°C] ^a t_a [min] ^b	Fire detection systems (FDS) Measured detecting time [min]			
				FDS 1	FDS 2	FDS 3	FDS 4
BE bb g	ca. 01'50"	57°C 2'45"	68°C (air) -	00'21"	00'33"	01'02"	01'27"
BE bb o I	ca. 02'00"	68°C 03'03"	68°C (air) -	00'30"	00'33"	01'15"	01'46"
BE bb o II	ca. 01'20"	57°C (air) 02'01"	68°C 02'15"	00'33"	00'36"	00'50"	01'19"

^a Θ_a : activating temperature of sprinkler
^b t_a : measured activating time of sprinkler

Abbildung 284: Versuchsaufbau (links) und Ergebnisse mit Sprinkleranlagen (rechts) [220]

In einer Versuchsreihe von Peng et al. (Tabelle 38, Zeile H) [221] wurden Brandversuche in einem alten Gebäude durchgeführt. Die Versuchsbedingungen variieren, es wurden unterschiedliche Brandlasten, deren Anordnung und der Einbau einer Zwischendecke untersucht. In einem Brandversuch mit Abmessungen von ca. 3,0 m x 5,7 m x 3,0 wurde eine Sprinkleranlage verwendet, siehe Abbildung 285. Die exakten Bauteilaufbauten sind nicht nachvollziehbar veröffentlicht. Die Brandraumdecke war mit Gipsplatten bekleidet („plaster board ceiling“), die Wände wurden in Holzbauweise ausgeführt („wooden walls“). Die Sprinkleranlage löste nach 800 Sekunden bei einer Temperatur von 190 °C aus und löschte den Brand vollständig (Test 1-A in Abbildung 286).

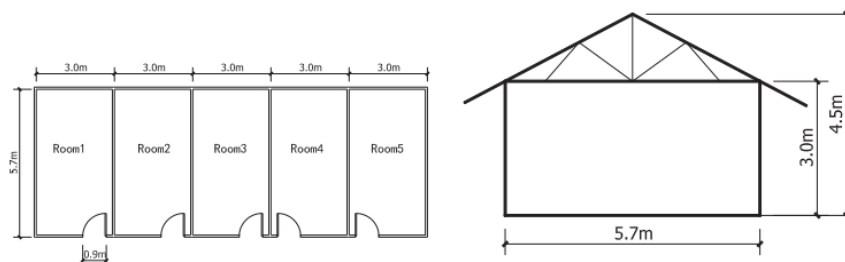


Abbildung 285: Grundriss (links) und Schnitt (rechts) des Versuchsaufbaus [221]

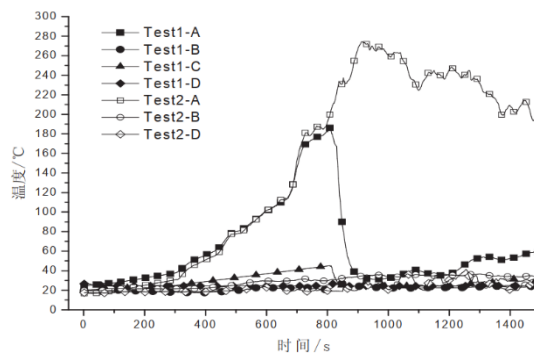


Abbildung 286: Brandraumtemperaturen der Brandversuche [221]

Hox (Tabelle 38, Zeile P) [222] hat in einem Brandraum mit 5,7 m x 2,3 m x 2,7 m, mit Mischbrandlasten von 8.708 MJ aus Möbeln, Holzkrippen und Gasbrennern, zwei Brandversuche durchgeführt. Ein Brandversuch wurde mit und einer ohne Sprinkleranlage durchgeführt. Die Sprinkleranlage wurde gemäß NS-EN 12485 321[223] OH1 ausgeführt, die Sprinklerköpfe waren vom Typ Viking VK432 $k = 5,5$ mit einem k -Faktor von 79. Es wurden zwei Sprinklerköpfe im Brandraum sowie weitere im angrenzenden Flur im Abstand von 3 m angeordnet, siehe Abbildung 287. Der Betriebsdruck am ungünstigsten Sprinkler entsprach dem Mindestdruck gemäß NS-EN 12845 von 0,35 bar. Dies ergibt einen Wasserdurchfluss von 46,7 l/min und bei gleichmäßiger Wasserverteilung eine Wasserbeaufschlagung von 5,2 mm/min. Der Sprinkler, der dem Feuer am nächsten war, löste nach 1:59 Minuten aus. Die Raumtemperatur in Deckennähe betrug zu diesem Zeitpunkt ungefähr 130 °C. Im Brandversuch ohne Sprinkler ging der Brand nach ca. 8:30 Minuten in den Vollbrand über. Infolge des Auslösens der Sprinkleranlage kühlten die Brandraumtemperaturen unmittelbar ab, der zweite Sprinklerkopf im Brandraum löste nicht aus. 40 Sekunden nach dem Auslösen des Sprinklers brennen nur noch Brandlasten unterhalb eines Schreibtisches, da dieser eine direkte Wasserbeaufschlagung verhindert. Nach 9 Minuten wird der Brandversuch beendet und das verbleibende Feuer unter dem Schreibtisch manuell gelöscht.

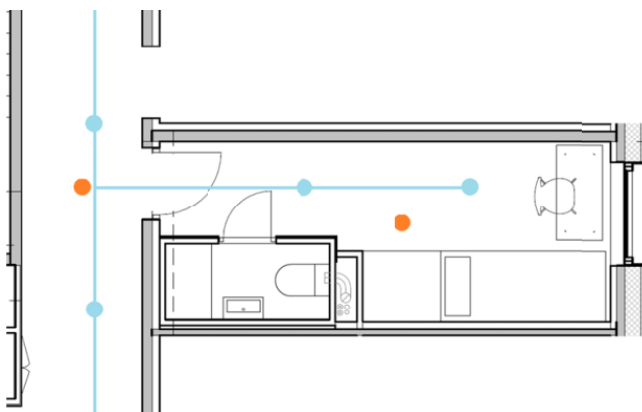


Abbildung 287: Grundriss des Brandraums und des angrenzenden Flurs (links), Brandraum mit Mischbrandlasten (rechts) [222]

Zelinka et. al. (Tabelle 38, Zeile U) [123] führten fünf Großbrandversuche in zweigeschossigen Apartmентаufbauten durch. Die Apartments hatten eine Grundfläche von ca. 9,1 m x 9,1 m, die Geschosshöhe betrug jeweils 2,74 m. Alle Wände und Decken bestanden aus 175 mm 5-lagigen Brettsperrholz. Als Brandlasten wurden Möbel und Holzkrippen (siehe Abbildung 288) mit einer Brandlastdichte von ca. 550 MJ/m² verwendet. In zwei Versuchen wurden Sprinkleranlagen eingesetzt. In diesen beiden Versuchen wurden jeweils die vollständige Decke und eine Wand je Raum unbekleidet ausgeführt. Es wurden vier hängende Deckensprinkler (Globe GL3010, $k=43.2$, 68.4 °C) und fünf Wandsprinkler (Tyco TY1334 Rapid Response, $k=60.6$, 68.4 °C) verwendet, die Verteilung und Einbau der Düsen ist in Abbildung 289 dargestellt.

Entsprechend der Dokumentation [123] wurde die Sprinkleranlage entsprechend National Fire Protection Association (NFPA) Standard 13 [224] mit einer Wasserbeaufschlagung von 20 mm/min bzw. 0,5 gpm/ft² (LH, light hazard / kleine Brandgefahr) ausgeführt. Es wird erläutert, dass „This design density is less than that which would be required by code for this type of structure and can be conservatively applied to code-compliant tall mass timber construction.“ [123], was unter Berücksichtigung der Anforderungen nach [224] (siehe Abbildung 290) nicht nachvollzogen werden kann, da 20 mm/min eine sehr hohe Wasserbeaufschlagung darstellt.

Im ersten Brandversuch mit Sprinkleranlage (Test 4) löste die Anlage selbstständig nach 2:37 Minuten aus und verhinderte einen Flash-Over sowie eine Flammenausbreitung. Im zweiten Brandversuch mit Sprinkleranlage (Test 5) wurde diese manuell gesteuert und nach 23 Minuten ausgelöst. Ein Teil des Apartments befand sich zu diesem Zeitpunkt im Vollbrand und wurde durch die Sprinkleranlage gelöscht.



Abbildung 288: Mischbrandlasten in „Living room“ (links) und „Bedroom“ (rechts) [123]

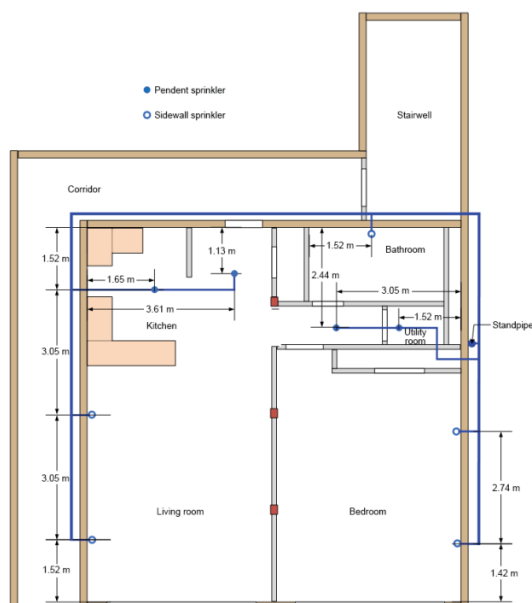


Abbildung 289: Grundriss des Brandversuchs mit Anordnung der Sprinklerdüsen (links) und Sprinklerdüse (rechts) [123]

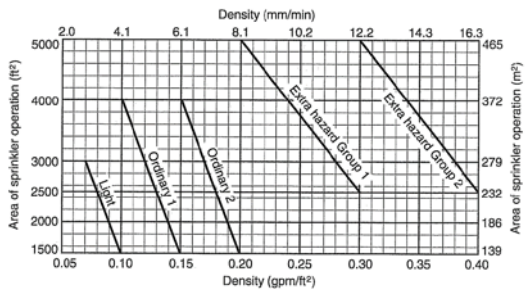


Abbildung 290: Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit der Wirkfläche entsprechend [224]

Zusammenfassend wurde festgestellt, dass der Einfluss von Sprinkler- und anderen Löschanlagen auf die Holzmassiv- und Holztafelbauweise in den Großbrandversuchen nicht ausreichend erforscht wurde. Nur in vier der insgesamt 23 betrachteten Großbrandversuche wurden Sprinkleranlagen berücksichtigt. Das Auslösen der Sprinkleranlage innerhalb der ersten Versuchsminuten konnte stets einen Flashover vermeiden, die Wärmefreisetzungsrates wurde reduziert und der Brand kontrolliert. In den Bereichen, die nicht direkt durch eine Wasserbeaufschlagung abgedeckt werden, besteht die Gefahr einer lokalen Flammenbildung und die Notwendigkeit manueller Löscharbeiten.

3.1.5.3 Hydraulische Bemessung von Wohnraumsprinkler im mehrgeschossigen Holzbau

In diesem Abschnitt wird die hydraulische Berechnung für Sprinkleranlagen in mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise durchgeführt. Die Ergebnisse dienen als Grundlagen zur Berücksichtigung von Löschanlagen in den resultierenden Brandschutzkonzepten im Arbeitspaket 6 Risikoanalyse und Bewertung.

Für die Löschanlagen werden der erforderliche Betriebsdruck und der Löschwasserbedarf ermittelt. Die Berechnungen erfolgen für die ungünstigste Löschfläche, in Abhängigkeit der Rohrkonfiguration und basierend auf der höchstmöglichen Anzahl gleichzeitig ausgelöster Sprinklerdüsen.

Entsprechend MVV TB [186] (Anhang 14, Abschnitt 10.4.2) ist die Planung, der Einbau und die Bemessung von Sprinkleranlagen als selbsttätige Feuerlöschanlage nach DIN EN 12845 [210] zu erfolgen. In den folgenden Tabellen werden weiterhin die Anforderungen nach DIN EN 16925 [209] und VdS 2896 [225] für die Ausführung automatischer Sprinkleranlagen für Wohnbereiche dargestellt. Die hydraulische Bemessung der Sprinkleranlagen erfolgt entsprechend der genannten Regelwerke.

Tabelle 41: Anlagentypen und Mindestauslegungskriterien nach DIN EN 16925 [209]

Anlagentyp	Anwendung	minimale Wasserbeaufschlagung ^d mm/min	Anzahl der Auslegungssprinkler ^{e,f}	Mindestbetriebszeit min
1	Ein- und Zweifamilienhaus, Fertighaus, Bed and Breakfast	2,1	1 bis 2	10
2	Wohnblock ^a , Haus mit mehreren Wohnungen und gemeinsam genutzten Einrichtungen ^{a,b} , Pflegeheim ^{a,c} , Tageseinrichtung für Kinder und Erwachsene ^{a,c} , Studentenwohnheime ^a	4,1	1 bis 4	30
3	Pflegeheime ^a , Kleine Hotels und Herbergen ^a	2,1 bis 4,1	2 bis 4	30

^a auf bis zu vier Geschosse oder 18m Höhe beschränkt
^b gemeinsam genutzte Einrichtungen sind Waschräume und/oder Küchen und Wohnzimmer
^c höchstens 10 Bewohner
^d für einige Länder kann ein nationaler Anhang mit Hinweisen zur minimalen Wasserbeaufschlagung für jede Anlagenart vorliegen.
^e die Anzahl der Auslegungssprinkler muss durch die höchstmögliche Anzahl der Sprinkler in allen Räumen, bis zu der in der Tabelle angegebenen höchstmöglichen Anzahl, bestimmt werden
^f für einige Länder kann ein nationaler Anhang mit Hinweisen zur üblichen Anzahl von Auslegungssprinklern für jede Anlagenart vorliegen.

Anmerkung: In Deutschland ist eine Anwendung der DIN EN 16925 [209] für Gebäudehöhen über 18m nicht vorgesehen.

Entsprechend der VdS-Richtlinie 2896 [225] für Sprinkleranlagen in Wohnbereiche werden Mindestanforderungen für die Wasserbeaufschlagung und Betriebszeiten der Wasserversorgung gemäß Tabelle 42 festgelegt.

Tabelle 42: Auslegungsparameter und Mindestanforderungen entsprechend VdS 2896 [225]

Gebäudetyp (siehe Tabelle 41)	Mindestwasserbeaufschlagung mm/min	Betriebszeit min	Maximale Anzahl zu berücksichtigender Sprinkler	Minstdruck am ungünstigsten Sprinkler	Minstdurchfluss je Sprinkler
1	2,25	10	max. 4 Sprinkler	K57: 0,7 bar K80: 0,35 bar	68 l/min an jedem Sprinkler bei Ansprechen eines einzigen Sprinklers 49 l/min an jedem Sprinkler bei gleichzeitigem Ansprechen
2	2,25	30	max. 4 Sprinkler für Räume ≤ 72 m ²		
3	5,0	30	max. 6 Sprinkler für Räume > 72 m ²		

Tabelle 43: Gebäudetypen entsprechend VdS 2896 [225]

Gebäudetyp	Beschreibung
1	Gebäude, die nicht permanent Personen beherbergen, die zum Verlassen des Gebäudes Hilfe benötigen und Gebäude die somit kategorisiert werden können, als: <ul style="list-style-type: none"> - Ein- und Zweifamilien Wohnstätten, - Wohngebäude mit nicht mehr, als vier Wohnungen, bis maximal drei Geschosse in Höhe und einem Kellergeschoß.
2	Gebäude für Wohnzwecke, mit maximal vier Geschossen und einem Kellergeschoß, ausgenommen Gebäude, die permanent Personen beherbergen, die zum Verlassen des Gebäudes Hilfe benötigen.
3	Wie Gebäudetyp 2, jedoch welche permanent Personen beherbergen, die zum Verlassen des Gebäudes Hilfe benötigen.

Die Schutzflächen von Wohnraumsprinklern sind entsprechend DIN EN 16925 [209] und VdS 2896 [225] den Einbauanweisungen, bzw. der Anerkennung des Herstellers zu entnehmen. Bei fehlenden Angaben können die Schutzflächen entsprechend Tabelle 44 verwendet werden.

Tabelle 44: Maximale Schutzflächen je Sprinkler nach DIN EN 12845 [210] und VdS 4001 [226]

Richtlinie		Maximale Schutzfläche je Sprinkler
VdS 2896 (Deckensprinkler)	Gebäudetyp 1 und 2	21 m ²
	Gebäudetyp 3	12 m ²
DIN EN 16925		37,2 m ² (NA, bzw. Fußnote N2 S.42)

Konventionelle Sprinkler werden vorrangig in Sonderbauten, Lager- und Industriegebäude ausgeführt. Die Bestimmung der Mindestwasserbeaufschlagung erfolgt in Abhängigkeit von Brandgefahrenklassen. Unterschieden werden kleine Brandgefahr (LH - light hazard), welche nichtindustrielle Nutzungen mit geringer Brandbelastung und Brennbarkeit, bspw. Schulen und Büros, umfasst. Die einzelnen Bereiche, müssen mindestens mit feuerhemmenden Bauteilen ausgebildet werden. Jeder einzelne ausgebildete Bereich darf dabei nicht größer als 126 m² sein. Die mittlere Brandgefahr (OH - ordinary hazard) und hohe Brandgefahr (HHP - high hazard process, HHS – high hazard storage) berücksichtigen herstellende, verarbeitende und lagernde Betriebe. Die entsprechend DIN EN 12845 [210] und VdS 4001 [226] für konventionelle Sprinkleranlagen bestimmten Auslegungskennwerte sind in Tabelle 45 dargestellt.

Tabelle 45: Sprinklerarten und K-Faktoren für Brandgefahrenklassen nach DIN EN 12845 [210] und VdS 4001 [226]

Brandgefahren- klasse	Mindestwasser- beaufschlagung mm/min	Sprinklerart	nomineller K-Faktor der Sprinkler
LH	2,25	Normal-, Schirmsprinkler; bündige Deckensprinkler; Flachschiemsprinkler; versenkte, verdeckte Sprinkler und Seitenwandsprinkler	57
OH	5,0		80
HHP/HHS Decken- bzw. Dach- sprinkler	≤ 10 > 10	Normal-, Schirmsprinkler	80, 115 (oder 160) ^a ≥ 115 (oder 160) ^a
HHP/HHS zusätzliche Sprinkler bei hohen Lagern	-	Normal-, Schirm- und Flachschiemsprinkler	80 oder 115
^a entsprechend DIN EN 12845			

Die Wasserausflussrate Q eines Sprinklers wird berechnet mit

$$Q = k * \sqrt{p}$$

Q - Wasserausflussrate [l/min]

k - K-Faktor

p - Druck [bar]

Die Wasserausflussrate Q an jedem Sprinkler innerhalb der Auslegungsfläche wird bestimmt vom geforderten Mindestdruck am Sprinkler p_{\min} , bzw. der Mindestwasserausflussrate Q_{\min} . Alternativ kann sie als Produkt der tatsächlichen Schutzfläche des Sprinklers mit der geforderten Wasserbeaufschlagung ermittelt werden.

$$Q = WF * WB$$

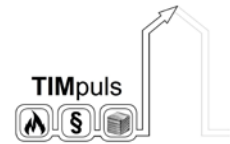
WF - Wirkfläche [m²]

WB - Mindestwasserbeaufschlagung [mm/min]

In Tabelle 37 (Abschnitt Abschließende Realbrandversuche im Forschungsvorhaben TIMpuls) sind die Zeitpunkte des Löschangriffs, ihre Dauer und der Löschwasserverbrauch in den Belegversuchen zusammengefasst. In den Versuchen V1, V2 und V3 waren zur Brandkontrolle 37 l/min bis 55 l/min und zur Brandeindämmung 26 l/min bis 28 l/min Löschwasser notwendig. In diesen Belegversuchen wurden die Löschangriffe im späteren Verlauf der Abkühlphase (V1 nach 93 Minuten, V2 nach 92 Minuten und V3 nach 150 Minuten) durchgeführt. Der Belegversuch V4 wurde nach 65 Minuten, am Ende der Vollbrandphase im Übergang zur Abkühlphase, gelöscht und es wurden 103 l/min zur Brandkontrolle und 54 l/min zur Brandeindämmung benötigt.

Es gilt zu berücksichtigen, dass automatische Feuerlöschanlagen bereits innerhalb der Brandentwicklungsphase auslösen (siehe Abschnitt 3.1.5.2). In der Brandentwicklungsphase darf aufgrund der kürzeren Branddauer (geringere Brandfläche sowie Brandraum- und Bauteilerwärmung) ein geringerer Löschwasserbedarf erwartet werden.

Der maximalen Schutzfläche eines Sprinklers entsprechend Tabelle 44 (Schutzfläche) folgend, würden Raumgrößen entsprechend V1 und V2 (ca. 16m²) mit einer Sprinklerdüse, V3 und V4 (ca. 32 m²) mit zwei Sprinklerdüsen ausgestattet. Der in Tabelle 42 vorgegebene Mindestdurchfluss je Sprinkler von 68 l/min bei Ansprechen eines einzigen Sprinklers und jeweils 49 l/min bei gleichzeitigem Ansprechen mehrerer Sprinkler scheint daher als ausreichend dimensioniert.



Um den anliegenden Druck am Sprinkler zu berechnen, wird die Gleichung zur Berechnung der Wasserausflussrate Q nach p wie folgt umgestellt.

$$p = Q^2 / k^2$$

Druckverluste aufgrund der Mantelreibung im Rohrleitungsnetz werden wie folgt bestimmt.

$$p = \frac{6,05 * 10^5}{C^{1,85} * d^{4,87}} * L * Q^{1,85}$$

p - Druckverlust in der Rohrleitung [bar]

C - Konstante für Art und Zustand der Rohrleitung entsprechen Tab. A.01 in [225], bzw. Tab. D.1 in [209]

d - Innendurchmesser [mm]

L - Länge der Rohrleitung [m]

Q - Wasserausflussrate [l/min]

Druckverluste aufgrund von Formstücken und Ventilen werden sind in der Annahme der Länge der Rohrleitungen pauschal berücksichtigt.

Der statische Druckunterschied zwischen zwei vertikalen Verbindungspunkten wird wie folgt bestimmt:

$$p_s = 0,098 * h$$

p_s - statische Druckdifferenz [bar]

h - Höhendifferenz des Rohrleitungsnetzes [m]

Die hydraulische Bemessung der Wohnraumsprinkler für den mehrgeschossigen Holzbau erfolgt auf Grundlage der angegebenen Bemessungswerte von Tabelle 41 bis Tabelle 45, zusammengefasst in

Tabelle 46. Betrachtet werden Löschwasseranlagen mit Sprinklerdüsen entsprechend den technischen Beschreibungen der Hersteller für Wohnraumsprinkler [227], [228] mit k-Faktoren 80, 57 und 43. Der k-Faktor gibt den Wasserdurchfluss bei 1 bar Betriebsdruck am Sprinkler an. Als Schutzflächen der Sprinkler werden 21 m² angenommen. Der Mindestdurchfluss je Sprinkler Q_{\min} ist abhängig von der Anzahl der ausgelösten Sprinkler. Es werden Sprinkleranlagen mit einem ausgelösten Sprinkler ($Q_{\min} = 68$ l/min) sowie zwei und vier ausgelösten Sprinklern ($Q_{\min} = 49$ l/min) bemessen. Werden mehrere Sprinkler berücksichtigt, wird auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass diese mit einem horizontalen Abstand von 4 m in Reihe angeschlossen werden.

Tabelle 46: Zusammenfassung der Parameter für die hydraulische Auslegung

Parameter	Abk.	Wert
Sprinklerart (K-Faktor)	k	43; 57; 80
Schutzfläche	WF	21 m ²
Mindestwasserbeaufschlagung	WB	2,1 mm/min; 5,0 mm/min
Mindestdurchfluss je Sprinkler	Q _{min}	68 l/min bei Ansprechen eines einzigen Sprinklers; 49 l/min an jedem Sprinkler bei gleichzeitigem Ansprechen
Betriebszeit	t	10 min; 30 min
Mindestdruck am ungünstigsten Sprinkler	p _{min}	K57: 0,7 bar; K80: 0,35 bar
Abstand Sprinkler (horizontal)	L _{H,n}	4 m
Länge Rohrleitung zu Steigleitung	L _H	15 m (inkl. Formstücke)
Rohrinnendurchmesser horizontal	d _{i,H}	35,9 mm (DN 32)
Länge Rohrleitung vertikal	L _v	27 m
Rohrinnendurchmesser vertikal	d _{i,v}	41,8 mm (DN 40)
Geschosshöhe	h _G	2,7 m
C-Wert	C	120 (Kohlenstoffstahl)

In den Abbildung 291 wird der erforderliche Betriebsdruck der Löschwasserversorgung (LWV - bspw. eine Pumpe mit Wasserspeicher oder ein direkter Anschluss an ein Wassernetz) im Erdgeschoss eines 9-geschossigen Gebäudes dargestellt. Der erforderliche Betriebsdruck berücksichtigt zwei ausgelöste Sprinkler, eine Wasserbeaufschlagung von 2,1 mm/min und Sprinklerdüsen mit einem k-Faktor von 57. Die Ergebnisse für weitere Wasserbeaufschlagungen, Sprinkleranzahl und k-Faktoren sind in Tabelle 47 zusammengefasst.

erforderlicher Betriebsdruck der
Löschwasserversorgung je Geschoss

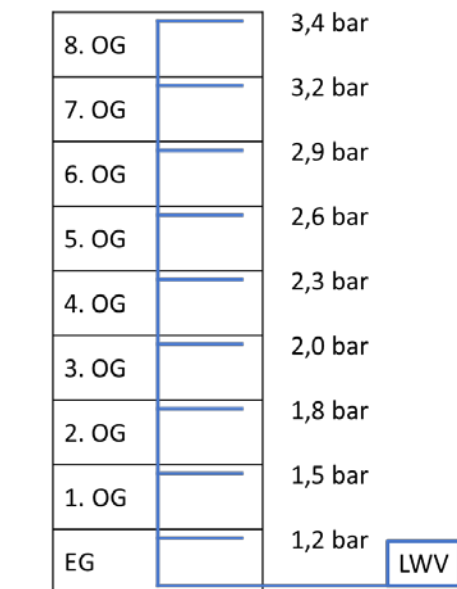


Abbildung 291: erforderlicher Betriebsdruck der Löschwasserversorgung von Wohnraumsprinklern je Geschoss, bei zwei ausgelösten Sprinklern, $WB = 2,1 \text{ mm/min}$, $k\text{-Wert} = 57$

Tabelle 47: Übersicht des erforderlichen Betriebsdrucks für Wohnraumsprinkleranlagen

Wasserbeaufschlagung	2,1 mm / min									5,0 mm / min								
	1 Sprinkler			2 Sprinkler			4 Sprinkler			1 Sprinkler			2 Sprinkler			4 Sprinkler		
Durchfluss am ungünstigsten Sprinkler	68 l/min			49 l/min			49 l/min			105 l/min			105 l/min			105 l/min		
k – Faktor	43	57	80	43	57	80	43	57	80	43	57	80	43	57	80	43	57	80
erforderlicher Druck der Löschwasserversorgung bar																		
8. OG	5,0	4,0	3,3	4,0	3,4	3,1	4,8	4,2	3,9	8,7	6,1	4,4	9,6	7,0	5,4	12,9	10,4	8,8
7. OG	4,8	3,7	3,0	3,7	3,2	2,8	4,5	3,9	3,6	8,4	5,8	4,2	9,3	6,7	5,1	12,4	9,9	8,3
6. OG	4,5	3,4	2,7	3,4	2,9	2,5	4,2	3,6	3,3	8,1	5,5	3,9	9,0	6,4	4,7	12,0	9,4	7,8
5. OG	4,2	3,1	2,4	3,2	2,6	2,2	3,8	3,3	3,0	7,8	5,3	3,6	8,6	6,1	4,4	11,5	8,9	7,3
4. OG	3,9	2,8	2,1	2,9	2,3	2,0	3,5	3,0	2,6	7,5	4,9	3,2	8,3	5,7	4,1	11,0	8,5	6,9
3. OG	3,7	2,6	1,9	2,6	2,0	1,7	3,2	2,7	2,3	7,3	4,7	3,0	8,0	5,4	3,8	10,5	8,0	6,4
2. OG	3,4	2,3	1,6	2,3	1,8	1,4	2,9	2,3	2,0	7,0	4,4	2,8	7,7	5,1	3,4	10,0	7,5	5,9
1. OG	3,1	2,1	1,4	2,0	1,5	1,1	2,6	2,0	1,7	6,7	4,1	2,5	7,3	4,8	3,1	9,6	7,0	5,4
EG	2,9	1,8	1,1	1,8	1,2	0,8	2,3	1,7	1,4	6,4	3,9	2,2	7,0	4,5	2,8	9,1	6,5	4,9
erforderliches Wasservolumen der Löschwasserversorgung LWV Liter																		
10 min Betriebszeit	680			ca. 1.000			ca. 2.000			1.050			ca. 2.100			ca. 4.300		
30 min Betriebszeit	2.040			ca. 3.000			ca. 6.000			3.150			ca. 6.300			ca. 12.900		

Der festgestellte, erforderliche Betriebsdruck und das notwendige Wasservolumen der Löschwasserversorgung in Tabelle 47 stellen eine, aufgrund der zuvor getroffenen Annahmen zur Systemauslegung, allgemeine Abschätzung dar und dienen nur der Überprüfung der Realisierbarkeit von Wohnraumsprinklern im mehrgeschossigen Holzbau. Die Wirksamkeit und die Notwendigkeit einer Löschanlage für ein konkretes Bauvorhaben ist im Rahmen einer Risikobeurteilung im Brandschutzkonzept zu beurteilen, die entsprechende Löschanlage ist im Einzelfall und unter Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen zu konzeptionieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass Sprinkleranlagen mit einer Wasserbeaufschlagung von 2,1 mm/min in Gebäuden mit bis zu 9 Geschossen, maßgebend ist die vertikale Förderhöhe ausgehend vom Löschwasseranschluss, einen Betriebsdruck von bis zu ca. 5 bar benötigen. Bei einem Direktanschluss der Sprinkleranlagen an das regionale Wassernetz wäre dieser bestenfalls durch den anliegenden Leitungsdruck zu gewährleisten. Beispielsweise kann nach Aussage der Stadtwerke Magdeburg für die Stadt Magdeburg von Leitungsdrücken zwischen 2,5 bar und 4,5 bar (35 m bis 45 m ü NN), maximal bis zu 6 bar ausgegangen werden. Entsprechend Tabelle 47 wäre damit der Betrieb von Sprinkleranlagen mit 2,1 mm/min Wasserbeaufschlagung weitgehend und mit 5 mm/min Wasserbeaufschlagung in begrenz-

tem Umfang vorstellbar. Es ist zu berücksichtigen, dass auch innerhalb eines städtischen Leitungsnetzes sehr verschiedene Druckniveaus in Ballungsräumen aufgrund separater Hochbehälter und abgeschieberter Bereiche bestehen. Sollte der vorhandene Leitungsdruck nicht ausreichen, könnte für das entsprechende Gebäude eine separate Druckerhöhungsanlage vorgesehen werden.

Infolge des Direktanschlusses der Sprinkleranlagen an das regionale Wassernetz würde die Notwendigkeit der Rückhaltung von Löschwasser entfallen. Aufgrund der Wasserbeaufschlagung, bzw. der Anzahl der ausgelösten Sprinkler und ihren erforderlichen Durchflüssen sind Löschwasserversorgungen von 4.080 l/h (680 l in 10 min) bis 25.800 l/h (4.300 l in 10 min) erforderlich. Der Wasserdurchfluss des Hausanschlusses wird insbesondere durch den Wasserzähler als Nadelöhr begrenzt. Ein handelsüblicher Wasserzähler für Mehrfamilienhäuser (DN50, 30 Wohnungen) ist auf einen Durchfluss von max. 2.500 l/h ausgelegt, kurzzeitig sind bis zu 5.000 l/h möglich. Dementsprechend könnte die Anwendbarkeit der Sprinkleranlage aufgrund der begrenzten Löschwasserversorgung begrenzt werden. In diesem Fall empfiehlt sich die Ausführung des Hausanschlusses, bzw. der Löschwasserversorgung am Leitungsnetz mit einem größerem Nenndurchmesser des Leitungssystems.

Wie bereits in Abschnitt (AP 5 Einleitung) erläutert, weist DIN 1988-600 [214] explizit darauf hin, dass die öffentliche Trinkwasserversorgung in erster Linie der Versorgung der Bevölkerung mit hygienisch einwandfreiem Trinkwasser dient. Ob der Anschluss einer Sprinkleranlage an das Trinkwassernetz möglich ist, kann nur durch das örtliche Wasserversorgungsunternehmen ermittelt werden. Abstriche bei der Aufrechterhaltung der Trinkwasserhygiene können nicht akzeptiert werden. Weiterhin widersprechen die Wasserversorgungsunternehmen der vertraglichen Verantwortung, das Löschwasser dauerhaft in ausreichender Menge und unter dem notwendigen Druck zu gewährleisten. So können die Wasserversorger die Verfügbarkeit des Leitungswassers aufgrund von Baumaßnahmen, Havariefällen oder außerordentlichen Netznutzungen nicht dauerhaft gewährleisten.

3.1.6 Arbeitspaket 6 Risikoanalyse und Bewertung

Die nachfolgenden Ergebnisse und Vorschläge sind im Rahmen dieses Vorhabens erarbeitet worden. Sie sind noch nicht abschließend validiert und werden in einem Anschlussvorhaben weiterbearbeitet. Die Ergebnisse sind daher noch nicht für die Anwendung in der Praxis geeignet und stellen auch noch nicht den abschließenden Stand von Wissenschaft und Forschung dar.

3.1.6.1 Brandrisiko

Im Bereich der Sicherheitsforschung wird der Begriff Risiko benutzt, um Gefährdungen von Menschen und Sachwerten beschreiben zu können. Das Risiko (R) ist das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit (h), dass ein Schadensereignis in einem bestimmten Zeitraum an einem bestimmten Ort eintritt und dem Schaden (E), also dem Grad des Verlustes eines dem Schadensereignis ausgesetzten Objektes.

$$R = h \times E$$

Daher lässt sich das Risiko als Erwartungswert der Schadensfolgen beschreiben. Da die Wahrscheinlichkeit dimensionslos zwischen 0 und 1 liegt, richtet sich die Einheit nach dem Schaden, beispielsweise kann der Schaden finanziell oder in einer Anzahl an Opfern bemessen werden.

Überträgt man den Begriff des Risikos auf ein Brandereignis, so entsteht der Begriff Brandrisiko. Die Eintrittswahrscheinlichkeit (h) definiert dann die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schadensfeuer entsteht. Dies ist unter anderem abhängig von der Nutzung und den brandschutztechnischen Maßnahmen, die einer Brandentstehung entgegenwirken. Der unmittelbare Schaden in einem Brandszenario ist immer ein Personen- oder Sachschaden (E). Ein Brandereignis ist ein komplexes System verschiedener Abhängigkeiten. Dies macht es schwierig das Risiko zu bewerten.

Sicherheitsniveau der Bauordnung

In ihren Landesbauordnungen (LBO) stellen die Bundesländer Anforderungen auf, die bei Bauvorhaben an bauliche Anlagen, Bauprodukte und Grundstücke zu erfüllen sind. Die Musterbauordnung (MBO) [204] dient den Bundesländern als unverbindliche Orientierung für die eigene Landesbauordnung. Auch wenn sich der überwiegende Teil der Anforderungen in den 16 Landesbauordnungen nicht wesentlich unterscheidet, bestehen erhebliche Unterschiede zwischen den Anforderungen an das Brandverhalten der Baustoffe in hochfeuerhemmenden und feuerbeständigen Bauteilen, siehe Abschnitt 3.1.6.2.

Das übergeordnete Schutzziel der Muster- und Landesbauordnungen ist jedoch einheitlich definiert:

§ 3 MBO [204] „Allgemeine Anforderungen: Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden; dabei sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die Beseitigung von Anlagen und bei der Änderung ihrer Nutzung.“

Diese allgemeinen Schutzziele werden in Bezug auf die brandschutztechnischen Anforderungen wie folgt konkretisiert:

§ 14 MBO [204] „Brandschutz: Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“

Die Muster- und Landesbauordnungen setzen diese Schutzziele durch sogenannte präskriptive Anforderungen um. Diese betreffen unter anderem das Brandverhalten der Baustoffe und Bauteile, aber auch Anforderungen zur Rettungsweggestaltung oder Gebäudeabständen. Eine Erläuterung dieser Anforderungen in Bezug auf den mehrgeschossigen Holzbau erfolgt im folgenden Text. Die resultierenden, bautechnischen Anforderungen in ihrer Gesamtheit werden als (brandschutztechnisches) Sicherheitsniveau bezeichnet. Abweichungen von diesen Anforderungen sind möglich:

§ 67 MBO (1) [204] „Abweichungen: Die Bauaufsichtsbehörde kann Abweichungen von Anforderungen dieses Gesetzes und aufgrund dieses Gesetzes erlassener Vorschriften zulassen, wenn sie unter Berücksichtigung des Zwecks der jeweiligen Anforderung und unter Würdigung

der öffentlich-rechtlich geschützten nachbarlichen Belange mit den öffentlichen Belangen, insbesondere den Anforderungen des § 3 Satz 1 vereinbar ist. ...“

Sollen im Rahmen eines Bauvorhabens Abweichung von den präskriptiven Anforderungen ausgeführt werden, welche das Sicherheitsniveau entsprechen §3 und §14 der Bauordnungen reduzieren, müssen sogenannte Kompensationsmaßnahmen vorgesehen werden. Diese bestehen aus einer Übererfüllung der bauaufsichtlichen Maßnahmen oder aus zusätzlichen Maßnahmen, welche das ursprüngliche Sicherheitsniveau wiederherstellen.

Beurteilung des Brandrisikos

Die Gewährleistung des brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus mittels Kompensationsmaßnahmen wird meist im Rahmen eines argumentativ geführten Brandschutzkonzeptes nachgewiesen. In diesem wird beschrieben, inwieweit brandschutztechnische Anforderungen erfüllt werden, Abweichungen das Sicherheitsniveau verringern und Kompensationsmaßnahmen dies ausgleichen. Für ein Bauvorhaben lassen sich stets mehrere Brandschutzkonzepte ableiten, die sich in Bezug auf Kubatur und Materialwahl der Konstruktion unterscheiden und anlagentechnische sowie organisatorische Brandschutzmaßnahmen vorsehen können. Der Entwurf und die Prüfung eines Brandschutzkonzeptes unter der Berücksichtigung von Anforderungen, Abweichungen und Kompensationen wird somit von der Ausbildung und der Erfahrung aller Beteiligten beeinflusst. Jede vorhabenbezogene Einzelfallentscheidung unterliegt somit einer mehr oder minder maßgebenden Subjektivität.

Anstelle dieser argumentativ geführten, qualitativen Risikoanalyse wäre es wünschenswert das Risiko quantitativ und objektiv zu bewerten. Eine quantitative Risikoanalyse stellt die zeitliche Abfolge und die Abhängigkeit von Ereignissen logisch dar, zum Beispiel von der Brandentstehung über die Brandentwicklung und dem Auslöser der Branderkennung und einer Löschanlage, bis zur Kontrolle des Brandes. In Abbildung 292 ist ein solcher Ereignisverlauf dargestellt. Jedem Ereignis wird eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet, die auf langfristigen Erfahrungswerten oder statistischen Erhebungen beruht, aber in Einzelfällen auch durch Ingenieurmethoden berechnet werden kann. Das Risiko ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Eintrittswahrscheinlichkeiten und der Schadensfolge. Vorteil der quantitativen Risikoanalyse ist, dass diese ausschließlich auf mathematischen Grundlagen beruht und durch die Möglichkeit der grafischen Darstellung leicht verständlich ist. Als Nachteile sind anzuführen, dass die Durchführung einer quantitativen Risikoanalyse sehr aufwendig ist und die Eingangsdaten zum Teil schwer zu beschaffen sind. Daher ist die Bewertung des Brandrisikos durch eine quantitative Risikoanalyse nur für spezielle Teilaspekte praktikabel; für die Bewertung des Gesamtbrandrisikos eines mehrgeschossigen Gebäudes ist sie auf Grund der Vielzahl von Einflussfaktoren aktuell noch ungeeignet.

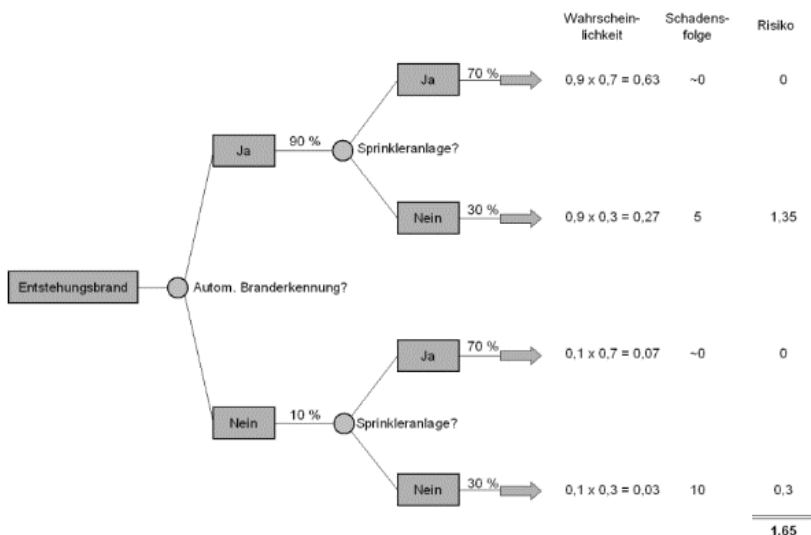


Abbildung 292: Beispiel eines einfachen Ereignisbaums einer quantitativen Risikoanalyse [90]

Eine Kombination aus den qualitativen und den quantitativen Verfahren ist die semi-quantitative Risikobewertung. Diese ist dazu geeignet, das Brandrisiko eines Gebäudes mit vertretbarem Aufwand und gegenüber der qualitativen Argumentation objektiver zu bewerten. Eine ausführliche Beschreibung und Anwendung dieser Methode wird im Folgenden dargestellt.

3.1.6.2 Bauordnungsrechtliche Anforderungen an mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise

Die MBO definiert in § 26 die allgemeinen Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Der Bauteilklassifizierung liegt die Bewertung der Feuerwiderstandsdauer, bzw. der Funktionserhalt der Tragfähigkeit und oder des Raumabschlusses, über den Brandverlauf der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK, siehe Abbildung 293) zugrunde. Das Abklingen des Brandes und das Nachbrandverhalten des Bauteils, z. B. das Bauteilverlöschen, werden dabei nicht berücksichtigt, sodass das Bauteil unmittelbar nach Überschreiten der vorgegebenen Prüfdauer versagen darf. Für feuerbeständige Bauteile (Feuerwiderstandsdauer über 90 Minuten ETK) wird gefordert, dass die tragenden und aussteifenden Teile aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Bei raumabschließenden, feuerbeständigen Bauteilen wird außerdem eine in Bauteilebene durchgehende Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen gefordert. Damit wird indirekt angenommen, dass sich diese Bauteile nicht am Brand beteiligen und der reale Brand, der bei üblichen Brandlasten in etwa der Intensität des Brandverlaufs einer 70-minütigen ETK-Beanspruchung entspricht [72], auch ohne Löschangriff der Feuerwehr überstanden wird.

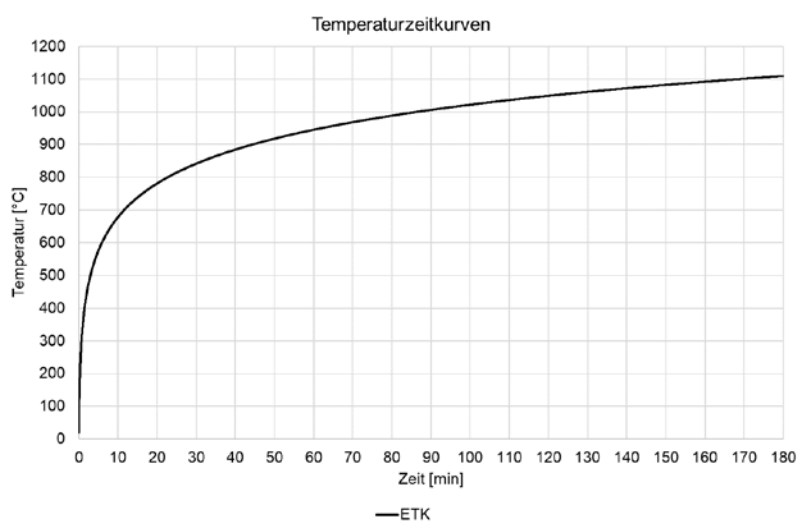


Abbildung 293: Verlauf der Einheits-Temperaturzeitkurve

Für hochfeuerhemmend Bauteile ist mindestens gefordert, dass die tragenden und aussteifenden Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen und sie allseitig über eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen verfügen. Das Prinzip einer solchen Holztafelbauweise ist in Abbildung 294 dargestellt.

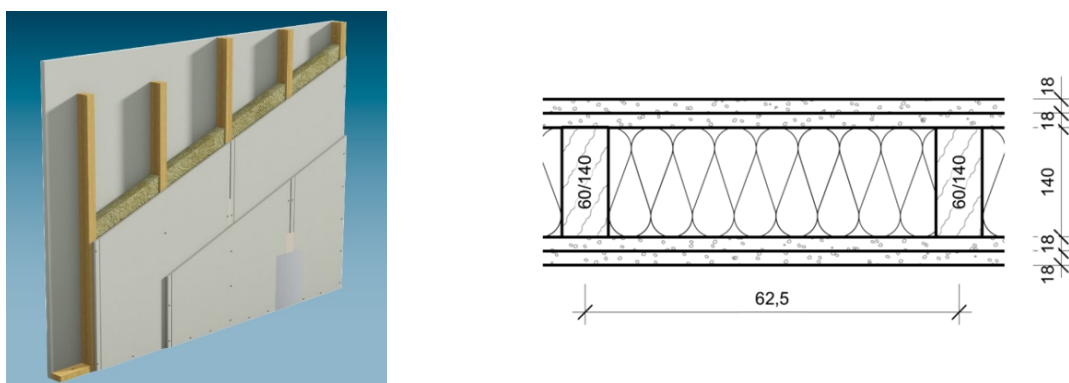


Abbildung 294: Hochfeuerhemmende Holztafelbauwand (links, Bild: Knauf KG) und Querschnitt (rechts)

Diese Holzbauweise wird in der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHolzR) [47] konkretisiert. Sie gilt für Holzsystembauweisen, die einen gewissen Grad der Vorfertigung aufweisen, dazu gehören die Holztafel-, Holzrahmen-

und Fachwerkbauweise. Sie gilt nicht für Holzmassivbauweisen wie Brettstapel- und Blockbauweise, ausgenommen Brettstapeldecken. Zum Zeitpunkt der Erarbeitung der Richtlinie waren diese Produkte noch kein Stand der Technik [177]. Als Gefachdämmstoffe im Sinne der M-HFHolzR sind Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen mit einem Schmelzpunkt ≥ 1000 °C zu verwenden.

In der letzten Änderung der MBO vom 27.09.2019 wird ausgeführt, dass feuerbeständige oder hochfeuerhemmende Bauteile „...aus brennbaren Baustoffen zulässig sind, sofern sie den Technischen Baubestimmungen nach § 85a entsprechen.“. Die hierfür relevante, technische Baubestimmung ist die zukünftige Muster- Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL) [155]. Diese befindet sich zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichtes in der Entwurfsphase. Die Anforderungen an die Holztafel- und Holzrahmenbauweisen als hochfeuerhemmende für die Gebäudeklasse 4 entsprechen im Wesentlichen denen der M-HFHolz, die Bauteile sind nichtbrennbar zu bekleiden, Gefachdämmstoffe müssen nichtbrennbar sein und einen Schmelzpunkt ≥ 1000 °C aufweisen.

Weiterhin erweitert die MHolzBauRL den Anwendungsbereich von Massivholzbauweisen. Sie können in Standardgebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 mit einer Höhe von bis zu 22 m als feuerwiderstandsfähige Bauteile verwendet werden, sofern in den Gebäuden lediglich Nutzungseinheiten enthalten sind, die jeweils eine maximale Größe von 200 m² aufweisen. Die brennbaren Bauteiloberflächen von Wänden und Decken müssen eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen haben, die eine Entzündung der brennbaren Bauteiloberflächen während eines Zeitraumes von mindestens 30 Minuten verhindert. Dies gilt als erfüllt, wenn die Bekleidung aus einer mindestens 18 mm dicken Gipsfaser- oder Gipskartonfeuerschutzplatte ausgeführt wird. Abweichend hiervon sind je Raum der Nutzungseinheit entweder die Decke oder maximal 25% aller Wände mit brennbaren Bauteiloberflächen zulässig. In der Massivholzbauweise im Sinne der MHolzBauRL können auch (Hybrid-)Bauteile verwendet werden, z. B. Holz-Beton-Verbunddecken.

Der Verweis der MBO auf diese technische Baubestimmung wurde sinngemäß gleichbleibend bereits in den Landesbauordnungen von Hessen [229], Schleswig-Holstein [230], Bayern [231], Niedersachsen [232], Rheinland-Pfalz [233], Thüringen [234], Bremen [235], Sachsen-Anhalt [236] und Mecklenburg-Vorpommern [240] übernommen.

Abweichend von der Musterbauordnung führen die Bauordnungen von Berlin [169], Nordrhein-Westfalen [170], Baden-Württemberg [171] und Hamburg [237] den §26 der MBO individuell aus:

§ 26 (3) BauO NRW [170] *„Abweichend von ... sind tragende oder aussteifende sowie raumabschließende Bauteile, die hochfeuerhemmend oder feuerbeständig sein müssen, aus brennbaren Baustoffen zulässig, wenn die geforderte Feuerwiderstandsdauer nachgewiesen wird und die Bauteile so hergestellt und eingebaut werden, dass Feuer und Rauch nicht über Grenzen von Brand- oder Rauchabschnitten, insbesondere Geschosstrennungen, hinweg übertragen werden können.“*

§ 26 (3) LBO BW [171] *„Abweichend von ... sind tragende oder aussteifende sowie raumabschließende Bauteile, die hochfeuerhemmend oder feuerbeständig sein müssen, aus brennbaren Baustoffen zulässig, wenn die hinsichtlich der Standsicherheit und des Raumabschlusses geforderte Feuerwiderstandsfähigkeit nachgewiesen und die Bauteile und ihre Anschlüsse ausreichend lang widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sind.“*

§ 26 (3) BauO Bln [169] *„Abweichend von ... sind tragende oder aussteifende sowie raumabschließende Bauteile, die hochfeuerhemmend oder feuerbeständig sein müssen, in Holzbauweise zulässig, wenn die erforderliche Feuerwiderstandsfähigkeit gewährleistet wird.“*

§24 (3) HBauO [237] *„Bei Gebäuden mit einer Höhe ... bis zu 22 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 200 m² und Brandabschnitten von nicht mehr als 800 m² pro Geschoss sind ... tragende oder aussteifende sowie raumabschließende Bauteile, die hochfeuerhemmend oder feuerbeständig sein müssen, in Massivholzbauweise zulässig, wenn die geforderte Feuerwiderstandsfähigkeit nachgewiesen wird.“*

Die Bauordnungen von Berlin [169], Nordrhein-Westfalen [170] und Baden-Württemberg [171] lassen somit die Ausführung von tragenden und raumabschließenden Bauteilen in Holztafel- und Massivbauweisen in den Gebäudeklassen 4 und 5 zu. Da diese Festlegungen als „Abweichend von...“ eingeführt

wurden, können diese Bauteile theoretisch aus brennbaren Baustoffen, unter Berücksichtigung der korrekten Begriffe „abweichend zu hochfeuerhemmend“ und „abweichend zu feuerbeständig“, ohne materielle Abweichung ausgeführt werden.

Die Hamburger Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen veröffentlichte ergänzend zur HBauO [237] den Bauprüfdienst „Bauen in Massivholzbauweise“ (BPD Massivholzbau) [238]. Ein Bauprüfdienst ist ein Arbeitsmittel mit Empfehlungen und Erläuterungen zur Anwendung der jeweiligen Rechtsvorschrift für die Bauprüfabteilungen Hamburgs. Eine bindende Wirkung in irgendeiner Form, weder verwaltungsintern noch für die am Bau Beteiligten, kommt ihnen nicht zu. Die inhaltlichen Ausführungen des BPD Massivholzbau [238] entsprechen im Wesentlichen den Inhalten der Muster-Holzbaurichtlinie [155].

Die Landesbauordnungen Brandenburg [239], Saarland [241] und Sachsen [242] haben den Verweis der MBO auf eine technische Baubestimmung bisher nicht übernommen.

3.1.6.3 Brandverhalten von Holzbauteilen

Im Zuge einer qualitativen Risikoanalyse werden die Holzbauteile zunächst brandschutztechnisch im Vergleich zu Bauteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen bewertet. Erhöht sich das brandschutztechnische Risiko sind entsprechende Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sicherheitsniveaus vorzusehen.

Im Folgenden wird das Brandverhalten der Holzbauteile erläutert, die Bauweisen werden gegliedert in

- Holztafelbauweise mit nichtbrennbarer Dämmung,
- Holzmassivbauweise.

Daraufhin erfolgt die Auswahl und Begründung von Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus. Diese münden abschließend in Vorschlägen zur Fortschreibung der Holzbaurichtlinie für die Gebäudeklassen 4 und 5 durch die Projektgruppe Muster-Holzbaurichtlinie.

Holztafelbauweise mit nichtbrennbarer Dämmung

Durch die Anordnung eines Entzündungsschutzes über 60 Minuten Beflammung entsprechend Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK), beispielsweise als zweilagige Bekleidung aus 18 mm dicken Gipskartonfeuerschutz- oder Gipsfaserplatten, mit versetzten Fugen und einem nichtbrennbaren Dämmstoff mit Schmelzpunkt ≥ 1000 °C, werden jegliche thermischen Zersetzungsprozesse an den brennbaren Holzbauteilen über 60 Minuten ausgeschlossen. Das Brandverhalten derart ausgeführter, hochfeuerhemmender Bauteile entspricht somit dem Brandverhalten von Bauteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen in der Gebäudeklasse 4.

Ein Entzündungsschutz über 60 Minuten hätte zur Folge, dass es im länger andauernden Brandverlauf und bei spätem Löschangriff der Feuerwehr, zu einer Entzündung der Holzkonstruktion kommen kann. Dies hat die thermische Umsetzung der immobilen Brandlast der Konstruktion zur Folge. Infolgedessen besteht die Gefahr von Hohlraumbränden und einer möglichen Rauchweiterleitung im Innern der Konstruktion. Diese ist auf Grund der nichtbrennbaren Wärmedämmung als vergleichsweise gering einzustufen, muss aber dennoch berücksichtigt werden.

Im Brandfall sind in der Gebäudeklasse 5 gegenüber der Gebäudeklassen 4 aufgrund der Gebäudegröße potentiell höhere Personen- und Sachschäden möglich. Um das Brandrisiko trotz des höheren Schadensausmaßes auf einem akzeptablen Sicherheitsniveau zu halten, muss dementsprechend die Wahrscheinlichkeit der Personen- und Sachschäden reduziert werden. In der Gebäudeklasse 5 sind daher feuerbeständige Bauteile mit einer Feuerwiderstandsfähigkeit über 90 Minuten ETK-Beflammung gefordert.

Eine logische Schlussfolgerung für bekleidete Holzbauteile in der Gebäudeklasse 5 wäre somit, den Entzündungsschutz durch die Anordnung einer weiteren, dritten Bekleidungsschicht auf 90 Minuten zu erhöhen. Erfahrungsgemäß bedingen zweilagige Brandschutzbekleidung bereits unwirtschaftliche Aufwendungen der Material- und Arbeitskosten und reduzieren somit die Konkurrenzfähigkeit und Akzeptanz mehrgeschossiger Holzbauweisen gegenüber Bauweisen aus nichtbrennbaren Baustoffen [177].

Anstelle der Brandbeanspruchung mit ETK wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens TIMpuls Realbrandversuche in Räumen in Holzbauweisen mit einer repräsentativen Naturbrandbeanspruchung

durchgeführt, siehe Abschnitt 3.1.2.12. Naturbrandkurven verlaufen nicht über einen definierten Zeitraum von 60 Minuten oder 90 Minuten. Sie werden im Einzelfall in Abhängigkeit der vorliegenden Brandlasten, der Brandraumgeometrie, der Ventilationsöffnungen, der abwehrenden und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen sowie der thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile berechnet. Sie umfassen den vollständigen Brandverlauf mit Brandentstehungs-, Vollbrand- und Abkühlphase. Damit ist eine realitätsnähere Bewertung der entstehenden Temperaturen sowie des Tragverhaltens von Bauteilen und Konstruktionen im Brandfall möglich. Es ist möglich, einen Bauteilnachweis nicht auf Basis der Feuerwiderstandsdauer infolge der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK), sondern für eine Naturbrandkurve zu führen. Der Nachweis ist durch eine eingeführte technische Baubestimmung (A 1.2.1.2 in [186]) definiert und wird im Nationalen Anhang von DIN EN 1991-1-2 [21] beschrieben. Die Bestimmung der Naturbrandkurve „TIMpuls NB_1“ ist in Abschnitt 3.1.1.5 beschrieben. Ihr Brandverlauf ist in Abbildung 295 im Vergleich zur ETK dargestellt.

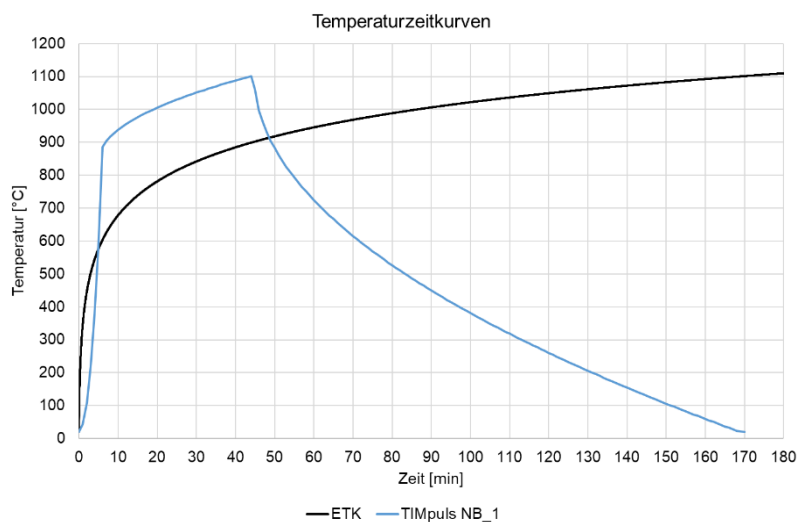
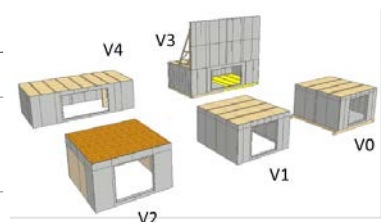


Abbildung 295: Verlauf der Einheits-Temperaturzeitkurve und Naturbrandkurve NB_1

In Abbildung 296 sind die Untersuchungsziele und die wesentlichen konstruktiven Unterschiede der fünf Realbrandversuche dargestellt.

Versuch	Bezeichnung	Ziele
V0	BV_4.5_4.5_nb	Referenzversuch mit Raum komplett nichtbrennbar
V1	BV_4.5_4.5_M-Holz-BauRI	Einfluss einer sichtbaren brennbaren Decke und Schutzzeiten der Wände mit Bekleidung nach Entwurf M-HolzBauRI inklusive Löscheinsatz der Feuerwehr
V2	BV_4.5_4.5_2xWand	Einfluss zweier gegenüberliegender sichtbaren brennbaren Wände in einem quadratischen Raum
V3	BV_4.5_9_Decke	Selbstverlöschen des Raumes und planmäßiges Versagen der Bekleidung einer HTB-Wand
V4	BV_4.5_9_Decke & Wand	Einfluss einer sichtbaren brennbaren Wand, einer sichtbaren brennbaren Decken und zusätzlicher brennbarer linearer Bauteile wie Stützen



(alle Brandversuche wurden mit Fassadenschild wie V3 ausgeführt)

Abbildung 296: Versuchsübersicht und Visualisierung der Realbrandversuche in „TIMpuls“

Die wesentlichen Erkenntnisse, die aus diesen Versuchen zum Brandverhalten der Bauteile im Abschnitt 3.1.2.12 gewonnen wurden, sind im Folgenden zusammengefasst.

Der Entzündungsschutz des Holzes konnte in den untersuchten Bauteilaufbauten mit Brandschutzbekleidungen unterhalb von 2 x 25 mm aus Gipskartonfeuerschutzplatten nicht gewährleistet werden. Im Realbrandversuch „V0“ wurden alle Wandbauteile und die Raumdecke mit 2 x 25 mm Gipskartonfeuerschutzplatten bekleidet. Der Brandraum vor Versuchsbeginn ist in Abbildung 183, während des Brandversuchs in Abbildung 184 und der Verlauf der Brandraumtemperatur in Abbildung 189 dargestellt. Diese Wandbauteile bestanden aus Massivholz/Brettsperholz, die Schutzwirkung der Gipskartonfeuerschutzplatten auf Holztafelbauteilen ist vergleichbar. Der Brandraum kühlte ohne Löscharbeiten vollständig ab. Am Folgetag wurde die Brandschutzbekleidung zurückgebaut und festgestellt, dass die Massivholzbauteile unterhalb der Brandschutzbekleidung keine thermischen Verfärbungen aufweisen, siehe Abbildung 297 und Abbildung 253.



Abbildung 297: Brandraum V0 am Folgetag, Brandschutzbekleidung teilweise geöffnet

In den Realbrandversuchen „V2“ und „V3“ wurden Holztafelbauteile mit 2 x 18 mm Gipsfaserplatten und Gipskartonfeuerschutzplatten bekleidet. In „V2“ waren weiterhin zwei Wände aus Brettsperholz unbekleidet ausgeführt (Abbildung 205), in „V3“ war die Decke aus Brettschichtholz unbekleidet und eine Holztafelbauwand mit 2 x 12,5 mm Gipsfaserplatten und einer OSB3-Platte bekleidet (Abbildung 217). Beide Brandversuche liefen vergleichbar ab, innerhalb von 8 bis 10 Minuten entwickelte sich der Vollbrand, nach ca. 45 Minuten begann die Abkühlphase. Die Brandverläufe sind in den Abbildung 216 und Abbildung 232 dargestellt. „V2“ wurde nach 92 Minuten gelöscht, da die Abbrandtiefen der beiden unbekleideten Wände das vorher festgelegt Abbruchkriterium von 40 mm (zwei jeweils 20 mm dicke Lagen des Brettsperholzes fielen ab) erreichten. „V3“ wurde aufgrund des planmäßigen Versagens der mit 2 x 12,5 mm Gipsplatten bekleideten Wand, dem Abbrand der Holzwerkstoffplatten und dem teilweisen Abbrand der Holzständer, nach ca. 150 Minuten gelöscht.

In Abbildung 298 sind die Temperaturen in der Grenzschicht zwischen der unteren Lage der Brandschutzbekleidung und der Gefachdämmung in Wand 3 im Versuch „V3“ dargestellt. In den ersten 60 Minuten des Brandversuchs stieg die Temperatur auf max. 150 °C. Die Brandschutzbekleidung verhinderte in diesem Zeitraum die Entzündung der Holzständer. Im weiteren Brandverlauf lösten sich die Gipsplatten der oberen, brandseitigen ersten Lage der Brandschutzbekleidungen teilweise, die Temperaturen hinter der unteren Lage stiegen auf max. 800 °C. Dies resultierte in thermische Zersetzungen der Holzständer unterhalb der Brandschutzbekleidung. Diese Zersetzung ist entsprechend Abbildung 299 deutlich erkennbar, wobei zu berücksichtigen ist, dass die untere, brandseitig zweite Lage der Brandschutzbekleidung erst im Rahmen des Löschangriffs entfernt wurde. Infolge der Abkühlphase des Raumbrandes verringerten sich die Bauteiltemperaturen ungefähr ab Minute 120, ab Minute 150 fanden Löscharbeiten und ab Minute 170 das Entfernen der Brandschutzbekleidung statt.

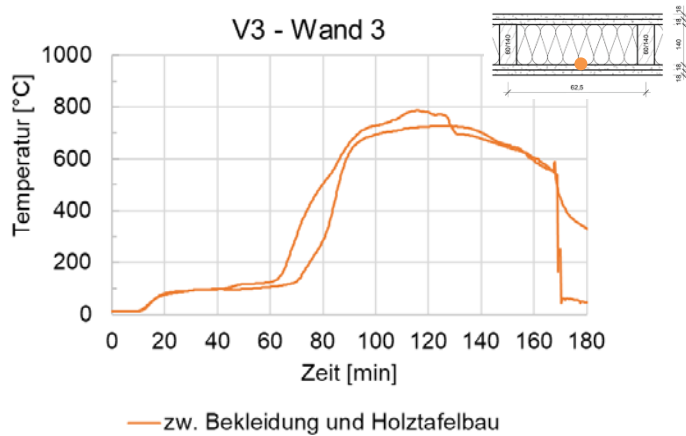


Abbildung 298: Temperaturverlauf zwischen der Brandschutzbekleidung und dem Holztafelbau in Wand 3 im Realbrandversuch V3



Abbildung 299: Brandraum V2 nach Versuchsende (links), Brandschutzbekleidung und Dämmstoffe zurückgebaut (rechts)

Trotz der thermischen Zersetzung der Hölzer und Holzwerkstoffplatten, kann unter den Randbedingungen von V2 das Brandverhalten von Holztafelbauteilen mit 2 x 18 mm Gipsplatten als Brandschutzbekleidung als akzeptabel eingeschätzt werden. Die unteren Lagen der Brandschutzbekleidungen blieben über den gesamten Brandverlauf bestehen. Aus den Rissen und Fugen der unteren Lage schlugen Flammen, siehe Abbildung 300.



Abbildung 300: Brandraum V3 in der Abkühlphase

In V2 und V3 (2 x 18 mm) wurden Flammenbrände aus größeren Rissen der Brandschutzbekleidung nach der 80. Versuchsminute festgestellt (Tabelle 31 und Tabelle 33), in V1 (1 x 18 mm auf Holzmassivbauwänden) nach der 40. Versuchsminute (Tabelle 29). Dieser zusätzliche Brandeintrag in den Brandraum erfolgte stets in der Abkühlphase und die Flammen verlöschen zumeist selbstständig vor dem Löschangriff. In Bezug auf ein Versagen der Brandschutzbekleidung muss außerdem berücksichtigt werden, dass diese aufgrund unvorhergesehener Einflüsse punktuell versagen kann. Die Wirksamkeit des Entzündungsschutzes kann beispielweise infolge einer nicht fachgerechten Ausführung, Beschädigungen aufgrund unsachgemäßer Nutzung oder einer höheren Brandlastdichte infolge eines außergewöhnlichen Nutzerverhaltens gestört werden. Die zusätzliche, konstruktive Brandlast von Holztafelbauteile mit nichtbrennbaren Dämmstoffen ist vergleichsweise gering. Das Versagen der Brandschutzbekleidung hat somit nur einen geringen Einfluss auf den Verlauf und die Intensität des Raumbrandes. Allerdings resultieren die versuchsbedingten Hohlraumbrände in höhere Aufwendungen für den abwehrenden Brandschutz.

Ein vollständiges Abkühlen und dementsprechend das Selbstverlöschten der Gesamtkonstruktionen konnte versuchsbedingt nicht nachgewiesen werden. In den Realbrandversuchen V1, V2 und V3 erforderte der Abbrand unbekleideter Bauteile und das Versagen der dünneren Brandschutzbekleidungen die Durchführung von Löscharbeiten, um die Tragfähigkeit des Versuchsaufbaus nicht zu gefährden. Im Rahmen der Löscharbeiten wurden in einigen Realbrandversuchen Einbrände in Anschluss- oder Elementfugen festgestellt, siehe Tabelle 30, Tabelle 34 und Tabelle 36. Inwiefern diese Einbrände ein Selbstverlöschten des Brandverlaufs beeinflussen, war nicht Bestandteil der Untersuchungen.

Realbrandversuch „V0“ zeigte, dass mit 2 x 25 mm dicken Gipskartonfeuerschutzplatten eine thermische Zersetzung der brennbaren Baustoffe im Naturbrand ausgeschlossen werden kann. Nach Aussage der beratenden Industriepartner des Forschungsvorhabens sollten, im Sinne eines effizienten und wirtschaftlicheren Holzbaus, dünnere Brandschutzbekleidungen erzielt werden. Für die Ausführung mehrgeschossiger Holzgebäude in der Gebäudeklasse 5 muss daher die Durchführbarkeit und Wirksamkeit von Löscharbeiten sichergestellt sein.

Holzmassivbauweise

Das Brandverhalten von bekleideten Holzmassivbauteilen ist mit den bereits erläuterten Prinzipien der bekleideten Holztafelbauweise vergleichbar. Wird der Entzündungsschutz der Holzmassivbauteile über die gesamte Branddauer gewährleistet, kann die thermische Zersetzung, die Rauchgasbildung und die Wärmefreisetzungen, resultierend aus den brennbaren Baustoffen, ausgeschlossen werden. Das Sicherheitsniveau wäre mit dem einer nichtbrennbaren Massivbauweise vergleichbar.

Bei einem unzureichenden oder reduzierten Entzündungsschutz, beispielsweise mit einlagiger Gipsfaserplatte als K₂30, muss die thermische Zersetzung der Holzschicht erwartet werden. Daher erhöht sich die für den Raumbrand verfügbare Brandlast.

Im Realbrandversuch „V1“ wurden vier Brettsperrholzwände mit 1 x 18 mm Gipsfaserplatten bekleidet, die Brettchichtholzdecke wurde unbekleidet ausgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 190 und

die Brandraumtemperaturen sind in Abbildung 204 dargestellt. Nach 40 Minuten wurden Rissbildungen, nach 42 Minuten das erste Abfallen und nach 45 Minuten das großflächige Abfallen der 18 mm Gipsfaserplatten festgestellt. Der Realbrandversuch wurde nach 93 Minuten gelöscht, da die Abbrandtiefen der Brettsperrholzwände 1 und 3 das vorher festgelegte Abbruchkriterium von 40 mm (zwei jeweils 20 mm Lagen des Brettsperrholzes fielen ab) erreichten.

Die Anordnung einer Brandschutzbekleidung resultiert dennoch in einer signifikanten Verbesserung des Brandverhaltens. Die thermischen Einwirkungen und der Sauerstoff haben durch die vorhandene Brandschutzbekleidung nur einen eingeschränkten Zugang zum Holz. Die resultierende Wärmefreisetzung ist daher im Vergleich zur unbekleideten Holzoberfläche zunächst, bis zum Abfallen der Brandschutzbekleidung, reduziert. Gegenüber der Holztafelbauweise besteht bei Holzmassivbauweisen zudem nur ein geringes Risiko auf unentdeckte Hohlraumbrände. Gegenüber der unbekleideten Holzmassivbauweise wird mithilfe der nichtbrennbaren Bekleidung der Gefahr der schnelleren Brandausbreitung über die brennbaren Oberflächen in der Brandentwicklungsphase begegnet. Diese Effekte wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht gezielt untersucht. Es wurde beobachtet, dass die Flammenbrände aus Fugen und Rissen innerhalb der Abkühlphase eine Tendenz zum selbstständigen Verlöschen aufwiesen.

Bei unbekleideten, sichtbaren Holzbauteilen wird sich die brennbare Bauteiloberfläche unmittelbar am Brandereignis beteiligen. Die Brandfläche wird sich daher schneller ausbreiten, außerdem erhöhen sich die für den Brand verfügbaren Brandlasten und die Gesamtwärmefreisetzung. Die Brandentwicklung wird daher intensiviert.

In den Raumbrandversuchen (Room-Corner-Test) des Forschungsvorhabens „TIMpuls“ wurde festgestellt, dass sich mit zunehmender Menge ungeschützter Holzoberflächen die Dauer bis zum Eintritt des Flashovers verkürzt. Die geometrische Anordnung der ungeschützten Holzoberflächen als Decken- oder Wandfläche bildete in dieser Versuchsreihe in Bezug auf die Zeit bis zum Eintritt des Flashovers keinen primären Einflussfaktor.

Mehrere der Realbrandversuche wurden mit unbekleideten Massivholzbauteilen ausgeführt. Im Realbrandversuch „V1“ wurde die Brettchichtholzdecke (Abbildung 190), in „V2“ zwei gegenüberstehende Brettsperrholzwände (Abbildung 205) und in „V3“ die Brettchichtholzdecke (Abbildung 217) sichtbar ausgeführt. Die jeweils weiteren Bauteiloberflächen wurden bekleidet ausgeführt.

Ein Vergleich der Brandraumtemperaturen Realbrandversuchen „V1“, „V2“ und „V0“ (vollständig bekleidet) ist in Abbildung 263 dargestellt. Diese Realbrandversuche wurden mit gleichen Brandraumgeometrien und Öffnungsfaktoren ausgeführt, die Temperaturlaufzeichnung erfolgte in Deckennähe in einer Höhe von 230 cm. Die Temperatur-Zeit-Kurven belegen keinen signifikanten Einfluss der unbekleideten Holzoberflächen auf die Brandentwicklungsphase. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass die Realbrandversuche mit verhältnismäßig großer Ventilationsöffnung und hoher, mobiler Brandlast durchgeführt wurden. In den Room-Corner-Tests hingegen war der Anteil der immobilen Brandlast gegenüber der mobilen Brandlast größer und beeinflusste den Brandverlauf maßgeblich (siehe Abschnitt 3.1.2.1).

Der Realbrandversuch „V4“ belegt, dass nach einem 65-minütigen Realbrand und einem anschließenden Löschangriff die Gefahren des unentdeckten, selbstständig fortlaufenden Schwelens und einer damit verbundenen Wiederentzündung der unbekleideten Massivholzbauteile nicht bestehen. Die Bauteile konnten durch einen üblichen Löschangriff ohne mechanisches Abtragen der Verkohlungs-schicht gelöscht werden. Hohlraumbrände sind konstruktionsbedingt auszuschließen. Der in Tabelle 36 dokumentierte Einbrand in die Anschlussfuge zwischen Wand 2 und der Elementfuge der Decke ist vermutlich auf eine Luftkonvektion infolge der Belüftung durch die Einsatzkräfte zurückzuführen.

3.1.6.4 Erarbeitung von Vorschlägen zur Fortschreibung der Muster-Holzbaurichtlinie

Entsprechend der erläuterten bauordnungsrechtlichen Ausgangssituation und der Beschreibung des Brandverhaltens von Holzbauteilen, werden in diesem Abschnitt Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus und daraus resultierende Vorschläge zur Verwendung von Holzbauweisen in mehrgeschossigen Gebäuden in den Gebäudeklassen 4 und 5 erarbeitet.

Tabelle 48 zeigt die Vorschläge für die Gebäudeklasse 4, Tabelle 49 die Vorschläge für die Gebäudeklasse 5. Eine Bewertung zur Einhaltung des brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus erfolgte im Abschnitt 3.1.6.5 unter Nutzung einer semi-quantitativen Risikoanalyse.

bauordnungsrechtliche Anforderungen

Vorschlag 1 berücksichtigt jeweils die Anforderungen der MBO [204], in der Gebäudeklasse 4 hochfeuerhemmende Holztafelbauteile entsprechend M-HFH HolzR [47] und in der Gebäudeklasse 5 feuerbeständige Bauteile auszuführen.

Vorschlag 2 beinhaltet die Ausführung in Holzmassivbauweise entsprechend M HolzBauRL [155] in den Gebäudeklassen 4 und 5.

Holztafelbau mit nichtbrennbarer Dämmung

Die Holztafelbauweise mit nichtbrennbarer Dämmung und Brandschutzbekleidung über 60 Minuten (ETK) ist entsprechend der MBO und M-HFH HolzR in der Gebäudeklasse 4 zulässig.

Die Erläuterung des Brandverhaltens von Holztafelbauteilen mit nichtbrennbarer Dämmung im Abschnitt 3.1.6.3 beschreibt, dass eine thermische Zersetzung der brennbaren Baustoffe im Naturbrand mit einer bauüblichen Ausführung von 2 x 18 mm dicken Brandschutzbekleidung nicht ausgeschlossen werden kann. Für eine risikogerechte Verwendung von Holztafelbauteilen in der Gebäudeklasse 5 müssen daher die Durchführbarkeit und Wirksamkeit von Löscharbeiten sichergestellt sein.

Vorschlag 3 a

Ein Ausbleiben von Löscharbeiten der Feuerwehr über 60 Minuten kann als beinahe ausgeschlossen angenommen werden. Entsprechend MVV TB [186] und Anhang BB in [21] wird die Versagenswahrscheinlichkeit der Löscharbeiten der Feuerwehr im Sicherheitskonzept der Naturbrandbemessung mit 0,5 (50 %) berücksichtigt. Entsprechend [186] ist dieser Ansatz für alle öffentlichen Feuerwehren zu verwenden. Dieser Wert wurde in [29] ermittelt und bezieht sich auf die Leistungsfähigkeit einer öffentlichen Feuerwehr mit einer Eingreifzeit von 20 Minuten eine maximal beherrschbare Brandfläche von 200 m² zu löschen. Innerhalb dieser Eingreifzeit wird, unter Annahme einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit, eine Brandfläche betrachtet, welche sich theoretisch im weiteren, ungestörten Brandverlauf innerhalb der bauordnungsrechtlich zulässigen Nutzungseinheitengröße von 400 m² in der Gebäudeklasse 4, bzw. sogar 1600 m² in der Gebäudeklasse 5 vergrößern würde. Angaben über die von der Feuerwehr unter den jeweilig vorhandenen Randbedingungen maximal beherrschbaren Brandflächen, sind in der aktuellen Literatur nicht zu finden. In einer älteren Veröffentlichung des vfdb-Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [243] sind maximal beherrschbare Brandflächen für Berufsfeuerwehren von 300 m² und freiwilligen Feuerwehren von maximal 200 m² angegeben.

Die Sicherstellung der Durchführbarkeit und Wirksamkeit des Löschangriffs der Feuerwehr kann durch die Begrenzung der Nutzungseinheitengröße auf eine beherrschbare Brandfläche von beispielsweise 200 m² erreicht werden. Dadurch wird gewährleistet, dass der Löschangriff auch bei längeren Eingreifzeiten wirksam durchgeführt werden kann. Wie in Abschnitt 3.1.6.2 erläutert, sieht auch die M HolzBauRL [155], zur Ausführung einer teilweise unbedeckten Massivholzbauweise, eine Begrenzung der Nutzungseinheitengröße auf 200 m² vor.

In der Gebäudeklasse 4 ist es vertretbar die Dauer des Entzündungsschutzes von 60 Minuten auf 30 Minuten zu reduzieren. Infolge der Begrenzung der Nutzungseinheitengröße auf 200 m² wird der Löschmittelbedarf und der Arbeitsaufwand in der Nachbrandphase verringert, beispielsweise zur Öffnung der Konstruktion und Kontrolle der Holzständer und Gefachdämmstoffe aufgrund eines punktuellen Versagens der Brandschutzbekleidung. Eine quantitative Bewertung dieses Arbeitsaufwandes kann im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht erfolgen und bedarf weiterer Forschung.

Vorschlag 3 b

Ein nicht ausreichend langer Entzündungsschutz kann ebenfalls durch die Anordnung einer automatischen, gebäudeweiten Brandmeldung ausgeglichen werden. Lokale Rauchwarnmelder sind in allen Bundesländern verpflichtend eingeführt. Mit ihrer Einführung wurde das brandschutztechnische Sicherheitsniveau im Wohnungsbau angehoben, sie können somit allerdings nicht als Maßnahme zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus angesetzt werden. Eine vernetzte Brandmeldeanlage zieht die Anordnung weiterer technischer Einrichtungen wie die Übertragungsanlage zur Feuerwehr oder die Brandmeldezentrale nach sich. Dieser erhebliche technische und finanzielle Aufwand sollte daher nur für Sonderbauten mit einem höheren Risikopotenzial gefordert werden. Verhältnismäßig scheint die Anordnung von vernetzten Rauchwarnmeldern nach DIN 14676 [244], beispielsweise als Teil einer Gefahrenwarnanlagen nach DIN VDE V 0826-1 [245] oder einer Brandwarnanlage nach DIN VDE V 0826-2 [246]. Die frühzeitige Alarmierung der Bewohner sorgt dafür, dass diese das Gebäude vor dem Versagen der Brandschutzbekleidung selbstständig verlassen können. Die Auslösung des automatischen Alarms führt außerdem zur unverzüglichen Alarmierung der Feuerwehr durch Nutzer oder Passanten.

Eine eventuell erforderliche Fremdrettung kann somit schneller erfolgen, ebenso die eigentliche Brandbekämpfung. Eine Begrenzung der Nutzungseinheitengröße ist in diesem Zusammenhang nicht notwendig, da der frühzeitig beginnende Löschangriff die Brandausbreitung begrenzt und die maximal beherrschbaren Brandflächen eingehalten werden.

Aufgrund der frühzeitigen Alarmierung der Feuerwehr und den frühzeitigen Beginn der Brandbekämpfung wird die Ausführung eines Entzündungsschutzes über 60 Minuten als überbemessen angenommen. In der Gebäudeklasse 4 wird daher eine Reduzierung des Entzündungsschutzes der tragenden und raumabschließenden Bauteile auf 30 Minuten vorgesehen. Aufgrund der nichtbrennbaren Bauteiloberflächen besteht weiterhin keine Gefahr einer schnellen Brandausbreitung.

Holzmassivbau

Im Abschnitt 3.1.6.3 wurde das Brandverhalten von Holzmassivbauteilen erläutert und dargestellt, dass die Prinzipien des Entzündungsschutzes von bekleideten Holztafelbauteilen im Abschnitt 3.1.6.3 auch für bekleidete Holzmassivbauteile gelten. Im Falle des Versagens der Brandschutzbekleidung führen Holzmassivbauteile gegenüber Holztafelbauteilen dem Brand wesentlich höhere konstruktive Brandlasten hinzu.

Der erläuterte Realbrandversuch „V0“ mit 2 x 25 mm dicken Gipskartonfeuerschutzplatten auf Brettsperrholzbauteilen stellt nachweislich eine Möglichkeit in Holzmassivbauweise dar, dass einer feuerbeständigen Bauweise ebenbürtig ist. Aufgrund der geringen wirtschaftlichen Attraktivität wird dieser Ansatz nicht als Musterbrandschutzkonzept berücksichtigt.

Vorschläge 4 und 5

Aus den zuvor gemachten Erläuterungen zu bekleideten Holztafelelementen lässt sich ableiten, dass die konstruktive Brandlast durch die Begrenzung der Nutzungseinheitengröße und der daraus resultierenden Gewährleistung der Wirksamkeit des Löschangriffs durch die Feuerwehr ausgeglichen werden kann.

Alternativ erhöht eine frühzeitige Alarmierung der Feuerwehr mithilfe einer automatischen, gebäudeweiten Brandmeldung die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Löschangriffs signifikant. In diesem Fall, mit ausschließlich bekleideten Bauteilen, wäre eine Begrenzung der Nutzungseinheitengröße nicht notwendig und eine Reduzierung des Entzündungsschutzes von K₂60 auf K₂30 wäre risikogerecht.

Aufgrund der Erhöhung des Wertempfindens einer Immobilie besteht häufig der Wunsch, einzelne Holzmassivbauteile unbekleidet (K₀) auszuführen. Die restlichen Bauteile der Nutzungseinheit werden bekleidet (K₂30/K₂60) in Holzmassivbau- oder auch in Holztafelbauweise ausgeführt. Die Vorschläge 4 berücksichtigen 25 % und die Vorschläge 5 berücksichtigen 50 % unbekleidete Holzmassivbauteile und brennbare Bauteiloberflächen. Abhängig von der Raumkubatur entsprechen ein bis zwei unbekleidete Wände ca. 25 % und die Decke (ggf. die Decke und eine Wand) ca. 50 % der Bauteiloberflächen einer Nutzungseinheit. Diese Richtwerte können aufgrund der Anordnung von Öffnungen (Fenster und Türen) stark abweichen.

Sichtbare Holzoberflächen können eine schnellere Brandentwicklung und infolgedessen gesteigerte Rauchbildung begünstigen. In einer kritischen Betrachtung wird angenommen, dass der erste Rettungsweg frühzeitig blockiert werden könnte. Durch die rasche Brandentwicklung und die Verrauchung kann gegebenenfalls auch der zweite Rettungsweg über das Fenster bis zum Eintreffen der Feuerwehr nicht nutzbar sein.

Vorschläge 4a und 5a

Zum Ausgleich der schnelleren Brandausbreitung über die brennbaren Bauteiloberflächen wird eine automatische, gebäudeweite Brandmeldung vorgesehen. Da trotz eines frühzeitigen Löschangriffs von einer intensiven Brandentwicklung ausgegangen werden muss und sich die konstruktive Brandlast der unbekleideten Bauteile mit Brandbeginn am Brandgeschehen beteiligt, ist eine Begrenzung der maximalen Nutzungseinheitengröße auf 400 m² als Maßnahme zur Aufrechterhaltung des brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus vorzusehen.

Vorschläge 4b und 5b

Die Vorschläge 4b und 5b entsprechen 4a und 5a, unter Berücksichtigung einer Reduzierung des Entzündungsschutzes der bekleideten Bauteile von K₂60 auf K₂30.

Die Rettungswegsituation muss verbessert werden, beispielsweise durch den Einbau von Rauchschutztüren anstelle von ausschließlich dichtschießenden Türen zwischen der Nutzungseinheit und dem notwendigen Flur. Werden Nutzungseinheiten ohne notwendigen Flur direkt an das Treppenhaus angeschlossen, sollten dementsprechend ebenfalls T 30-RS-Türen anstelle der dicht- und selbstschließenden Türen angeordnet werden. Alternativ wird in diesen Vorschlägen ein zweiter baulicher Rettungsweg beispielsweise über eine Außentreppe angeordnet werden, der bei einer Blockierung des ersten Rettungsweges durch Feuer und Rauch benutzbar wäre. Infolgedessen könnte auf den Einbau von klassifizierten Wohnungseingangstüren verzichtet werden.

Vorschlag 6

Dieser Vorschlag berücksichtigt einen möglichst hohen Anteil brennbarer Oberflächen, alle tragenden oder raumabschließenden Bauteile werden unbekleidet ausgeführt. Als Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus wird die Anordnung einer Lösch(hilfe-)anlage vorgesehen. Durch das Auslösen einer Löschanlage wird die Wärmefreisetzungsrates des Brandes maßgeblich reduziert und die weitere Brandentwicklung wirksam verhindert, gegebenenfalls wird der Brand vollständig gelöscht. Je früher die Brandbekämpfungsmaßnahmen eingeleitet werden, desto effektiver lässt sich die Wärmefreisetzungsrates eines Brandes reduzieren. Im Falle von bekleideten Holztafel- und Holzmassivbauteilen kann angenommen werden, dass sich aufgrund der geringeren, thermischen Beanspruchung die Dauer der Schutzwirkung der Brandschutzbekleidung und damit der Entzündungsschutz der brennbaren Baustoffe erhöht.

Die Planung, der Einbau und die Bemessung von Sprinkleranlagen als selbsttätige Feuerlöschanlage für öffentliche Gebäude oder Industrieanlagen erfolgt entsprechend MVV TB (Anhang 14, Abschnitt 10.4.2) [186] nach DIN EN 12845 [210]. Auf Grund positiver Erfahrungen in anderen europäischen Ländern und begleitenden wissenschaftlichen Arbeiten im nationalen Bereich [247] ist zu überlegen, ob in Wohngebäuden nicht sogenannte „residential sprinkler“ eingesetzt werden können, die direkt an die Hauswasserversorgung angeschlossen werden und somit gegenüber konventionellen Sprinkleranlagen geringere Kosten verursachen. Die Löschanlage dient ebenfalls der automatischen Branderkennung und -meldung, da bei Auslösen eines Sprinklerkopfes durch den Druckabfall im System ein Alarm ausgelöst wird.

Eine Begrenzung der maximalen Nutzungseinheitengröße wird nicht berücksichtigt. Die Löschanlage lokalisiert und begrenzt den Brand bereits in seiner Entwicklungsphase, eine kritische Brandentwicklung in ein für die Feuerwehr nicht kontrollierbares Szenario findet nicht statt. Die Begrenzung der maximalen Nutzungseinheitengröße würde den in Tabelle 67, bzw. Tabelle 68 ermittelten Risikoindex für das Vorschlag 6 weiter reduzieren.

Übersicht möglicher Vorschläge zur Fortschreibung der Muster-Holzbaurichtlinie

Tabelle 48: Vorschläge für die Gebäudeklasse 4

	1	2	3 a	3 b	4 a	4 b	5 a	5 b	6
Bezeichnung	MBO + M-HFH HolzR	M-Holz- BauRL (Holzmassiv)	bekleideter Holztafelbau		Holzmassivbau 25 % unbekleidet		Holzmassivbau 50 % unbekleidet		Löschanlage
Bauteile	REI 60 K ₂ 60	REI 60 75% K ₂ 30; 25% K0	REI 60 K ₂ 30 (nichtbrennbare Dämmstoffe)		REI 60 75% K ₂ 60 25% K0	REI 60 75% K ₂ 30 25% K0	REI 60 50% K ₂ 60 50% K0	REI 60 50% K ₂ 30 50% K0	REI 60 K0
max. Größe der NE	≤ 400 m ²	≤ 200 m ²	≤ 200 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²
Perso- nenret- tung	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	2 bauli- che RW	RW + FW	2 bauli- che RW	RW + FW
Autom. Brand- meldung	batterie. RWM	batterie. RWM	batterie. RWM	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	ver- netzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	Löschanlage mit Alarm
Autom. Löschan- lage	-	-	-	-	-	-	-	-	

NE = Nutzungseinheiten, nb = nichtbrennbare Bauweise (bspw. Mauerwerk), RW = Rettungswege, FW = Feuerwehr, * = beispielsweise nach DIN VDE V 0826

Tabelle 49: Vorschläge für die Gebäudeklasse 5

	1	2	3 a	3 b	4 a	4 b	5 a	5 b	6
Bezeichnung	MBO	M-Holz-BauRL (Holzmassiv)	bekleideter Holztafelbau		Holzmassivbau 25 % unbekleidet		Holzmassivbau 50 % unbekleidet		Löschanlage
Bauteile	REI 90 (nb)	REI 90 75% K ₂ 30; 25% K ₀	REI 90 K ₂ 60 (nichtbrennbar Dämmstoffe)		REI 90 75% K ₂ 60; 25% K ₀	REI 90 75% K ₂ 30; 25% K ₀	REI 90 50% K ₂ 30; 50% K ₀	REI 90 50% K ₂ 30; 50% K ₀	REI 90 K ₀
max. Größe der NE	≤ 1600 m ²	≤ 200 m ²	≤ 200 m ²	≤ 1600 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 1600 m ²
Persone retten	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW
Autom. Brandmeldung	batterie. RWM	batterie. RWM	batterie. RWM	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	Löschanlage mit Alarm
Autom. Löschanlage	-	-	-	-	-	-	-	-	

NE = Nutzungseinheiten, nb = nichtbrennbare Bauweise (bspw. Mauerwerk), RW = Rettungswege, FW = Feuerwehr, * = beispielsweise nach DIN VDE V 0826

3.1.6.5 Semi-quantitative Risikoanalyse

Semi-quantitative Risikoanalysen, auch Index- oder Rankingmethoden genannt, stellen eine vereinfachte Möglichkeit der Risikobewertung dar. Sie sind bezüglich ihres Zeitaufwandes und ihrer Ergebnisgenauigkeit zwischen den qualitativen und quantitativen Verfahren einzuordnen. Im Gegensatz zu den rein qualitativen Risikoanalysen werden die Ergebnisse der semi-quantitativen Methode als Zahlenwert, mit dem sogenannten Risikoindex, dargestellt. Auch wenn eine Berechnung durchgeführt wird, so sind Indexmethoden nicht in der Lage das Brandrisiko quantitativ darzustellen. Die Risikoindezes können nur in Relation zueinander beurteilt werden.

Semi-quantitative Risikoanalysen werden speziell für eine bestimmte Art und Nutzung von Gebäuden entwickelt. Die zu bewertenden, unterschiedlichen Gebäude müssen innerhalb dieser Systemgrenzen liegen. Beispielsweise ist ein Vergleich der Ergebnisse, des hier entwickelte Systems, nur für mehrgeschossige Wohngebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 vorgesehen.

Indexmethoden basieren auf der Gewichtung und Bewertung der verschiedenen Einflussfaktoren auf das Gesamtrisiko. Hierzu ist es wie bei der qualitativen Risikoanalyse notwendig, alle Gebäudeparameter zu erfassen und zu werten. Die Gewichtung und Bewertungsmaßstäbe werden während der Entwicklung der Methode von Expertengruppen festgelegt. Jedoch liegt auch ein großer Teil der Verantwortung beim Entwickler. Dieser legt daneben auch fest, inwieweit die Parameter miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen. Der Anwender hat lediglich die Bewertung des vorliegenden Gebäudes durchzuführen.

FRIM-MAB

Die Abkürzung FRIM-MAB steht für „Fire Risk Index Method for Multi-storey Apartment Buildings“. Die Entwicklung dieser Indexmethode war Gegenstand des Teilprojekts „Fire-safe Wood Frame Multi-storey Apartment Buildings“ des Nordic Wood Forschungsprogramms, das von der Universität Lund im Institut für Fire Safety Engineering bearbeitet wurde. Eine erste Version wurde 1998 von Sven-Eric Magnusson und Tomas Rantatalo [248] vorgestellt und anschließend von Björn Karlsson [89] zur FRIM-MAB 2.0 weiterentwickelt.

Die FRIM-MAB 2.0 wurde von einer Expertengruppe entwickelt und anhand einer Delphi-Befragung bewertet und bestätigt [249]. Die Expertengruppe setzte sich aus jeweils einem Experten der vier teilnehmenden nordischen Länder Dänemark, Finnland Norwegen und Schweden zusammen. Die Gruppe für die Delphi-Befragung bestand aus insgesamt 20 Teilnehmern, die aus den Bereichen Ingenieurbüro, Feuerwehr, Materialprüfung, Forschung und Versicherungen stammten und ebenfalls aus den Ländern Dänemark, Finnland, Norwegen und Schweden kamen. Die Bewertung der einzelnen Gewichtungen erfolgte auf Grundlage des Wissens und der Erfahrung der Experten der Delphi-Gruppe [90].

Die FRIM-MAB 2.0 besitzt einen von der Expertengruppe entwickelten hierarchischen Aufbau und berücksichtigt die Hinweise der entwicklungsbegleitenden Delphigruppe. Die Hierarchie der FRIM-MAB ist in Abbildung 301 dargestellt. Die oberste Ebene in der Hierarchie ist die „Policy“. Sie gibt die übergeordnete Zielsetzung für das Brandschutzkonzept wieder. Die „Policy“ wird in der darunterliegenden Ebene der „Objectives“ in verschiedene Schutzziele untergliedert. Die dritte Ebene der „Strategies“ enthält die verschiedenen Strategien, mit denen die Schutzziele erreicht werden sollen. Die unterste Ebene der „Parameters“ umfasst eine Vielzahl von (Brandschutz-)Maßnahmen, die zur Umsetzung der „Strategies“ beitragen. Da die „Parameters“ in geeigneter Weise messbar oder bewertbar sein müssen, werden sie teilweise zusätzlich in „Sub-Parameters“ unterteilt.

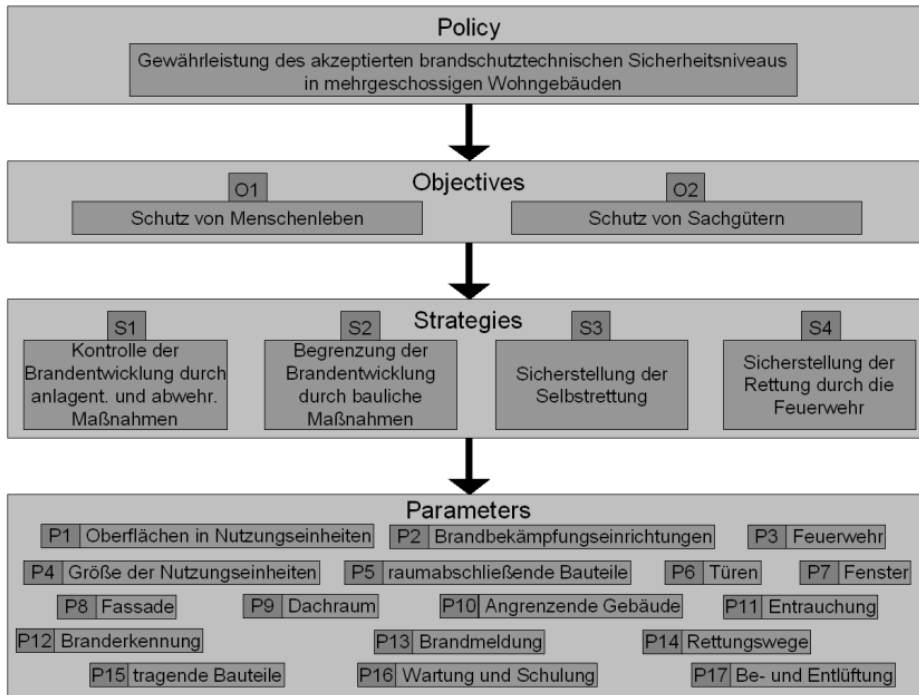


Abbildung 301: Darstellung der Hierarchieebenen der FRIM-MAB [90]

Der Risikoindex setzt sich aus 17 Parametern zusammen, die mit unterschiedlich hoher Gewichtung in das Ergebnis der Bewertung eingehen. Den 17 Parametern mussten Gewichtungen zugeordnet werden, um deren Einfluss auf das Erreichen der „Policy“ berücksichtigen zu können. Dazu wurden alle Mitglieder der Delphigruppe befragt, welchen Einfluss die Bewertungsmerkmale einer Ebene auf die Bewertungsmerkmale der darüber liegenden Ebene haben. Es war somit der Einfluss jedes der 17 „Parameters“ auf die vier „Strategies“ zu bewerten, ebenso der Einfluss der vier „Strategies“ auf die zwei „Objectives“ und abschließend der Einfluss der beiden „Objectives“ auf die „Policy“. Durch entsprechende Multiplikation der Gewichtungen lässt sich der Einfluss eines jeden „Parameters“ auf die „Policy“ bestimmen. Das Prinzip wird in Abbildung 302 verdeutlicht.

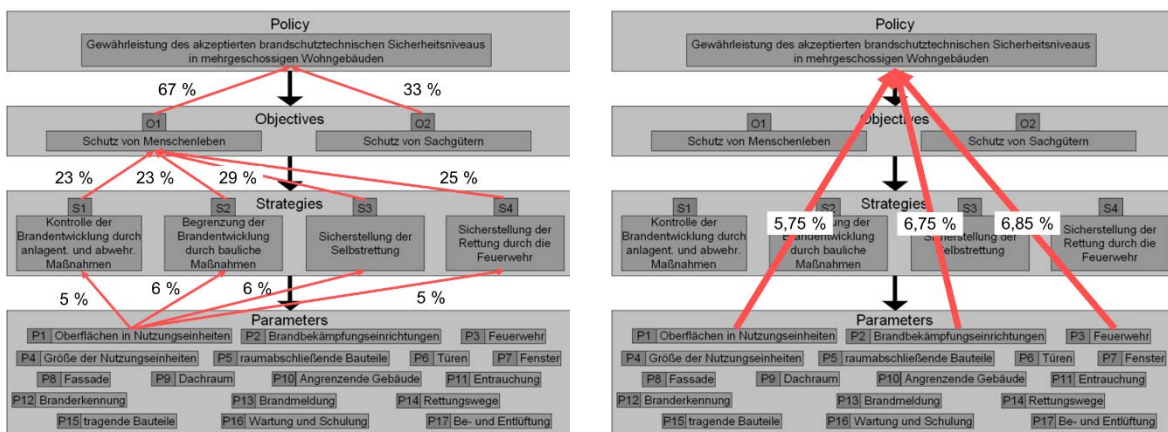


Abbildung 302: Bewertung des Einflusses der aufbauenden Hierarchieebenen (links) und resultierender Einfluss der untersten auf die oberste Hierarchieebene (rechts) [90]

FRIM-MAB-D

Die Indexmethode FRIM-MAB 2.0 wurde 2008 in [90] zur Bewertung von mehrgeschossigen Wohngebäuden der Gebäudeklasse 4 nach deutschem Baurecht zur FRIM-MAB-D weiterentwickelt. Dabei wurde die Bewertung und Gewichtung der für die Brandsicherheit maßgebenden Parameter auf Grundlage einer Expertenbefragung neu gewichtet. Es wurden Experten aus den Bereichen Forschung, Bauaufsicht, Materialprüfung, Feuerwehr, Versicherung und Ingenieurbüro gebeten, die Parameter in der

Indexmethode hinsichtlich einer Anwendung in Deutschland auf mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise nach eigenen Erkenntnissen und Erfahrungen zu bewerten. Die modifizierten Gewichtungen für die Anwendung in Deutschland sind Tabelle 50 zu entnehmen. Der dort durchgeführte Vergleich zwischen den ursprünglichen skandinavischen Werten und den für eine Anwendung in Deutschland angepassten Werten zeigt, dass die Abweichungen zur ursprünglichen Bewertung mit maximal 0,15 als sehr gering anzusehen sind. Die Gewichtungen der Parameter entsprechen in etwa den ursprünglichen Werten und sind daher als vertrauenswürdig und belastbar einzustufen, da sie sich gegenseitig bestätigen.

Tabelle 50: Gegenüberstellung der Gewichtungen der FRIM-MAB-D und FRIM-MAB 2.0

Parameter	Beschreibung	Gewichtung %		Differenz
		Deutschland	Skandinavien	
P1	Oberflächen in NE	5,74	5,76	-0,02
P2	Brandbekämpfungseinrichtung	6,75	6,68	+0,07
P3	Feuerwehr	6,85	6,81	+0,04
P4	Größe der Nutzungseinheiten	6,64	6,66	-0,02
P5	Trennwände	6,75	6,75	0
P6	Türen	6,95	6,98	-0,03
P7	Qualität der Fenster	4,75	4,73	+0,02
P8	Fassade	4,96	4,92	+0,04
P9	Dachraum	5,22	5,15	+0,07
P10	Angrenzende Gebäude	4,03	3,96	+0,07
P11	Entrauchung	6,06	6,09	-0,03
P12	Branderkennung	6,30	6,30	0
P13	Brandmeldung	5,06	5,12	-0,06
P14	Rettungswege	6,06	6,20	-0,14
P15	Tragfähigkeit	6,31	6,30	+0,01
P16	Wartung und Schulung	6,01	6,01	0
P17	Be- und Entlüftung	5,56	5,58	-0,02

NE = Nutzungseinheiten

Außerdem wurden die Parameter zur Berücksichtigung der brandschutztechnisch bekleidet Holzbauweise überarbeitet und zusätzlich sogenannte Kompensationsgruppen zur Erfassung der Wirkung von Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus zusätzlich eingeführt.

Die Anwendung der so entstandenen Indexmethode FRIM-MAB-D auf die in [90] vorgeschlagenen Brandschutzkonzepte für mehrgeschossige Gebäude der Gebäudeklasse 4 hat ergeben, dass auch die Holztafelbauweise mit brennbarer Wärmedämmung aus nachwachsenden Rohstoffen oder mit reduzierter Brandschutzbekleidung und die Holzmassivbauweise sogar in unbekleideter Ausführung, unter Berücksichtigung von Maßnahmen zur Wiederherstellung des Sicherheitsniveaus, das durch die Brandschutzanforderungen der Musterbauordnung und Muster-Holzbaurichtlinie vorgegebene Sicherheitsniveau in vollem Umfang erreichen.

Weiterentwicklung der FRIM-MAB-D für die Gebäudeklasse 5

Um das Brandrisiko von Wohngebäuden in Holzbauweise in der Gebäudeklasse 5 (bis zur Hochhausgrenze) bewerten zu können, musste die FRIM-MAB-D in einigen Parametern angepasst werden. Diese Weiterentwicklung wurde durch alle Projektbearbeiter begleitet und dem projektbegleitenden Ausschuss präsentiert.

Eine Übersicht über die notwendigen Anpassungen der FRIM-MAB-D für die Gebäudeklasse 5 ist in Tabelle 51 dargestellt. Im Folgenden werden die hierfür überarbeiteten Parameter P5, P14 und P15

erläutert. Eine Erläuterung der unveränderten Parameter der FRIM-MAB-D kann [90] entnommen werden. Die Parameterbewertungsblätter entsprechend der FRIM-MAB-D und die überarbeiteten Parameterbewertungsblätter sind diesem Bericht als Anhang 4.8 beigelegt.

Tabelle 51: Anpassung der FRIM-MAB Parameter für die Gebäudeklasse 5

Parameter		GK 4 (FRIM-MAB-D)		GK 5 (neu)			
		Einfluss %	Bewertung -	Einfluss %	Bewertung -		
P1	Oberflächen in NE	5,74	von schlechteste = 0 bis beste = 5	5,74			
P2	Brandbekämpfungseinrichtung	6,75		6,75			
P3	Feuerwehr	6,85		6,85			
P4	Größe der Nutzungseinheiten	6,64		6,64			
P5	Raumabschluss	6,75		6,75		Neu	
P6	Türen	6,95		6,95			
P7	Qualität der Fenster	4,75		4,75			
P8	Fassade	4,96		4,96			
P9	Dachraum	5,22		5,22			
P10	Angrenzende Gebäude	4,03		4,03			
P11	Entrauchung	6,06		6,06			
P12	Branderkennung	6,30		6,30			
P13	Brandmeldung	5,06		5,06			
P14	Rettungswege	6,06		6,06			Neu
P15	Tragfähigkeit	6,31		6,31			Neu
P16	Wartung und Schulung	6,01		6,01			
P17	Be- und Entlüftung	5,56		5,56			

P5: Raumabschließende Bauteile

Der Parameter P5 bewertet die trennenden Bauteile in Bezug auf die raumabschließenden Qualitäten. Dazu wird der Parameter in die drei Subparameter „P5a: Raumabschluss, thermische Isolationswirkung und Rauchdichtigkeit“, „P5b: Brandverhalten“ und „P5c: Durchdringungen“ eingeteilt.

Trennende Bauteile müssen in der GK 4 hochfeuerhemmend und in der GK 5 feuerbeständig ausgeführt werden. Daher wird der Subparameter P5a auf feuerbeständige Bauteile erweitert und die Bewertung dahingehend verschoben, dass diese Zeitspanne mit 5 Punkten bewertet wird. Die schlechteste Bewertung erfolgt mit 0 Punkten, die beste Bewertung mit 5 Punkten. Die Bewertung entsprechend FRIM-MAB-D ist in Tabelle 52 und die überarbeitete Bewertung für die Gebäudeklasse 5 in Tabelle 53 dargestellt.

Tabelle 52: Alte Bewertung des Parameters P5a entsprechend FRIM-MAB-D

Raumabschluss, Wärmedämmung und Rauchdichtigkeit	Bewertung
EI < EI 15	0
EI 15 ≤ EI < EI 30	1
EI 30 ≤ EI < EI 45	3
EI 45 ≤ EI < EI 60	4
EI 60 ≤ EI	5

Tabelle 53: Neue Bewertung des Parameters P5a

Raumabschluss, Wärmedämmung und Rauchdichtigkeit*	Bewertung
$EI < EI 15$	0
$EI 15 \leq EI < EI 30$	1
$EI 30 \leq EI < EI 45$	2
$EI 45 \leq EI < EI 60$	3
$EI 60 \leq EI < EI 90$	4
$EI 90 \leq EI$	5

*für die abschließende Beurteilung der Rauchdichtigkeit sind nach DIN 4102-2 gesonderte Beobachtungen einzu beziehen

Der Subparameter P5b bewertet das Brandverhalten der raumabschließenden Bauteile. In der qualitativen Risikoanalyse wurde erläutert, dass ein nicht über den vollständigen Brandverlauf anhaltender Entzündungsschutz das brandschutztechnische Sicherheitsniveau reduziert. Das Bewertungsschema der FRIM-MAB-D [90] ist in Tabelle 54 dargestellt. Es wurde um Branddauern größer 60 Minuten erweitert, das neue Bewertungsschema ist in Tabelle 55 dargestellt. Weiterhin wurden die Spalten "Rob" (Robustheit) ergänzt. Die Robustheit bewertet die Widerstandsfähigkeit der Bauteile gegen unvorhergesehene Einflüsse, wie eine nicht fachgerechte Ausführung der Brandschutzbekleidung, Beschädigungen aufgrund unsachgemäßer Nutzung oder eine höhere Brandlastdichte infolge eines außergewöhnlichen Nutzerverhaltens. Solche Einflüsse können die Wirksamkeit des Entzündungsschutzes einer Brandschutzbekleidung punktuell stören und in einer geringen zusätzlichen Wärmefreisetzung und in eine Erhöhung des Löschaufwands resultieren.

Tabelle 54: Alte Bewertung der Sub-Parameter P5b und P15c entsprechend FRIM-MAB-D

Bauteilqualität	Bewertung
HTB, nb, K ₂ 60	5
HTB, nb, K ₂ 30	4
HTB, b, K ₂ 60	5
HTB, b, K ₂ 30	4
HM, K ₂ 60	5
HM, K ₂ 30	4
HM, K15	3
HM	1

HTB: Holztafelbauweise, HM: Holzmassivbau, nb: nichtbrennbarer Dämmstoff, b: brennbarer Dämmstoff

Tabelle 55: Neue Bewertung der Sub-Parameter P5b und P15c

Bauteilqualität	Wärmefreisetzung innerhalb ... Minuten					Löschverhalten innerhalb ... Minuten					Mittelwert	Bewertung
	15	30	60	>60	Rob	15	30	60	>60	Rob		
Mauerwerk	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
HTB, nb, K ₂ 60	5	5	5	3	3	5	5	5	2	3	4,1	4
HTB, nb, K ₂ 30	5	5	3	0	3	5	5	2	2	3	3,3	3
HTB, nb, K15*	5	3	0	0	3	5	2	2	2	3	2,5	2
HM, K ₂ 60	5	5	5	3	3	5	5	5	3	3	4,2	4
HM, K ₂ 30	5	5	3	0	3	5	5	3	2	3	3,4	3
HM, K15*	5	3	0	0	3	5	3	2	2	3	2,6	2
HM	0	0	0	0	4	3	2	2	2	4	1,7	1

HTB: Holztafelbauweise, HM: Holzmassivbau, nb: nichtbrennbarer Dämmstoff, K...: Bekleidungs-/Kapseldauer, Rob.: Robustheit, K15*: Bauteil mit Entzündungsschutz über 15 Minuten

In Tabelle 55 wird die Wärmefreisetzung und das Löschalten verschiedener Bauteile im Verlauf eines Raumbrandes in Abhängigkeit ihrer thermischen Schutzwirkung bewertet. Aus den Einzelwerten wird ein Mittelwert und abgerundet eine resultierende Bewertung bestimmt.

Mit Blick auf die bauordnungsrechtlichen Entwicklungen im Holzbau in der Vergangenheit (z.B. M-HFH-HolzR) wurde hier durchgehend das K₂-Kriterium zur Beschreibung der Bauteilqualität gewählt. Trotz der Ergebnisse der Realbrandversuche im Abschnitt 3.1.2.12 wird vereinfachend angenommen, dass beispielsweise unterhalb einer "K₂30" Brandschutzbekleidung unmittelbar nach der 30. Brandminute eine starke thermische Zersetzung der brennbaren Baustoffe einsetzt. Die thermische Zersetzung resultiert in Wärmefreisetzungen und einen Lösbedarf. Die aktuell vorliegenden Brandversuchsergebnisse für Gipskarton-Feuerschutzplatten und Gipsfaserplatten zum Kapselkriterium zeigen auf, dass diese in der Regel über die eigentliche Klassifikationszeit hinaus weitere Schutzwirkungen für dahinterliegendes Holz oder Holzwerkstoffe bieten. Diese Schutzwirkungen setzen sich zusammen aus einer Zeitspanne bis zum Erreichen von 300 °C hinter der Brandschutzbekleidung sowie aus der Schutzwirkung eines reduzierten Abbrandes (reduzierte Wärmefreisetzung) infolge der noch vorhandenen Gefügestabilität der Brandschutzbekleidung, ohne dass diese abfällt. Diese zusätzlichen Schutzzeiten resultieren daher, dass bei der Klassifizierung hinsichtlich des Kapselkriteriums unter anderem keine punktuellen Verkohlungen zulässig sind. Daher ist die Durchdringung der Brandschutzbekleidung mit metallischen Verbindungsmittel maßgebend für die Dimensionierung der Brandschutzbekleidung. Für übliche K₂60-Bekleidungen bedeutet dies, dass bei Erreichen der 60. Brandminute in der Grenzsicht zwischen ungestörter Brandschutzbekleidung und Holz bzw. Holzwerkstoff, Temperaturen deutlich unterhalb der geforderten 270 °C herrschen. Dies stellt eine durchaus gewollte zusätzliche Sicherheit gegenüber der Gefahr von Hohlraumbränden dar. Zugleich bedeutet es, dass auch nach Überschreiten der Kapselungsdauer die Bekleidung nicht abgefallen und die Wärmefreisetzung der Bauteiloberfläche begrenzt ist. Beide Schutzwirkungen werden in DIN EN 1995-1-2 [42] mit den Zeitdauern t_{fr} und t_{ch} getrennt betrachtet. Um diesen Einfluss auf die Wärmefreisetzungsrate abweichend zum hier genutzten K₂-Kriterium genauer abbilden zu können, könnte zukünftig eine Weiterentwicklung der Parameter unter Berücksichtigung der vorgenannten Prozesse erfolgen. Im Sinne einer praxisnahen Anwendung wurde in diesem Bericht dennoch das K₂-Kriterium zur Leistungsbeschreibung gewählt wohlwissend, dass dies hinsichtlich Wärmefreisetzungsrate eine Annahme darstellt, die sehr auf der sicheren Seite liegt.

Die Wärmefreisetzung wird mit 5 bewertet, wenn keine thermische Zersetzung der Konstruktion stattfindet. Nach Erreichen von ca. 300 °C hinter der Brandschutzbekleidung beginnt die thermische Zersetzung des Holzes. Eine mechanisch befestigte Bekleidung ist zu diesem Zeitpunkt dennoch vorhanden und noch nicht abgefallen. Die Flammen haben somit keinen direkten Zugang zum Holz und das Sauerstoffangebot ist ebenfalls durch die Bekleidung begrenzt. Die thermische Zersetzung ist im Vergleich zu unbekleideten Bauteilen reduziert. Dieser Zustand wird mit 3 bewertet, da davon ausgegangen wird, dass ein Abfallen der Bekleidung erst mit Erreichen der nachfolgenden Klassifikationszeit eintritt. Bei

weiterem Brandfortschritt kann die Bekleidung abfallen. Die Zeitspanne zwischen dem Beginn thermischer Zersetzung des Holzes und dem Abfallen der Bekleidung ist unter anderem vom Baustoff der Bekleidung, der Art und Ausführung ihrer Befestigung, aber auch der thermischen Beanspruchung und der räumlichen Anordnung abhängig. Beispielsweise wäre die Zeitspanne bei angeklebten Bekleidungen vermutlich geringer als bei mechanischen Befestigungen und bei Lehmbauplatten gegenüber den hier berücksichtigten Gipsfaser- und Gipskartonplatten länger. In solchen Fällen ist eine Anpassung der hier erfolgten Bewertung notwendig. Eine spezifische Bewertung dieses Kriteriums erlaubt beispielsweise DIN EN 1995-1-2 [42] bzw. prEN 1995-1-2 über den Parameter t_f . Die Wärmefreisetzung nach dem Abfallen der Bekleidung wird mit 0 bewertet, wenn die freigelegte Bauteilebene vollflächig aus Holz besteht, wie bei Massivholzbauteilen oder Holztafelbauteilen mit unterhalb der Bekleidung angeordneten Holzwerkstoffplatten. Ebenso wird die Wärmefreisetzung eines unbekleideten Holzmassivbauteils von Beginn an mit 0 bewertet.

Die Robustheit (Rob.) von Bauteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen (bspw. Mauerwerk) kann prinzipiell infrage gestellt werden. Eine unzureichende Ausführung von Bauteilfugen oder unzulässige Installationsführungen kann ebenso wie bei Holzbauteilen in zusätzliche Wärmefreisetzungen resultieren. In der hier durchgeführten Untersuchung werden sie konservativ mit 5 Punkten bewertet. In Holztafelbauteilen mit nichtbrennbaren Dämmstoffen könnten vereinzelte thermische Zersetzungsprozesse stattfinden. Allerdings wird aufgrund der großflächig wirksamen Bekleidung, des reduzierten Sauerstoffangebotes und des geringen Anteils der freigesetzten, konstruktiven Brandlast im Verhältnis zur größeren, mobilen Brandlast im Brandraum nur eine geringfügig höhere Wärmefreisetzung auftreten, wie die Belegversuche zeigten. Daher werden diese mit 3 Punkten bewertet. Bei unbekleideten Massivholzbauteilen ist die zusätzliche Wärmefreisetzung aus dem immobilen, konstruktiven Anteil über den Brandverlauf bereits kritischer bewertet. Ausführungsfehler resultieren in tiefe Einbrände in Fugen oder Anschlüssen und wirken sich nur noch in geringem Umfang kritischer aus, ihre Robustheit wird daher mit 4 bewertet.

Das Löschverhalten wird mit 5 bewertet, sofern keine Löschmaßnahmen notwendig sind. Nach Versagen der Brandschutzbekleidung der Holztafelbauteile besteht die Gefahr von Hohlraumbränden. Holztafelbauteile mit nichtbrennbarer Dämmung werden ab diesem Zeitpunkt mit 2 bewertet. Bei bekleideten Holzmassivbauteilen hat ein Versagen der Brandschutzbekleidung das Entzünden der Holzkonstruktion zur Folge. Unbekleidete Holzmassivbauteile werden voraussichtlich unmittelbar entzünden. Zwar besteht bei dieser Bauweise keine unmittelbare Gefahr durch versteckte Hohlraumbrände oder Rauchgasweiterleitungen innerhalb der Bauteile, allerdings muss im Rahmen der Löscharbeiten ein selbstständiges Schwelen des Holzes ausgeschlossen werden. Das Löschverhalten wird daher mit 3 zu bewerten. Infolge der weiteren thermischen Zersetzung der Holzelemente vergrößert sich die Kohleschichtdicke. Die durchgeführten Löscharbeiten der im Abschnitt 3.1.6.3, bzw. Abschnitt 3.1.2.12 erläuterten Realbrandversuche belegen, dass die Bauteile ohne mechanisches Abtragen der Verkohlenschicht gelöscht werden können. Dennoch kann das Abtragen der Kohleschicht zur Kontrolle von Schwelnestern notwendig sein, daher wird dieser Zustand als etwas kritischer beurteilt und mit 2 bewertet.

Die Robustheit der nichtbrennbaren Bauweise wird mit 5 bewertet, da konservativ angenommen wird, dass eventuelle Ausführungsfehler im Mauerwerks- oder Stahlbetonbau in keinen relevanten Mehraufwand der Brandbekämpfung resultieren. Bei der Holztafelbauweise mit nichtbrennbaren Dämmstoffen können, bei einem punktuellen Versagen der Brandschutzbekleidung, vereinzelte Zersetzungsprozesse und Schwelnester an der hölzernen Tragkonstruktion auftreten. Infolgedessen sind an die primären Löscharbeiten anschließende Rückbauarbeiten, wie das Öffnen der Brandschutzbekleidung und der teilweise Ausbau der Dämmstoffe, notwendig und sie werden daher mit 3 bewertet. Bei bekleideten Holzmassivbauteilen sind infolge von Ausführungsfehlern oder der Beschädigung der Brandschutzbekleidung intensivere Rückbauarbeiten zu erwarten, beispielsweise das Öffnen der Brandschutzbekleidung und das Entfernen von Holzkohleschichten. Sie werden daher mit 3 bewertet. Ausführungsfehler an unbekleideten Holzmassivbauteilen resultieren in zusätzliche Einbrände in Fugen oder Bauteilanschlüssen. Sie wirken sich nur geringfügig auf die notwendigen Löscharbeiten aus, die Robustheit unbekleideter Holzmassivbauteile wird daher mit 4 bewertet.

Abschließend wird aus den 10 Einzelwerten der Wärmefreisetzung und Löscharbeit der Mittelwert gebildet und abgerundet als Bewertung der Subparameter P5b und P15c verwendet.

P14: Rettungswege

Rettungswege dienen in erster Linie der Selbstrettung, sind aber gleichzeitig auch Angriffswege der Feuerwehr. Das Bewertungsschema des Subparameters „P14b: Dimensionierung und Anordnung der Rettungswege“ wird an die höhere Geschossanzahl in der GK 5 angepasst. Die größere Anzahl der Stockwerke erhöht sowohl die zu evakuierende Personenanzahl, als auch die (vertikalen) Fluchtweglängen.

Die Bewertung des Subparameter P14b erfolgt somit unter der Berücksichtigung folgender Einflussgrößen:

- P14b.1: maximale (horizontale) Entfernung zu einer notwendigen Treppe
 - A < 15m
 - B = 15 – 30 m
 - C > 30 m
- P14b.2: alte Bewertung der Anzahl der Stockwerke entsprechend FRIM-MAB-D
 - D ≤ 4
 - E = 5 – 6
- P14b.2: neue Bewertung der Anzahl der Stockwerke
 - D = 1 – 3
 - E = 4 – 5
 - X > 5
- P14.3: max. Anzahl an NE je Geschoss, die an einen Rettungsweg anschließen
 - F ≤ 4
 - G ≥ 5

Die überarbeitete Bewertung ist in Tabelle 56 dargestellt. Die Bewertung erfolgt in Anlehnung an FRIM-MAB-D [90] und FRIM-MAB 2.0 [89]. Die schlechteste Bewertung erfolgt mit 0 Punkten, die beste Bewertung mit 5 Punkten.

Tabelle 56: Neue Bewertung des Sub-Parameters P14b

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen																	
	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
P14b.1	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
P14b.2	X	X	E	E	D	D	X	X	E	E	D	D	X	X	E	E	D	D
P14b.3	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F
Bewertung P14b	0	0	0	1	2	2	2	2	3	3	4	4	3	3	4	4	5	5

P15: Tragende Bauteile

Der Parameter P15 bewertet die tragenden Bauteile und wird in die drei Subparameter „P15a: Tragfähigkeit“, „P15b: Stoßbeanspruchung“ und „P15c: Brandverhalten“ eingeteilt.

Tragende Bauteile müssen in der GK 4 hochfeuerhemmend und in der GK 5 feuerbeständig ausgeführt werden. Die Bewertung des Subparameters P15a entsprechend FRIM-MAB-D [90] und FRIM-MAB 2.0 [89] ist in Tabelle 57 dargestellt. Die schlechteste Bewertung erfolgt mit 0 Punkten, die beste Bewertung mit 5 Punkten.

In den älteren Versionen der FRIM-MAB für die Gebäudeklasse 4 wurden raumabschließende Bauteile EI 60 im Subparameter P5a mit 5 Punkten bewertet, siehe Tabelle 52. Für die Tragfähigkeit im Subparameter P15c war eine Übererfüllung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen möglich, R 90 wurde entsprechend Tabelle 57 mit 5 Punkten bewertet.

Für die hier präsentierte Weiterentwicklung der FRIM-MAB zur Nutzung in der Gebäudeklasse 5 wäre die Fortführung dieser Übererfüllung möglich, R 120 würde mit 5 Punkten bewertet werden. Projektintern wurde festgelegt, dass diese Übererfüllung aufgrund der geringen baupraktischen Relevanz nicht fortgeführt wird. Tabelle 57 gilt dementsprechend auch für die hier präsentierte Nutzung in der Gebäudeklasse 5.

Tabelle 57: Alte Bewertung des Parameters P15a entsprechend FRIM-MAB-D

Tragfähigkeit	Bewertung
R < R 30	0
R 30 ≤ R < R 60	2
R 60 ≤ R < R 90	4
R 90 ≤ R	5

Im Subparameter P15c wird das Brandverhalten tragender Bauteile bewertet. Diese Beurteilung findet äquivalent zum Brandverhalten der raumabschließenden Bauteile im Subparameter P5b statt. Siehe dafür Tabelle 55.

3.1.6.6 Ausführliche Parameterbewertung der erarbeiteten Vorschläge

In Tabelle 58 und Tabelle 59 ist die ausführliche Parameterbewertung der in Abschnitt 3.1.6.4 beschriebenen Vorschläge zur Fortschreibung der Muster-Holzbaurichtlinie dargestellt. Die Bewertung ergibt sich aus den Parameterbewertungen entsprechend Anhang 4.8 und den hier beschriebenen Anpassungen für die Anwendung in der Gebäudeklasse 5. Die für die hier untersuchten Differenzen zwischen Holz- und Massivbauweisen nicht relevanten Parameter (bspw. P7 Qualität der Fenster) werden in allen Vorschlägen gleichbleibend bewertet.

Tabelle 58: Parameterbewertung der Vorschläge für die Gebäudeklasse 4

Parameter		Wichtung	Vorschläge								
			1	2	3 a	3 b	4 a	4 b	5 a	5 b	6
P1	Oberflächen in NE	5,74%	5	4	5	5	4	4	3	3	1
P2	Brandbekämpfungseinrichtung	6,75%	0	0	0	0	0	0	0	0	4
P3	Feuerwehr	6,85%	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15
P4	Größe der NE	6,64%	1	2	2	1	1	1	1	1	1
P5	Trennwände	6,75%	3,52	2,91	3,11	3,11	3,21	2,91	2,91	2,70	2,29
P6	Türen	6,95%	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
P7	Qualität der Fenster	4,75%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	Fassade	4,96%	3	3	3	3	3	3	3	3	3
P9	Dachraum	5,22%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	Angrenzende Gebäude	4,03%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P11	Entrauchung	6,06%	2	2	2	2	2	2	2	2	2
P12	Branderkennung	6,30%	2	2	2	5	5	5	5	5	4
P13	Brandmeldung	5,06%	3	3	3	4	4	4	4	4	4
P14	Rettungswege	6,06%	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	2,10	1,42	2,10	1,42
P15	Tragfähigkeit	6,31%	4,0	3,61	3,74	3,74	3,81	3,61	3,61	3,48	3,22
P16	Wartung und Schulung	6,01%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	Be- und Entlüftung	5,56%	2	2	2	2	2	2	2	2	2
S = \sum Parameter * Wichtung =			1,96	1,90	1,98	2,16	2,11	2,12	2,02	2,04	2,04
Risikoindex = 5 - S =			3,04	3,10	3,02	2,84	2,89	2,88	2,98	2,96	2,96

NE = Nutzungseinheiten

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Tabelle 59: Parameterbewertung der Vorschläge für die Gebäudeklasse 5

Parameter		Wichtung	Vorschläge								
			1	2	3 a	3 b	4 a	4 b	5 a	5 b	6
P1	Oberflächen in NE	5,74%	5	4	5	5	4	4	3	3	1
P2	Brandbekämpfungseinrichtung	6,75%	0	0	0	0	0	0	0	0	4
P3	Feuerwehr	6,85%	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15
P4	Größe der NE	6,64%	0	2	2	0	1	1	1	1	0
P5	Trennwände	6,75%	4,28	3,26	3,87	3,87	3,56	3,26	3,26	3,05	2,64
P6	Türen	6,95%	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
P7	Qualität der Fenster	4,75%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P8	Fassade	4,96%	3	3	3	3	3	3	3	3	3
P9	Dachraum	5,22%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P10	Angrenzende Gebäude	4,03%	1	1	1	1	1	1	1	1	1
P11	Entrauchung	6,06%	2	2	2	2	2	2	2	2	2
P12	Branderkennung	6,30%	2	2	2	5	5	5	5	5	4
P13	Brandmeldung	5,06%	3	3	3	4	4	4	4	4	4
P14	Rettungswege	6,06%	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,83	1,15	1,83	1,15
P15	Tragfähigkeit	6,31%	4,76	4,11	4,50	4,50	4,31	4,11	4,11	3,98	3,72
P16	Wartung und Schulung	6,01%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P17	Be- und Entlüftung	5,56%	2	2	2	2	2	2	2	2	2
S = \sum Parameter * Wichtung =			1,98	1,94	2,07	2,17	2,15	2,16	2,06	2,08	2,02
Risikoindex = 5 – S =			3,02	3,06	2,93	2,83	2,85	2,84	2,94	2,92	2,98

NE = Nutzungseinheiten

3.1.6.7 Resultierende Risikobewertung der Vorschläge zur Fortschreibung der Muster-Holzbaurichtlinie

Die Vorschläge und ihre Risikobewertung sind in Tabelle 60 für die Gebäudeklasse 4 und in Tabelle 61 für die Gebäudeklasse 5 zusammengefasst. Ein höherer Risikoindex entspricht einem höheren Brandrisiko.

Tabelle 60: Risikoindizes der Vorschläge für die Gebäudeklasse 4

Bezeichnung	1	2	3 a	3 b	4 a	4 b	5 a	5 b	6
		MBO + M-HFH HolzR	M-Holz-BauRL (Holzmassiv)	bekleideter Holztafelbau		Holzmassivbau 25 % unbekleidet		Holzmassivbau 50 % unbekleidet	
Bauteile	REI 60 K ₂ 60	REI 60 75% K ₂ 30 25% K ₀	REI 60 K ₂ 30 (nichtbrennbare Dämmstoffe)		REI 60 75% K ₂ 60 25% K ₀	REI 60 75% K ₂ 30 25% K ₀	REI 60 50% K ₂ 60 50% K ₀	REI 60 50% K ₂ 30 50% K ₀	REI 60 K ₀
max. Größe der NE	≤ 400m ²	≤ 200 m ²	≤ 200 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²
Pers. rettung	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW
Autom. Brandmeldung	batterie. RWM	batterie. RWM	batterie. RWM	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	Löschanlage mit Alarm
Autom. Löschanlage	-	-	-	-	-	-	-	-	
Risikoindex R	3,04	3,10	3,02	2,84	2,89	2,88	2,98	2,96	2,96
R wenn K₂60	3,04	3,06	-	-	2,89	2,85	2,98	2,94	-

NE = Nutzungseinheiten, nb = nichtbrennbare Bauweise (bspw. Mauerwerk), RW = Rettungswege, FW = Feuerwehr, * = beispielsweise nach DIN VDE V 0826

Tabelle 61: Risikoindizes der Vorschläge für die Gebäudeklasse 5

Bezeichnung	1	2	3 a	3 b	4 a	4 b	5 a	5 b	6
	MBO	M-Holz-BauRL (Holzmassiv)	bekleideter Holztafelbau	Holzmassivbau 25 % unbekleidet		Holzmassivbau 50 % unbekleidet		Löschanlage	
Bauteile	REI 90 (nb)	REI 90 75% K ₂ 30; 25% K ₀	REI 90 K ₂ 60 (nichtbrennbar Dämmstoffe)		REI 90 75% K ₂ 60; 25% K ₀	REI 90 75% K ₂ 30 25% K ₀	REI 90 50% K ₂ 30 50% K ₀	REI 90 50% K ₂ 30 50% K ₀	REI 90 K ₀
max. Größe der NE	≤ 1600m ²	≤ 200 m ²	≤ 200 m ²	≤ 1600 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 1600 m ²
Personenrettung	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW
Autom. Brandmeldung	batterie. RWM	batterie. RWM	batterie. RWM	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	Löschanlage mit Alarm
Autom. Löschanlage	-	-	-	-	-	-	-	-	
Risikoindex R	3,02	3,06	2,93	2,83	2,85	2,84	2,94	2,92	2,98

NE = Nutzungseinheiten, nb = nichtbrennbare Bauweise (bspw. Mauerwerk), RW = Rettungswege, FW = Feuerwehr; * = beispielsweise nach DIN VDE V 0826

Der Vorschlag 1 entspricht jeweils den Anforderungen der Musterbauordnung und bildet mit den Risikoindizes von 3,04 in der Gebäudeklasse 4 und 3,02 in der Gebäudeklasse 5 die Referenz für die weiteren, von der MBO abweichenden Vorschläge. Für die Ausführung in Holzmassivbauweise entsprechend der M-Holz-BauRL wurde im Vorschlag 2 ein Risikoindex von 3,10 in der Gebäudeklasse 4 und 3,06 in der Gebäudeklasse 5 ermittelt. Somit ist das Sicherheitsniveau der Holzmassivbauweise entsprechend M-Holz-BauRL gegenüber der hochfeuerhemmenden und feuerbeständigen Bauweise der MBO als geringer nachgewiesen.

Auf Grundlage der qualitativen Risikoanalyse im Abschnitt 3.1.6.3 wurden im Abschnitt 3.1.6.4 die Vorschläge zur Verwendung der Holztafelbauweise und der Massivholzbauweise in den Gebäudeklassen 4 und 5 erläutert. Die Vorschläge 3 berücksichtigen die Holztafelbauweise mit nichtbrennbarer Gefächdämmung. Die Vorschläge 4 berücksichtigen 25 % und die Vorschläge 5 berücksichtigen 50 % unbekleidete Holzmassivbauteile, die restlichen Bauteile der Nutzungseinheit werden bekleidet (K₂30/K₂60) in Holzmassivbau- oder auch in Holztafelbauweise ausgeführt. Vorschlag 6 berücksichtigt die Ausführung einer Löschanlage in einer Nutzungseinheit in unbekleideter Massivholzbauweise.

Alle erarbeiteten Vorschläge weisen gemäß FRIM-MAB geringere Brandrisiken als das jeweilige bauordnungsrechtlich geforderte Sicherheitsniveau des Vorschlags 1 in der Gebäudeklasse 4 und Gebäudeklasse 5 auf.

Für die Gebäudeklasse 4 wurde Tabelle 60 dahingehend ergänzt, welche Risikoindizes sich bei einer Ausführung der Bauteile mit einer Brandschutzbekleidung über 60 Minuten ergeben. Die Bewertung der Subparameter P5b und P15c ändert sich in diesem Fall von 3 auf 4. Die Risikoindizes reduzieren sich erwartungsgemäß, beispielsweise für den Vorschlag 5 b von 2,96 auf 2,94.

Diese Ergebnisse belegen, dass bei ordnungsgemäßer Umsetzung der entwickelten Vorschläge die Verwendung von Holzbauteilen in der Gebäudeklasse 4 und 5 wirksam ausgeglichen werden kann und das geforderte, brandschutztechnische Sicherheitsniveau eingehalten wird.

Nachweis der Kompensationsindices

Im Rahmen der argumentativen und semi-quantitativen Risikoanalysen wurde erläutert, durch welche Parameter ein erhöhtes Brandrisiko eines anderen Parameters ausgeglichen werden kann. Als Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Sicherheitsniveaus kommen sowohl Parameter mit gesetzlicher Anforderung in Frage, als auch Parameter ohne unmittelbare, gesetzliche Anforderung. Sollen Parameter mit gesetzlicher Anforderung zum Ausgleich herangezogen werden, so muss die bauaufsichtliche Mindestanforderung übertroffen werden um ein darüberhinausgehendes Sicherheitsniveau zu erzielen. Diese zusätzliche Sicherheit kann dann zur Kompensation eines anderen Parameters herangezogen werden. Dazu muss sichergestellt sein, dass die entsprechende Maßnahme auch zielgerichtet das erhöhte Risiko ausgleicht. Dafür wurde entsprechend [90] mittels der qualitativen Risikoanalyse sogenannte Kompensationsgruppen gebildet und ein Risikovergleich entsprechend der FRIM-MAB durchgeführt.

In Tabelle 62 bis Tabelle 68 sind die relevanten Parameterbewertungen und resultierenden Kompensationsindices der Vorschläge 3 bis 6 gegenüber den bauordnungsrechtlichen Anforderungen (Vorschlag 1) dargestellt. Ein geringerer Kompensationsindex entspricht einem geringeren Brandrisiko innerhalb der Gruppe im jeweiligen Vorschlag und zeigt, dass das erhöhte Risiko zielgerichtet ausgeglichen werden konnte.

Tabelle 62: Kompensationsindex für Vorschlag 3 a

Parameter		Wichtung	GK 4		GK 5	
			1 (MBO)	3 a	1 (MBO)	3 a
P4	Größe der NE	6,64 %	1	2	0	2
P5b	Trennwände	2,77 %	4	3	5	4
P15c	Tragfähigkeit	1,64 %	4	3	5	4
S = \sum Parameter * Wichtung =			0,24	0,27	0,22	0,31
Kompensationsindex = $(5 * 11,05 \%) - S$ =			0,31	0,29	0,33	0,24

NE = Nutzungseinheiten, GK = Gebäudeklasse

Tabelle 63: Kompensationsindex für Vorschlag 3 b

Parameter		Wichtung	GK 4		GK 5	
			1 (MBO)	3 b	1 (MBO)	3 b
P5b	Trennwände	2,77 %	4	3	5	4
P12	Branderkennung	6,30 %	2	5	2	5
P13	Brandmeldung	5,06 %	3	4	3	4
P15c	Tragfähigkeit	1,64 %	4	3	5	4
S = \sum Parameter * Wichtung =			0,45	0,65	0,50	0,69
Kompensationsindex = $(5 * 15,77 \%) - S$ =			0,33	0,14	0,29	0,09

NE = Nutzungseinheiten, GK = Gebäudeklasse

Tabelle 64: Kompensationsindex für Vorschlag 4 a

Parameter		Wichtung	GK 4		GK 5	
			1 (MBO)	4 a	1 (MBO)	4 a
P1	Oberflächen in NE	5,74 %	5	4	5	4
P4	Größe der NE	6,64 %	-	-	0	1
P5b	Trennwände	2,77 %	4	3,25	5	3,25
P12	Branderkennung	6,30 %	2	5	2	5
P13	Brandmeldung	5,06 %	3	4	3	4
P15 c	Tragfähigkeit	1,64 %	4	3,25	5	3,25
S = \sum Parameter * Wichtung =			0,74	0,89	0,79	0,96
Kompensationsindex = (5 * 21,51 %) – S =			0,33	0,19	-	-
Kompensationsindex = (5 * 28,15 %) – S =			-	-	0,62	0,45

NE = Nutzungseinheiten, GK = Gebäudeklasse

Tabelle 65: Kompensationsindex für Vorschlag 4 b

Parameter		Wichtung	GK 4		GK 5	
			1 (MBO)	4 b	1 (MBO)	4 b
P1	Oberflächen in NE	5,74 %	5	4	5	4
P4	Größe der NE	6,64 %	-	-	0	1
P5b	Trennwände	2,77 %	4	2,5	5	2,5
P12	Branderkennung	6,30 %	2	5	2	5
P13	Brandmeldung	5,06 %	3	4	3	4
P14	Rettungswege	6,06 %	1,42	2,1	1,15	1,83
P15 c	Tragfähigkeit	1,64 %	4	2,5	5	2,5
S = \sum Parameter * Wichtung =			0,83	0,98	0,85	1,03
Kompensationsindex = (5 * 27,57 %) – S =			0,55	0,39	-	-
Kompensationsindex = (5 * 34,21 %) – S =			-	-	0,57	0,39

NE = Nutzungseinheiten, GK = Gebäudeklasse

Tabelle 66: Kompensationsindex für Vorschlag 5 a

Parameter		Wichtung	GK 4		GK 5	
			1 (MBO)	5 a	1 (MBO)	5 a
P1	Oberflächen in NE	5,74 %	5	3	5	3
P4	Größe der NE	6,64 %	-	-	0	1
P5b	Trennwände	2,77 %	4	2,5	5	2,5
P12	Branderkennung	6,30 %	2	5	2	5
P13	Brandmeldung	5,06 %	3	4	3	4
P15 c	Tragfähigkeit	1,64 %	4	2,5	5	2,5
S = \sum Parameter * Wichtung =			0,74	0,80	0,79	0,87
Kompensationsindex = (5 * 21,51 %) – S =			0,33	0,28	-	-
Kompensationsindex = (5 * 28,15 %) – S =			-	-	0,62	0,54

NE = Nutzungseinheiten, GK = Gebäudeklasse

Tabelle 67: Kompensationsindex für Vorschlag 5 b

Parameter		Wichtung	GK 4		GK 5	
			1 (MBO)	5 b	1 (MBO)	5 b
P1	Oberflächen in NE	5,74 %	5	3	5	3
P4	Größe der NE	6,64 %	-	-	0	1
P5b	Trennwände	2,77 %	4	2	5	2
P12	Branderkennung	6,30 %	2	5	2	5
P13	Brandmeldung	5,06 %	3	4	3	4
P14	Rettungswege	6,06 %	1,42	2,1	1,15	1,83
P15 c	Tragfähigkeit	1,64 %	4	2	5	2
S = \sum Parameter * Wichtung =			0,83	0,91	0,85	0,96
Kompensationsindex = (5 * 27,57 %) – S =			0,55	0,47	-	-
Kompensationsindex = (5 * 34,21 %) – S =			-	-	0,86	0,76

NE = Nutzungseinheiten, GK = Gebäudeklasse

Tabelle 68: Kompensationsindex für Vorschlag 6

Parameter		Wichtung	GK 4		GK 5	
			1 (MBO)	6	1 (MBO)	6
P1	Oberflächen in NE	5,74 %	5	1	5	1
P2	Brandbekämpfungseinrichtung	6,75 %	0	4	0	4
P5b	Trennwände	2,77 %	4	1	5	1
P12	Branderkennung	6,30 %	2	4	2	4
P13	Brandmeldung	5,06 %	3	4	3	4
P15 c	Tragfähigkeit	1,64 %	4	1	5	1
S = \sum Parameter * Wichtung =			0,74	0,83	0,79	0,83
Kompensationsindex = $(5 * 28,26 \%) - S$ =			0,67	0,59	0,63	0,59

NE = Nutzungseinheiten, GK = Gebäudeklasse

Der Nachweis der Kompensationsgruppen wurde für alle Vorschläge erfüllt.

3.1.6.8 Erweiterung Naturbrandmodell nach EC1-1-2/NA Anhang AA

Aus den Erkenntnissen der Room-Corner Versuchsreihe und unter Miteinbeziehung von recherchierten Ergebnissen von Brandversuchen in Holzräumen mit ungeschützten Holzoberflächen (siehe Abbildung 5 oder Abbildung 8) wurden Ansätze für eine Erweiterung des vereinfachten Naturbrandmodells nach DIN EN 1991-1-2/NA [21] mit Berücksichtigung des Einflusses von ungeschützten Holzoberflächen erarbeitet. Die zusätzliche Wärmefreisetzung aus den ungeschützten Holzoberflächen (strukturelle Brandlasten) müssen im entsprechenden Modell in den Gleichungen für die Brandlastdichte und der maximalen Wärmefreisetzungsrates für den brandlastgesteuerten Brandfall berücksichtigt werden. Die erforderliche Erweiterung dieser Gleichungen, zur Berücksichtigung der strukturellen Brandlast, erfolgt jeweils über den zweiten Term der Gleichung (1) bzw. (2).

Die Brandlastdichte ergibt sich aus der Summe der mobilen und strukturellen Brandlasten entsprechend Gleichung (2) zu:

$$q_{f,tot} = q_{f,k} \cdot \chi + A_{tim} \cdot d_{char,t} \cdot \Delta H_{c,tim} \cdot \rho_{tim} / A_f \quad (1)$$

Die maximale Wärmefreisetzungsrates des brandlastgesteuerten Brandes wird mittels Gleichung (2) berechnet.

$$Q_{max,f,k} = RHR_f \cdot A_f + RHR_{tim} \cdot A_{tim} \quad \text{mit} \quad RHR_{tim} = \dot{r}_{tim}'' \cdot \Delta H_{c,tim} \quad (2)$$

Die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrates der ungeschützten Holzflächen RHR_{bb} wurde als erste Näherung mit einer mittleren flächenbezogenen Abbrandrate von $\dot{r}_{tim}'' = 0,014 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ nach [44] bestimmt.

Der in Gleichung (1) und Gleichung (2) angegebene effektive Heizwert von Holz ($\Delta H_{c,tim}$) berücksichtigt bereits die Verbrennungseffektivität. Der Heizwert für Holz wurde mit $17,28 \text{ MJ}/\text{kg}$ und die Verbrennungseffektivität mit $0,8$ angesetzt. Im Zuge einer Parameterstudie und einer Kalibrierung anhand experimenteller und numerischer Ergebnisse ist die angesetzte flächenbezogene Wärmefreisetzungsrates der ungeschützten Holzflächen noch zu bestätigen.

Die in Gleichung (1) enthaltene Größe $d_{char,t}$ beschreibt die Abbrandtiefe der ungeschützten Holzflächen, wodurch eine zusätzliche Wärmefreisetzung entsteht und länger anhaltende und ggf. höhere Brandraumtemperaturen resultieren. Zur Ermittlung der Abbrandtiefe unter Naturbrandbeanspruchung wurden zwei Ansätze untersucht. Ein vereinfachter Ansatz (Gleichung (3)) berechnet die Abbrandtiefe über das Zeitintervall bei dem die Raumtemperatur oberhalb 300 °C liegt unter Verwendung der in DIN EN 1995-1-2 [42] gegebenen eindimensionalen Abbrandrate.

$$d_{char,t} = \beta_0 \cdot t_{>300} \quad \text{mit} \quad t_{>300} = \sum_{T \geq 300} t_T \quad (3)$$

Der zweite empirisch erarbeitete Äquivalenzansatz nach Werther [43] in der Formulierung aus Draft EN 1995-1-2 [133] (siehe Gleichung (4)) ermittelt die Abbrandtiefe unter Berücksichtigung einer Regressionsgleichung, die die kumulierte thermische Einwirkung beinhaltet. Aus experimentellen Untersuchungen [43] und [44] ist abzuleiten, dass sich Brandraumtemperatur und Abbrandrate stetig gegenseitig beeinflussen können und als gekoppeltes System anzusehen sind.

$$d_{char,t} = \left(\frac{kT}{2,5 \cdot 10^5} \right)^{1/1,47} \quad \text{mit} \quad kT = \int_0^t (T + 273,15)^2 dt \quad (4)$$

Die Beeinflussung der Wärmefreisetzung durch den Abbrand der ungeschützten Holzflächen hat zur Folge, dass das erweiterte Naturbrandmodell in einen iterativen Prozess zur Ermittlung der Naturbrandkurve übergeht.

Eine vergleichende Betrachtung der mit dem erweiterten Naturbrandmodell berechneten Naturbrandkurve, wobei die Abbrandtiefe über den vereinfachten Ansatz nach Gleichung (3) ermittelt wird, mit experimentellen Ergebnissen von Realbrandversuchen zeigt Abbildung 303. Die dem Vergleich zugrundeliegenden Versuchsergebnisse der „Epernon Fire Tests“ wurden in Raumbrandversuchen mit einer Grundfläche von 24 m^2 , bei denen nur die Decke in ungeschützter Brettsperrholzbauweise ausgeführt wurde, gewonnen. Als mobile Brandlasten wurden in beiden Raumbrandversuchen Holzkippen mit ei-

ner Brandlastdichte von 891 MJ/m^2 verwendet. Der Öffnungsfaktor der dargestellten Versuchsergebnisse beträgt $0,144 \text{ m}^{0,5}$ (Abbildung 303; links) bzw. $0,050 \text{ m}^{0,5}$ (Abbildung 303; rechts). Aus den Versuchsberichten [40] sowie [41] lassen sich die weiteren Randbedingungen der dargestellten Ergebnisse entnehmen.

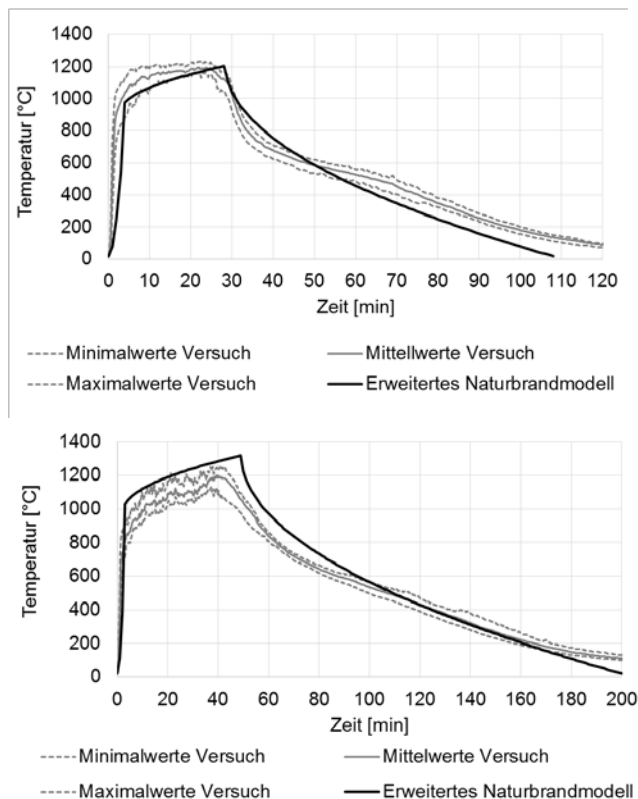


Abbildung 303: Vergleich des berechneten Temperaturzeitverlaufs des erweiterten Naturbrandmodells zu gemessenen Temperaturzeitkurven der „Epernon Fire Tests“ nach [40] (links) sowie [41] (rechts)

Die berechneten Naturbrandkurven weisen eine hinreichende Übereinstimmung zu den experimentellen Ergebnissen bezüglich der Temperaturen und des Zeitverlaufs auf. Aus dem Blickwinkel einer ingenurmäßigen Bauteilbemessung liegt der mit dem erweiterten Naturbrandmodell berechnete Temperaturzeitverlauf weitgehend auf der sicheren Seite.

Ein quantitativer Vergleich der Abbrandtiefen aus experimentellen Untersuchungen innerhalb des TIMpuls (Kapitel III 3.1.2.2, III 3.1.2.8 und III 3.1.2.12) und Angaben aus veröffentlichten Versuchen (u. a. [40], [41], [73], [123], [124], [127], [201] und [262]) mit den Ansätzen zur Prognose der Abbrandtiefen ist in Abbildung 304 ersichtlich. Es zeigt den 300°C -Ansatz (Gleichung (3)) und den Äquivalenzansatz nach Werther [43] in der Formulierung aus Draft EN 1995-1-2 [133] (Gleichung (4)). Für den in [133] enthaltenen Ansatz liegen die prognostizierten Abbrandtiefen überwiegend auf der sicheren Seite. Der 300°C -Ansatz dagegen weist mehrheitlich Abbrandtiefen auf der unsicheren Seite auf. Entsprechend der Güte der Abbrandmodelle folgt in der weiteren Betrachtung die Verwendung des in [133] enthaltenen Ansatzes im erweiterten Naturbrandmodell.

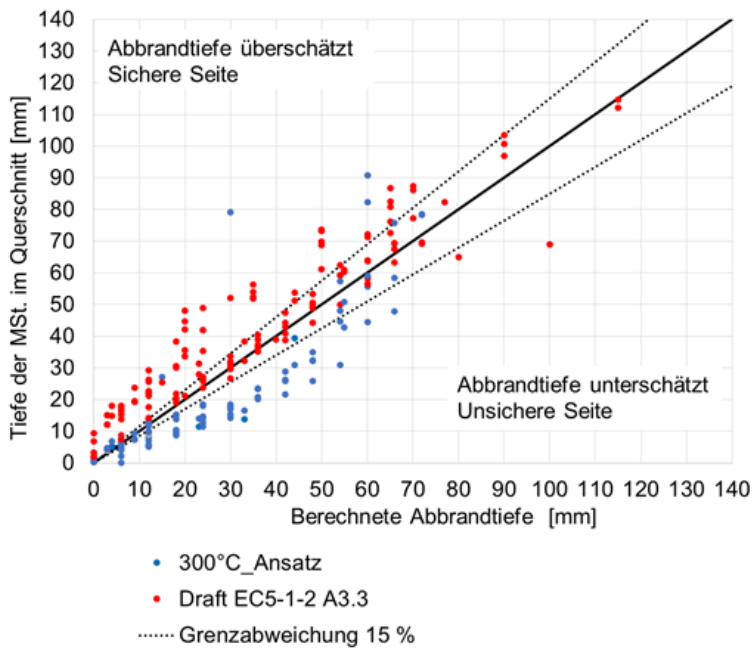


Abbildung 304: Vergleich der Abbrandtiefen aus Versuchen bei unterschiedlichen Naturbrandbeanspruchungen mit den Ansätzen zur Abbildung der Abbrandtiefe im Naturbrandmodell

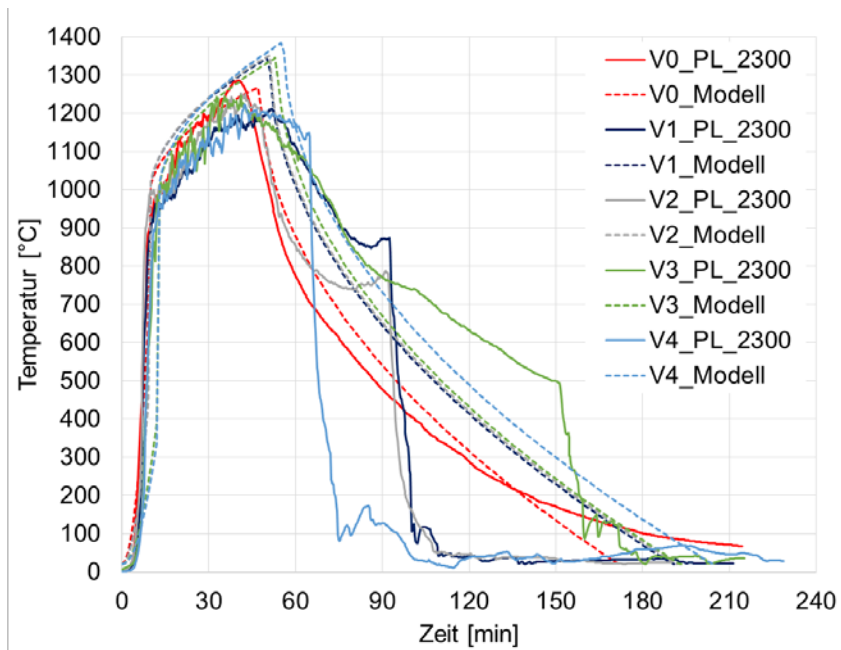


Abbildung 305: Vergleich zwischen dem erweiterten Naturbrandmodell und den Brandraumtemperaturen der Belegversuche

Eine bereichsweise gute Übereinstimmung ist in Abbildung 305 zwischen den Berechnungsergebnissen des erweiterten Naturbrandmodells mit dem Abbrandmodell nach [133] und den aufgezeichneten Brandraumtemperaturen der Belegversuche erkennbar. Zur Abbildung von V0 ist das Ausgangsmodell gemäß [21] herangezogen, welches eine sehr gute Übereinstimmung aufweist. Die Abweichungen gegenüber den Versuchsdaten V1 bis V4 lassen sich in den Maximaltemperaturen und in der Abkühlphase feststellen. Diese beruhen zum einen auf der Anwendungsgrenze der Brandlastdichte aus mobilem und strukturellem Anteil von maximal 1.300 MJ/m² [21] und zum anderen auf der fehlenden Berücksichtigung des Beitrages der anfänglich geschützten Holzbauteile. Aktuell besitzt das erweiterte Naturbrandmodell nicht die Eingangsbedingungen zur Berücksichtigung des Versagens einer Brandschutzbekleidung und dem zusätzlichen Beitrag der anfänglich geschützten Holzbauteile am Brandgeschehen. Die in Kapitel III 3.1.2.11 beschriebenen Erkenntnisse stellen erste Auswertungen und Herstellung von

Zusammenhängen für eine mögliche Berücksichtigung von anfänglich geschützten Holzbauteilen im erweiterten Naturbrandmodell dar.

Die aktuelle Fassung des erweiterten Naturbrandmodells weist noch Schwächen bei der Prognose der Raumtemperaturen in der Abkühlphase auf, da das Versagen der Brandschutzbekleidung von anfänglich geschützten Holzbauteilen, wie oben bereits beschrieben, nicht abgebildet werden kann. Zusätzlich bleibt eine abschließende Parameterstudie mit angeknüpfter Sensitivitätsanalyse zur Überprüfung von Anwendungsgrenzen und Sicherheitselementen offen. Bedingt durch die massive Arbeitsauslastung der Aufgaben in Arbeitspaket 2 konnte die abschließenden Punkte nicht erbracht werden.

Ergänzend und verifizierend zum vereinfachten Verfahren für die Ermittlung der Brandraumtemperatur über das erweiterte Naturbrandmodell erfolgt die Erarbeitung von Ansätzen zur Berücksichtigung von ungeschützten Holzbauteilen für allgemeine Verfahren. Für diese numerische Betrachtung wird das Computational Fluid Dynamics (CFD) Programm Fire Dynamics Simulator (FDS) in der Version 6.7.1 [46] verwendet.

Zur Berücksichtigung des Beitrages von ungeschützten Holzbauteilen am Brand sind zwei Ansätze untersucht worden a) die Verwendung einer vordefinierten zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit und b) die Verwendung eines Pyrolysemodells zur Abbildung der thermischen Zersetzung. Für den Ansatz a) ist aus den Room Corner Versuch RC_V1 (Kapitel III 3.1.2.1) eine flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate von 54 kW/m^2 abgeleitet worden. Über die Zuordnung einer angenommenen Zündtemperatur von $300 \text{ }^\circ\text{C}$ erfolgt der Beitrag der ungeschützten Holzflächen am Brandverlauf erst wenn diese Oberflächentemperatur erreicht ist. Bei dem Ansatz eines Pyrolysemodells findet die Abbildung der thermischen Zersetzung und der gekoppelten Wärmefreisetzung von Holz vereinfacht in einer dreistufigen Zersetzungsreaktion ab.

- Dehydratation – endothermer Vorgang (Wet wood → Dry wood)
- Pyrolyse – exothermer Vorgang (Dry wood → Char)
- Oxidation – exothermer Vorgang (Char → Ash)

Das Kalibrieren und Validieren der Zersetzung fand anhand recherchierter Ergebnisse thermogravimetrischer Analysen (TGA) von Holz statt. Der Zersetzungsprozess wird mittels Arrhenius-Gleichung dargestellt. Die notwendigen Eingangsparameter der Arrhenius-Gleichung präexponentieller Faktor und Aktivierungsenergie wurden über die recherchierten Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse iterativ angenähert. Abbildung 306 stellt die recherchierten TGA Ergebnisse für Nadelholz bei unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeiten gegenüber dem FDS Pyrolysemodell (TIMpuls – rote Linie) dar, welches eine gute Abbildung erkennen lässt. Jede der angesetzten Zersetzungsreaktionen (Dehydratation, Pyrolyse, Oxidation) führt in dem Pyrolyse-modell zu einer Massenreduktion.

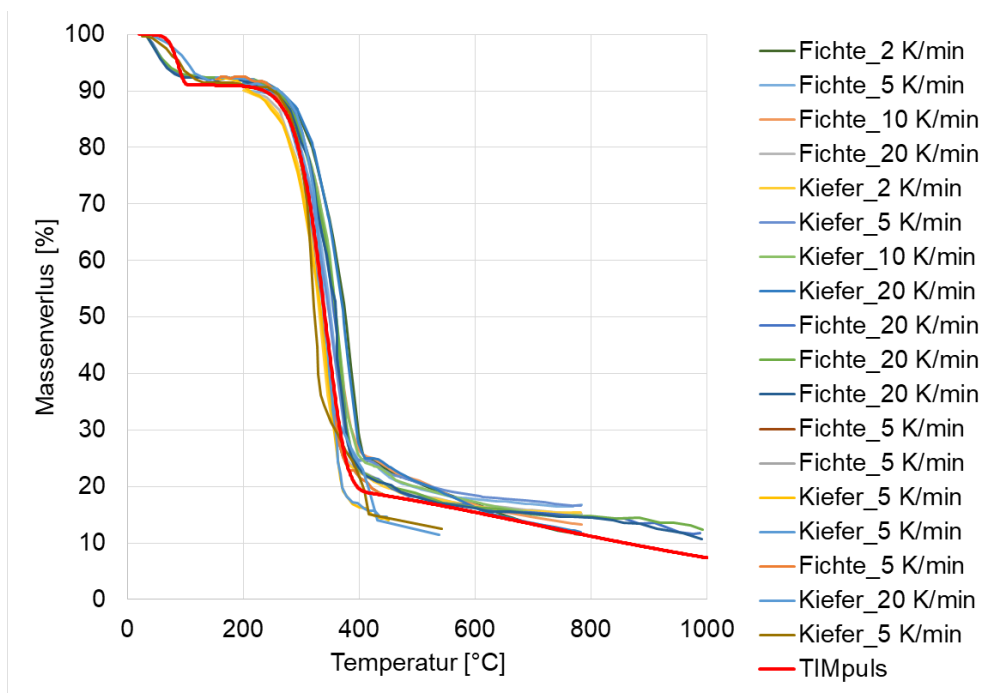


Abbildung 306: Vergleich der Zersetzung im Pyrolysemodell mit Daten von thermogravimetrischen Analysen

Die freigesetzte Wärme infolge der Verbrennung wird mittels einer verallgemeinerten Verbrennungsreaktion von Holz ($\text{CH}_{1,7}\text{O}_{0,2}\text{N}_{0,02}$) beschrieben. Als Verbrennungswärme wird 17,28 MJ/kg angesetzt über die im Pyrolysemodell enthaltenen Werte für Soot-, CO-Yield und Materialfeuchte wird die Verbrennungseffektivität abgebildet. In Abbildung 307 ist das numerische Simulationsmodell in FDS des Room Corner Versuches RC_V1 zur 15. Versuchsminute dargestellt. Aus visuellen Gründen sind einzelne Bauteile nur mit den Außenlinien dargestellt. Abbildung 308 zeigt den Vergleich zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen für die Wärmefreisetzungsrate und Brandraumtemperatur bei Verwendung des Pyrolysemodells. Die Simulationsergebnisse weisen sowohl für die Wärmefreisetzungsrate als auch für die Brandraumtemperatur eine sehr gute Übereinstimmung auf.

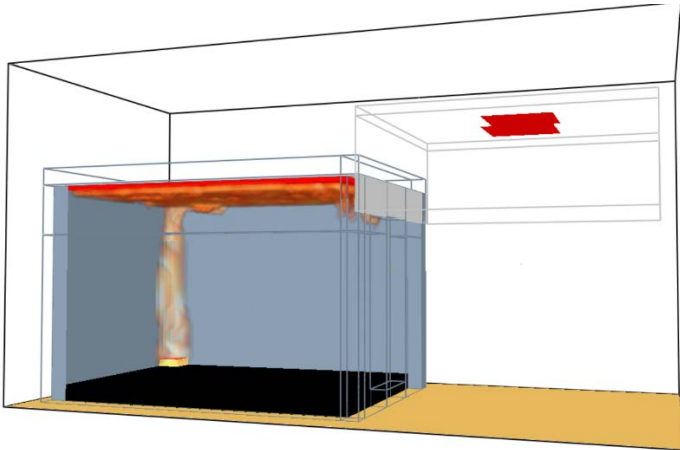


Abbildung 307: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate ($\text{HRR} < 200 \text{ kW}$) des Simulationsmodells zur 15. Minute

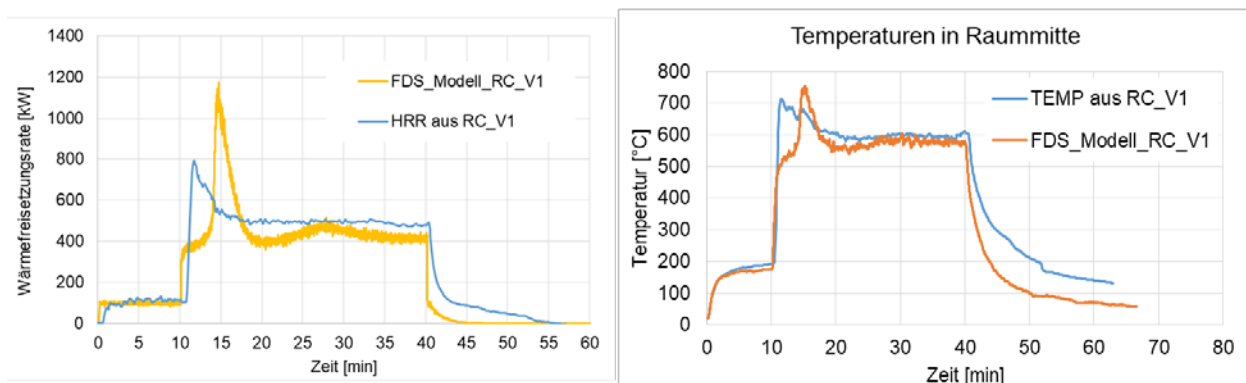


Abbildung 308: Vergleich der Wärmefreisetzungsrate (links) und Brandraumtemperatur (rechts) zwischen RC_V1 und dem Simulationsmodell mit Ansatz b)

Die numerische Untersuchung der erarbeiteten Ansätze a) und b) im Realmaßstab erfolgt unter Verwendung der Versuchsergebnisse aus [40]. Das zugrundeliegende Simulationsmodell ist in Abbildung 309 zur 14. Versuchsminute dargestellt. Zur verbesserten Visualisierung sind die Umfassungsbauteile mit einer Transparenz dargestellt. Aus Abbildung 310 lässt sich die Abbildung der Versuchsergebnisse mittels der FDS Simulationen für die beiden erarbeiteten Ansätze erkennen, welche eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen.

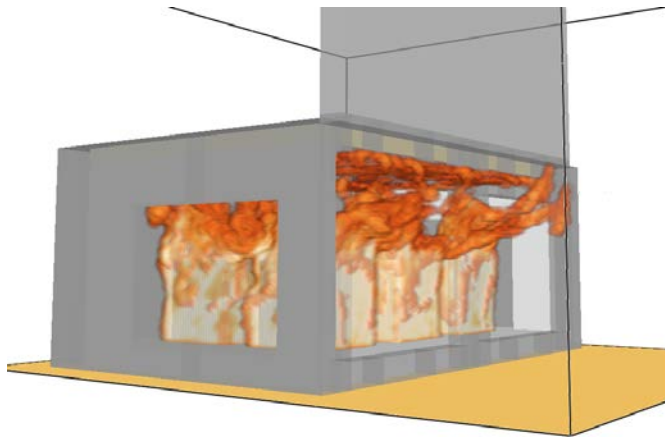


Abbildung 309: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate ($HRR < 200 \text{ kW}$) des Simulationsmodells zur 14. Minute

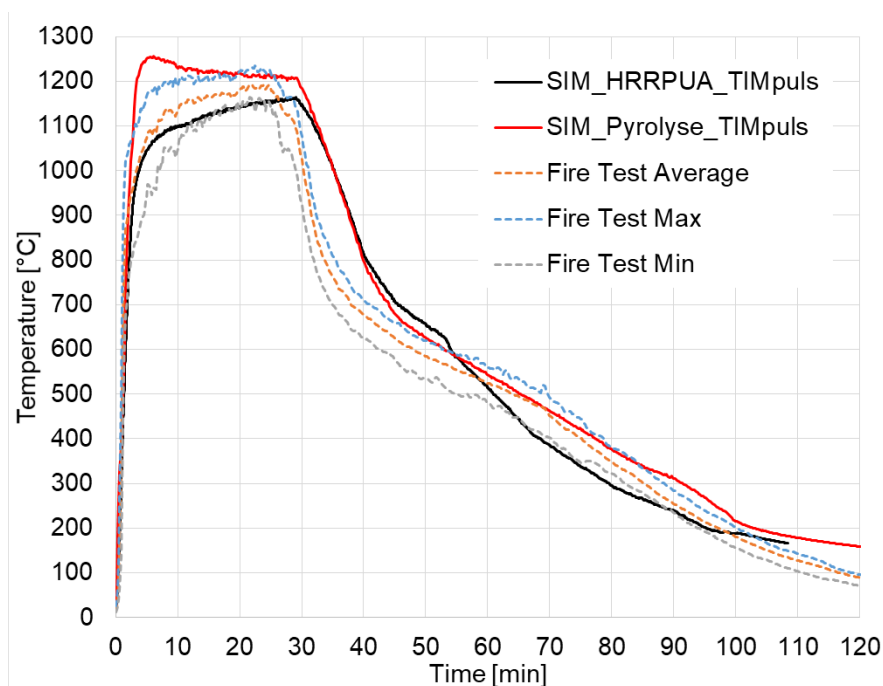


Abbildung 310: Vergleich Brandraumtemperatur zwischen einem Brandversuch [40] und dem Simulationsmodell unter Verwendung von Ansatz a) und Ansatz b)

Es ist jedoch anzumerken, dass mit dem Ansatz a) der vordefinierten zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit (HRRPUA) der Zeitpunkt des Beginns der Abklingphase für die strukturelle Brandlast vor dem Simulationsdurchlauf zu definieren ist. Entsprechend eignet sich dieser Ansatz nur zur Nachrechnung von Versuchsergebnissen und weniger der Prognosen von Brandverläufen.

Aus der am iBMB gesammelten Erfahrung bei Raumbrandsimulationen mit FDS lassen sich brandlastgesteuerte Brände numerisch deutlich besser abbilden als ventilationsgesteuerte Brände. Die hier simulierten Brände als auch die in Kapitel III 3.1.2.12 beschriebenen Versuche wird ein brandlastgesteuertes Brandregime unterstellt entsprechend stellt sich die Abbildung der Versuchsdaten besser dar.

Die Simulation der Belegversuche aus Kapitel III 3.1.2.12 kann aufgrund der Umsetzung der Belegversuche Anfang 2021 und der zugrundeliegenden Rechendauern der Simulationen von ca. 4 – 6 Wochen nicht abschließend bearbeitet werden. Beginnen erfolgt eine Kalibrierung des Simulationsmodells (siehe Abbildung 311) mittels der Versuchsdaten aus V0 hinsichtlich der mobilen Brandlast. Sofern die Kalibrierung abgeschlossen ist, folgt die Ergänzung des Pyrolysemodells für die ungeschützten Bauteile (strukturelle Brandlast) für die Simulation von V1 und V2. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes ist die Kalibrierung noch nicht abgeschlossen.

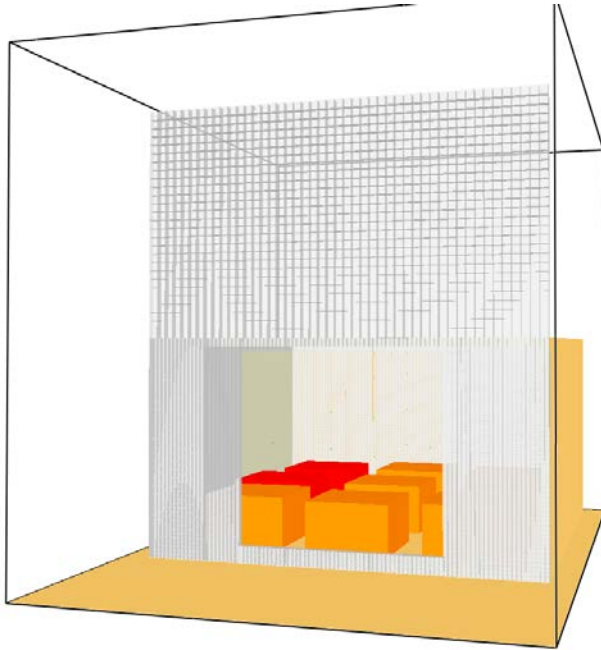


Abbildung 311: Simulationsmodell in FDS von Belegversuch V0

3.1.6.9 Durchführung von vollprobabilistischen Analysen

Zur Ermittlung von anzusetzenden Versagenswahrscheinlichkeiten der Brandschutzbekleidung sowie der Bewertung des Raumabschlusses von Holzbauteilen sind vollprobabilistische Analysen vorgesehen. Das schematische Vorgehen dieser Analysen ist in Abbildung 312 dargestellt. Im Ablaufschema erfolgt erst im 7. Schritt die Durchführung der Zuverlässigkeitsanalyse. Hierbei folgt eine automatisierte Zusammenstellung der Eingangsgrößen aus streuenden und parametrisierten Größen. Anschließend findet im selben Schritt die thermische Analyse, zur Ermittlung der Bauteiltemperaturen, und der Zuverlässigkeitsanalyse, zur Überprüfung ab welchem Zeitpunkt die Grenzzustandsgleichung nicht mehr erfüllt wird, statt. Damit die aus der Zuverlässigkeitsanalyse bestimmte Versagenswahrscheinlichkeit allgemeingültig ist, sind im 7. Schritt mehrere tausend Rechendurchläufe notwendig, wobei für jeden Durchlauf die Eingangsgrößen neu zusammengestellt werden. Im 8. Schritt lässt sich auf Basis der Ergebnissumme des vorangegangenen Schrittes eine Sensitivitätsanalyse durchführen, die die Eingangsgrößen entsprechend dem Einfluss am Gesamtergebnis ausgibt.

Aus [29] ist für mechanisch belastete, ungeschützte Holzbauteile unter ETK bzw. einer Naturbrandkurve bereits bekannt, dass die Wärmefreisetzungsrate, die Brandlastdichte und die Abbrandtiefe einen maßgebenden Einfluss am Gesamtergebnis besitzen. Für die Erarbeitung des vollprobabilistischen Analysemodells können aus [29] die Ansätze für die Festlegung der streuenden oder parametrisierten Eingangsgrößen aufgegriffen werden. Weitere Elemente lassen sich aus [29] leider nicht übernehmen, da bei diesen Analysen neben einer abweichenden Fragestellung die verwendeten Softwarelösungen nicht mehr den Stand der Wissenschaft darstellen.

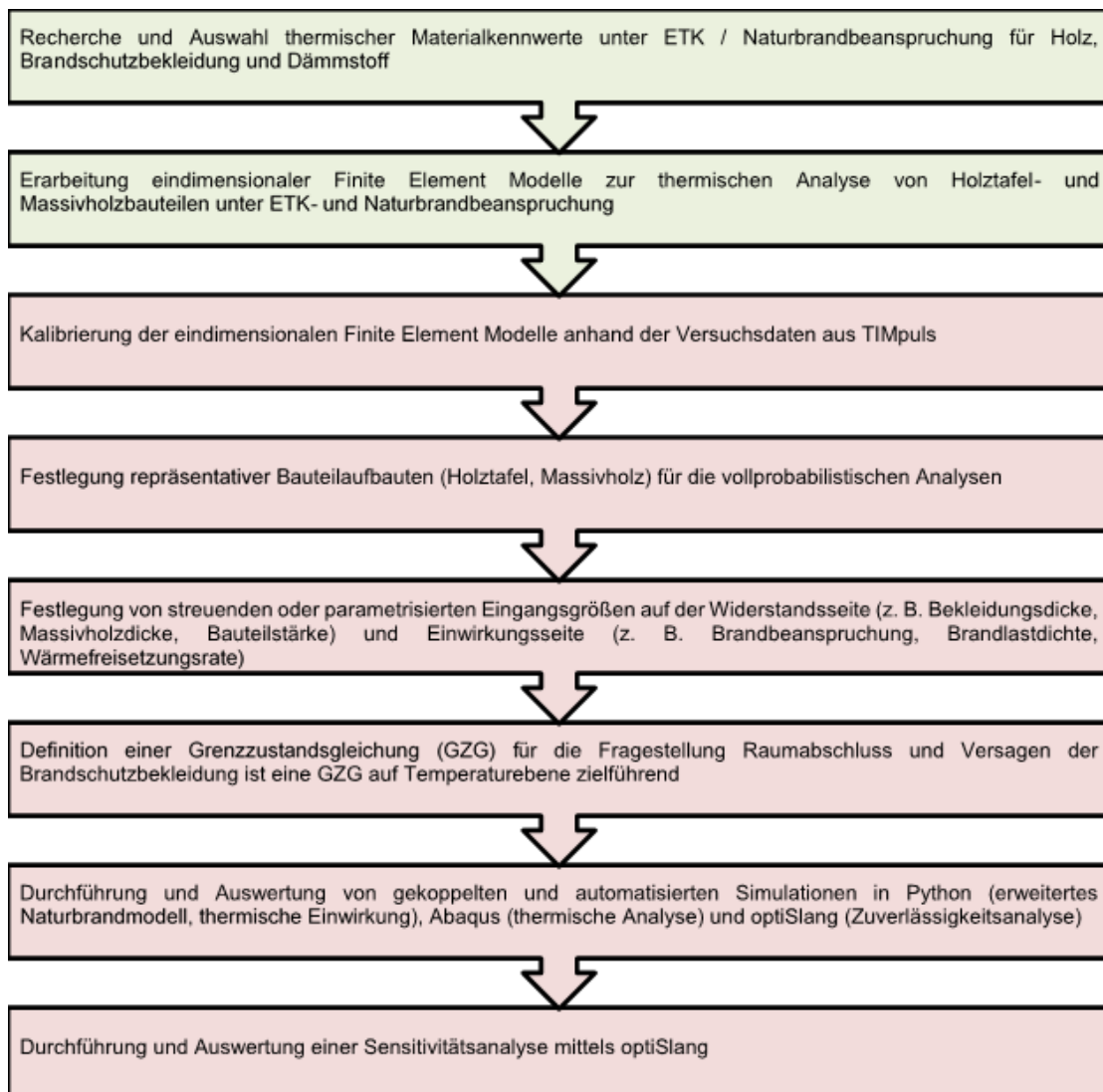
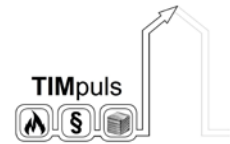


Abbildung 312: Schematisches vorgehen zur Durchführung der vollprobabilistischen Analysen



Um belastbare Ergebnisse zu erzielen sind thermische Analysen erforderlich, welches unter Naturbrandbeanspruchung eine angemessene Übereinstimmung zwischen Simulations- und Versuchsergebnissen aufweisen. In Kapitel III 3.1.2.10 wird bereits die unzureichende Abbildung der Versuchsergebnisse unter Naturbrandbeanspruchung durch die thermischen Analysen (unzureichendes Materialmodell) aufgezeigt.

Die erarbeitete Erweiterung des Naturbrandmodells in Kapitel III 3.1.6.8 lässt bereits erste Schlüsse zu. Für die Verwendung im 7. Schritt fehlt jedoch eine umfängliche Parameterstudie inkl. möglicher Kalibrierung, damit die berechneten Naturbrandkurven als Fehlerpotenzial minimiert werden.

Infolge der noch offenen Fragen bzgl. der Arbeiten in Kapitel III 3.1.2.10 und Kapitel III 3.1.6.8 ist die Umsetzung der vollprobabilistischen Analysen zwar möglich jedoch nicht zielführend. Bei der Anwendung von Submodellen (thermische Analyse, erweitertes Naturbrandmodell) sollten die Unsicherheiten und der Fehler dieser weitestgehend reduziert werden, da sonst die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse durch die Fehlerfortpflanzung schwerer zu deuten sind sowie keine belastbare Aussage mehr ermöglichen. Dementsprechend erfolgen hier keine vollprobabilistischen Analysen. Die in Abbildung 312 grün hinterlegten Schritte sind abgeschlossen und die rot hinterlegten Schritte sind nicht abschließend bearbeitet.

3.1.7 Arbeitspaket 7 Lösungsansätze hinsichtlich Nachhaltigkeit, Sanierungsmöglichkeit, Wirtschaftlichkeit

3.1.7.1 Grundlagen der ökologischen Bewertung

Aufgrund der Notwendigkeit, die Verwendung regenerativer Ressourcen zu fördern und die Emissionen des klimaschädlichen Treibhausgases Kohlendioxid sowie anderer Schadstoffe zu reduzieren, wurden in den letzten Jahrzehnten Systeme entwickelt, welche die Nachhaltigkeit eines Bauwerkes in allen Lebenszyklen bewerten und somit fördern können (BNB, DGNB, BNK, NaWoh). Diese Bewertungssysteme sind entsprechend der Nutzung und des Bauumfanges des geplanten Gebäudes unterschiedlich komplex ausgeführt. Alle Bewertungssysteme des nachhaltigen Bauens gliedern sich in ökologische (Ressourcen und Umwelt), ökonomische (Kosten), soziokulturelle (Wertempfinden), technische und Prozess-Qualitäten (Planungs- und Ausführungseinflüsse). Innerhalb dieser Qualitäten sind jeweils Kriterien mit entsprechenden Mindestanforderungen definiert, welche argumentativ oder rechnerisch nachgewiesen werden müssen. Eine Übererfüllung dieser Mindestanforderungen kann durch das Bewertungssystem belohnt werden, beispielsweise mit einem besseren Gütesiegel.

Für die Nachhaltigkeitsbewertung der hier präsentierten Forschungsarbeit wird nicht ausschließlich eines der genannten Bewertungssysteme genutzt. Zur Ökobilanzierung (Ressourcen und Umwelt) werden die, den Systemen zugrundeliegenden, Berechnungsmethoden auf Bauproduktebene (DIN EN ISO 14040 [250], DIN EN 15978 [251], DIN EN 15804 [92], DIN EN 16485 [252]) in Verbindung mit den Datensätzen (Umweltproduktdeklarationen) der „ÖKOBAUDAT“ [93] verwendet. Zur einheitlichen und unabhängigen Beurteilung der Umwelteinwirkungen von Beton, Holz und weiteren Bauprodukten wird vom Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat die „ÖKOBAUDAT“ [93] bereitgestellt. Diese beinhaltet eine öffentlich zugängliche Datenbank zu Ressourceneinsatz und Umweltwirkung von Baustoffen, konform der Lebenszyklusbetrachtung nach DIN EN 15804 [92]. Generell lassen sich Ökobilanzdaten der ÖKOBAUDAT je nach Herkunft in die Datenkategorien A bis C einteilen, siehe Tabelle 69.

Tabelle 69: Kategorien der Ökobilanzdatensätze [253]

Datenkategorien	Beschreibung
Kategorie A	Verifizierte EPD gemäß DIN EN 15804 und nach den Regeln sowie im Programmbetrieb gemäß DIN EN ISO 14025 erstellt
Kategorie B	Verifizierte EPD (B1) beziehungsweise Ökobilanzdaten mit externer Prüfung (B2), die gemäß DIN EN 15804, aber nicht im Rahmen eines Programmbetriebs gemäß DIN EN ISO 14025 erstellt wurden
Kategorie C	Ökobilanzdaten gemäß DIN EN 15804 ohne externe Verifizierung beziehungsweise kritische Prüfung, zum Beispiel „generische Datensätze“

Bei Daten der Kategorie A handelt es sich um Ökobilanzdaten gemäß DIN EN 15804 [92] aus Umweltproduktdeklarationen (EPDs). Hinter der EPD steht ein Programm nach DIN EN ISO 14025 [254]. Die Programmanleitungen und Produktkategorieregeln (PCR – Product Category Rules) müssen öffentlich einsehbar und nach DIN EN 15804 [92] sowie DIN EN ISO 14025 [254] erstellt sein.

Die Daten der Kategorie B werden nicht im Rahmen eines EPD-Programms gemäß DIN EN ISO 14025 [254] erstellt (Kategorie B1) beziehungsweise nicht im Rahmen einer EPD veröffentlicht (Kategorie B2). Sie wurden jedoch, wie die Daten der Kategorie A extern verifiziert, beziehungsweise einer kritischen Prüfung unterzogen. Die Aufnahme von Daten der Kategorie B bedarf einer Abstimmung mit dem Anwenderkreis ÖKOBAUDAT. Hier werden je nach Bedarfsfall, unter anderem in Abhängigkeit von der Herkunft der Daten, die jeweiligen Anforderungen zur Aufnahme der Daten in die ÖKOBAUDAT festgelegt. Prinzipiell ist der Nachweis über die Konformität zur DIN EN 15804 [92] für die jeweiligen Datensätze über eine externe Verifizierung (Kategorie B1) beziehungsweise kritische Prüfung (Kategorie B2) seitens des Antragstellers beziehungsweise Lieferanten von Ökobilanzdaten gesondert zu führen. Als kritische Prüfung wird eine „externe Prüfung“ gefordert, die analog zu einer Verifizierung gemäß DIN EN ISO 14025 [254] durchzuführen ist. Die Anforderungen für Daten der Kategorie A gelten analog für die Datensätze der Kategorie B.

Daten der Kategorie C werden in Anlehnung an DIN EN 15804 [92] erstellt, aber keiner externen Prüfung durch eine unabhängige dritte Stelle unterzogen. Zu den Daten der Kategorie C zählen Ersatzdaten, die ÖKOBAUDAT für Produktkategorien zur Verfügung stellt, für die keine Daten der Kategorie A oder Ka-

tegorie B zur Verfügung stehen („generische Daten“). Diese Ökobilanzdaten werden im Zuge der Datenerstellung mit Sicherheitszuschlägen von 10 % bis 30 % versehen. Generische Datensätze werden vom BBSR bei Bedarf in Auftrag gegeben. Andere Datensätze der Kategorie C werden nicht in die ÖKOBAUDAT aufgenommen. Die generischen Datensätze in der ÖKOBAUDAT werden vom Datenlieferanten intern verifiziert und der Datenerstellungsprozess an sich wird einem „critical review“ durch einen externen Dritten unterzogen.

Entsprechend den Festlegungen in DIN EN 15804 [92] wird der Lebenszyklus eines Gebäudes in die Phasen Herstellung und Errichtung (Modul A), Nutzung (B), Entsorgung (C) und Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze (D) gegliedert. Entsprechend dem modularen Lebenswegmodell der EN 15804 [92] lassen sich drei mögliche Typen von Umweltproduktdeklarationen unterscheiden:

- von der Wiege bis zum Werktor „cradle to gate“ (A1–A3),
- von der Wiege bis zum Werktor mit Optionen „cradle to gate with options“ (A1–A3 + bspw. C1–C4)
- von der Wiege bis zur Bahre „gradle to grave“ (A1–C4).

Die Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze (D), beispielsweise durch Recycling oder Wiederverwendung, werden nur informativ berücksichtigt, da die Substitution der eigentlich erforderlichen Ressourcen außerhalb des betrachteten Gebäudes wirkt.

In Tabelle 70 sind die für die ökologischen Bewertungen der Bauteile in Holzbauweisen und HBV-Decken in Abschnitt 3.1.7.2 und Abschnitt 3.1.7.3 zugrundeliegenden Datensätze dargestellt. Für die Bewertung werden die Module A1, A2, A3, C3, C4 und D berücksichtigt. Es werden die Datensätze der ÖKOBAUDAT Version 2021-I vom 04.01.2021 verwendet.

Die folgenden Betrachtungen reduzieren sich auf die Umweltbelastung durch Treibhausgase. Als Einheit wird das „kg CO₂-Äquivalent“ verwendet. Neben CO₂ gibt es weitere Treibhausgase, beispielsweise Methan und Lachgas, die zum Treibhauseffekt beitragen. Die unterschiedlichen Wirkungen dieser Treibhausgase wird hierbei in Relation zu CO₂ berücksichtigt.

Tabelle 70: verwendet Datensätze für die ökologische Bewertung

	Einheit	kg CO ₂ -Äquivalent je Einheit			Datensatz der ÖKO-BAUDAT
		A1 - A3	C3 + C4	D	UUID und Version
Gipskartonfeuerschutzplatte	m ²	123,28	12,008	-	da72684f-471c-425b-817d-69f262323f04 20.20.010
Oriented Strand Board	m ³	-619,4	976,8	-250,1	e82d39f1-fe17-44f6-b531-e1b638281f6d 01.00.019
Konstruktionsvollholz	m ³	-721,774	809,7	-351,4	1a70d292-a82c-42a6-a378-d3cbd9a9af4e 00.00.026
Mineralwolle-Dämmstoffe	m ³	33,58	1,508	-1,457	bd7319aa-d609-4f27-9460-d11bc966bb2b 00.01.000
Brettsperrholz	m ³	-658	792,5	-306	7f12b868-0c13-4a5d-bfe7-0f05734cca89 00.00.020
Putzmörtel: Normalputz	kg	0,208	0,0166	-0,0175	02428321-77d1-426f-a1d1-48a83de490c0 00.02.000
Kalksandstein Mix	m ³	306,1	13,45	-4,108	29e6c6cf-0552-4e4b-85c7-26a68a625252 20.19.120

	Einheit	kg CO ₂ -Äquivalent je Einheit			Datensatz der ÖKO-BAUDAT
		A1 - A3	C3 + C4	D	UUID und Version
Betonmauerstein	m ³	242,4	13,45	-4,108	bdda4364-451f-4df2-a68b-5912469ee4c9 20.19.120
Brettschichtholz	kg	-666,2	819,3	153,1	a432f3fd-de60-4a11-9acb-b9a21731bacf 00.00.021
Beton C25/30	kg	197	6,01	-21,4	71667cf3-ede8-42d2-b0ff-6f1071ad3b86 00.04.000
Bewehrungsstahl	m ³	0,6834	-	-	e9ae96ee-ba8d-420d-9725-7c8abd06e082 20.19.120

3.1.7.2 Ökologische Bewertung von Wänden in Holzbauweisen

Es wird die Umwelteinwirkung (CO₂) für jeweils 1 m² Holztafel- und Holzmassivbauteile mit unterschiedlichen Brandschutzbekleidungen ermittelt. Die Tragschichten (Ebene 2) werden gleichbleibend mit einer Dicke von 120 mm berücksichtigt. Tabelle 71 bis Tabelle 73 beschreiben Holztafelbauteile mit Mineralwolle-Gefachdämmstoffen, Tabelle 74 bis Tabelle 76 beschreiben Holzmassivbauteile aus Brettspertholz.

Tabelle 77 und Tabelle 78 beschreiben Massivbauweisen, bzw. Mauerwerke aus Kalksandstein und Betonstein. Entsprechend 4102-4 [182] ist die Mindestdicke nichttragender, raumabschließender Wände aus Mauerwerk, mit beidseitigem Putz und einseitiger Brandbeanspruchung, für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten mit 95 bis 100 mm auszuführen. Infolge weiterer Bauteilanforderungen, bspw. zur Gewährleistung des Schallschutzes oder der Tragfähigkeit, können sich höhere Anforderungen an die Bauteildicken ergeben. Die Massivbauweisen werden vereinfacht mit 100 mm Mauerwerksteinen beschrieben.

In der Nutzung (Modul B) fallen keine Gutschriften oder Belastungen an. Für alle Bauteile und Baustoffe werden entsprechend [94] Nutzungsdauern von 50 Jahren angenommen. Dies entspricht der geplanten Nutzungsdauer der Eurocodes [30]. Eine Erneuerung der Putzmörtel nach 40 a wird berücksichtigt.

Tabelle 71: Bauteilschichten Holztafelbau HT_1

Ebene	Dicke	Baustoff
1.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
2	120 mm	KVH 60mm/120mm, e=625mm
2	120 mm	Mineralwollgedämmstoffe
3.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten

Tabelle 72: Bauteilschichten Holztafelbau HT_2

Ebene	Dicke	Baustoff
1.1	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.2	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
2	120 mm	KVH 60mm/120mm, e=625mm
2	120 mm	Mineralwollgedämmstoffe
3.1	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.2	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten

Tabelle 73: Bauteilschichten Holztafelbau HT_3

Ebene	Dicke	Baustoff
1.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.3	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
2	120 mm	KVH 60mm/120mm, e=625mm
2	120 mm	Mineralwollgedämmstoffe
3.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.3	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten

Tabelle 74: Bauteilschichten Holzmassivbau HM_1

Ebene	Dicke	Baustoff
1.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
2	120 mm	Brettspertholz
3.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten

Tabelle 75: Bauteilschichten Holzmassivbau HM_2

Ebene	Dicke	Baustoff
1.1	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.2	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
2	120 mm	Brettspertholz
3.1	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.2	25 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten

Tabelle 76: Bauteilschichten Holzmassivbau HM_3

Ebene	Dicke	Baustoff
1.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
1.3	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
2	120 mm	Brettsperrholz
3.1	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.2	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten
3.3	18 mm	Gipskartonfeuerschutzplatten

Tabelle 77: Bauteilschichten Mauerwerk Massiv_1

Ebene	Dicke	Baustoff
1	5 mm	Putzmörtel: Normalputz
2	100 mm	Kalksandstein Mix
3	5 mm	Putzmörtel: Normalputz

Tabelle 78: Bauteilschichten Mauerwerk Massiv_2

Ebene	Dicke	Baustoff
1	5 mm	Putzmörtel: Normalputz
2	100 mm	Betonmauerstein
3	5 mm	Putzmörtel: Normalputz

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung sind in Abbildung 313 bis Abbildung 315 dargestellt. In Abbildung 313 sind die Ergebnisse entsprechend der Module A, C und D getrennt dargestellt. In Abbildung 314 sind die Module A und C und in Abbildung 315 sind die Module A, C und D zusammengefasst. Die Belastungen (positive Werte) und Gewinne (negative Werte) wurden miteinander verrechnet.

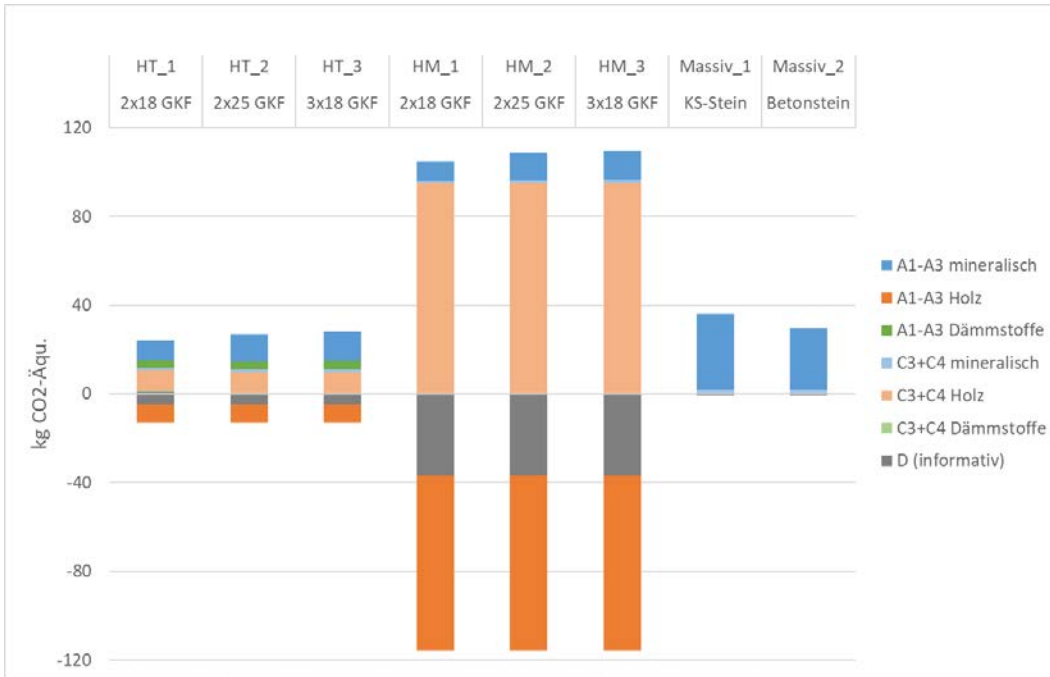


Abbildung 313: Ergebnisse der ökologischen Bewertung je Modul

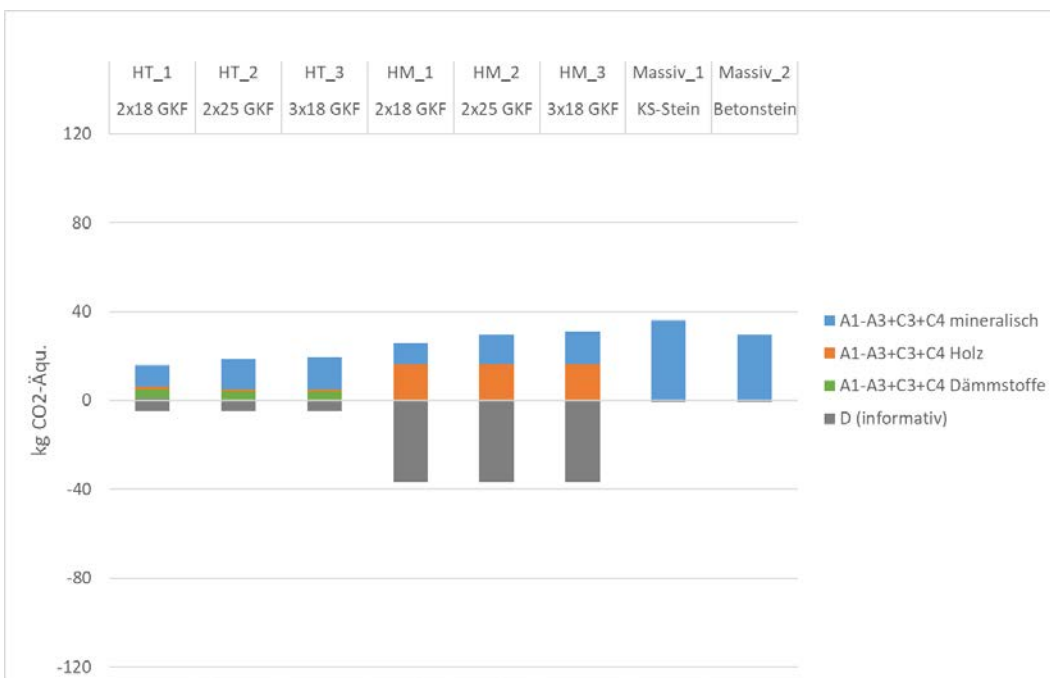


Abbildung 314: Ergebnisse der ökologischen Bewertung, Module A+C zusammengefasst

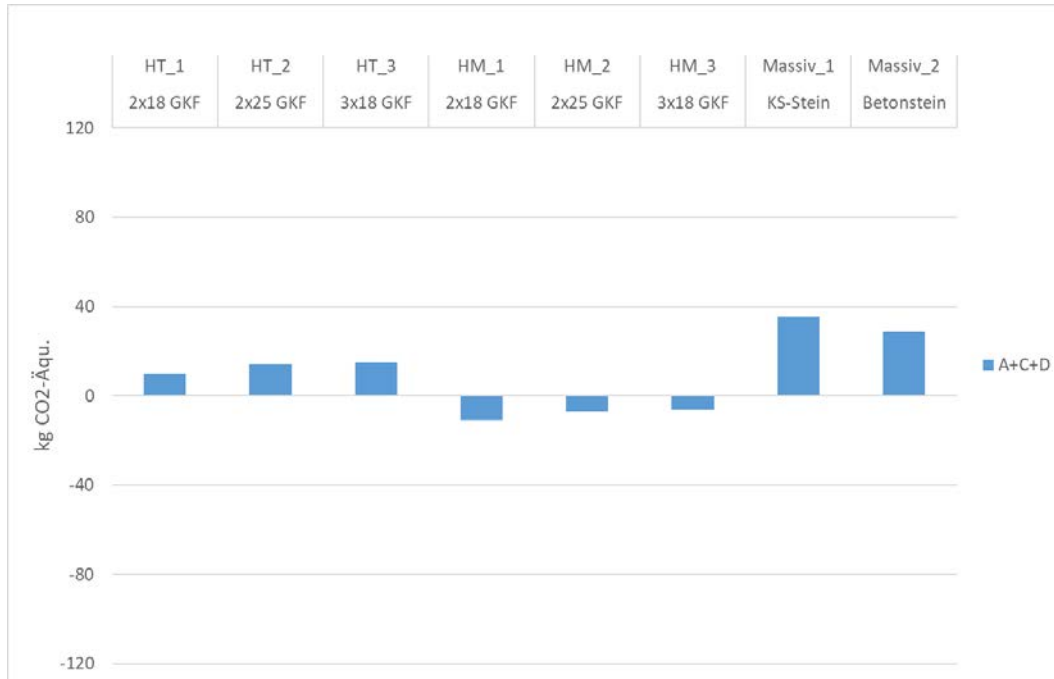


Abbildung 315: Ergebnisse der ökologischen Bewertung, Module A+C+D zusammengefasst

3.1.7.3 Vergleich Holz-Beton-Verbunddecken und Stahlbetondecken

In Abbildung 316 wird die Umweltbelastung durch Treibhausgase, von Stahlbeton- und HBV-Decken aus Tabelle 39 mit 6 m Spannweite, über die verschiedenen Phasen im Lebenszyklus eines Gebäudes dargestellt. In der Herstellungsphase (A) erfolgt eine Gutschrift für die HBV-Decke. Während des Wachstums eines Baumes wird der Atmosphäre CO₂ entzogen, diese Kohlenstoffspeicherung wird als negatives Treibhauspotenzial berücksichtigt. Zwar fällt in der HBV-Decke durch den Betonanteil auch ein belastendes, positives Treibhauspotenzial an, allerdings ergibt sich in Summe eine Gutschrift (negativ) von ca. 30 kg CO₂-Äquivalent je m² Decke.

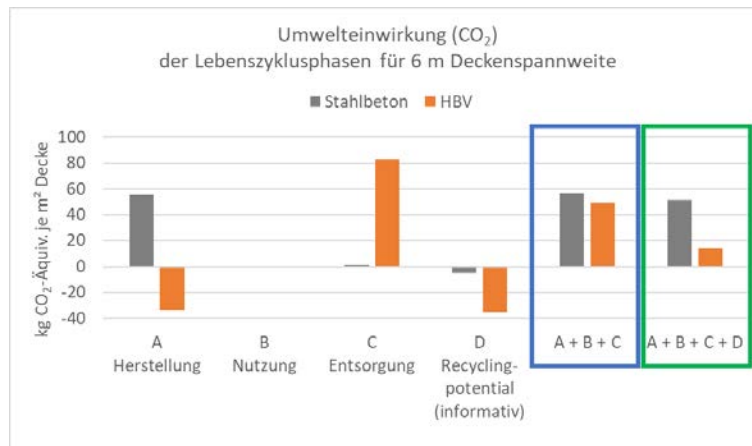


Abbildung 316: Umwelteinwirkungen durch Treibhausgase in den Lebenszyklusphasen einer Decke mit 6 m Spannweite

In der Nutzung (B) fallen keine Gutschriften oder Belastungen an. Für die Stahlbeton- und HBV-Decken werden entsprechend [94] Nutzungsdauern von 50 Jahren angenommen. Dies entspricht der geplanten Nutzungsdauer der Eurocodes [30]. Daher ist innerhalb der Nutzungsphase (B) keine Erneuerung notwendig.

Bei Betrachtung der Entsorgung (C) wird deutlich, dass die Menge an biogenem Treibhauspotential das System wieder vollständig verlässt.

Das Recyclingpotential als thermische Verwertung (D) belegt einen weiteren Vorteil der HBV-Decke. Zwar befinden sich diese Wirkungen nicht mehr ausschließlich innerhalb der Systemgrenzen der Gebäudebilanzierung, allerdings sollte das Recyclingpotential nach Meinung der Autoren zur Entscheidungsfindung im Rahmen einer Bauplanung unbedingt berücksichtigt werden.

Bei der Summierung der nach DIN 15804 [92] zu berücksichtigen Lebenszyklusphasen A+B+C (Abbildung 316, blaue Markierung) ist für die HBV-Decke eine geringere CO₂-Belastung zu verzeichnen, als für die Stahlbetondecke. Noch deutlicher wird der Unterschied mit Berücksichtigung der Energiegewinnung durch die thermische Verwertung nach der Nutzung A+B+C+D (Abbildung 316, grüne Markierung).

Die Umwelteinwirkung durch Treibhausgase werden unter Berücksichtigung anderer Deckenspannweiten für die Gebäudelebenszyklen A+B+C (Abbildung 316, blaue Markierung) in Abbildung 317 (links) und die Gebäudelebenszyklen unter Berücksichtigung des Recyclingpotenzials A+B+C+D (Abbildung 316, grüne Markierung) in Abbildung 317 (rechts) verglichen.

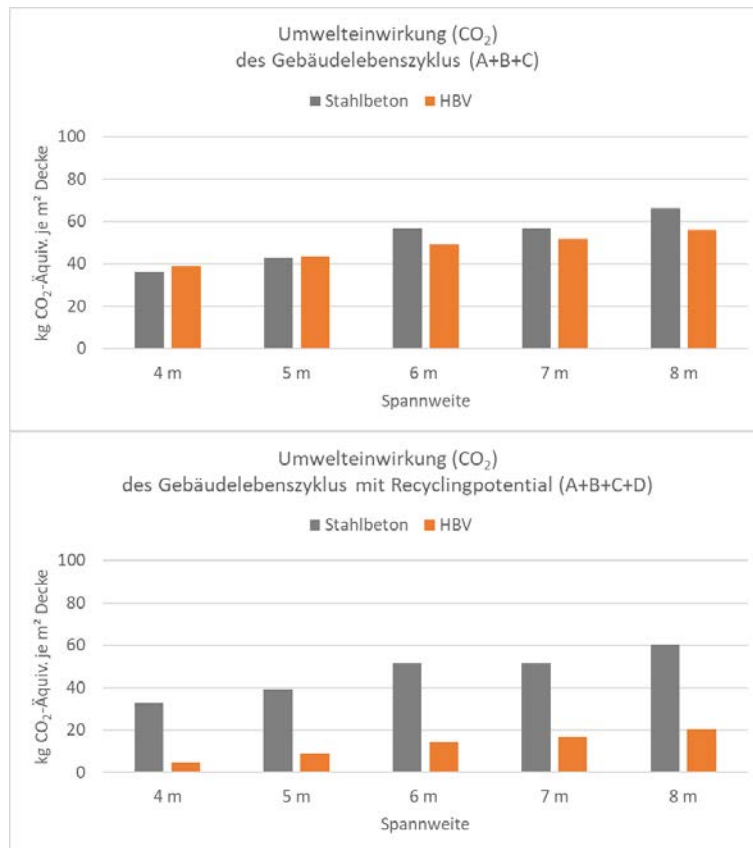
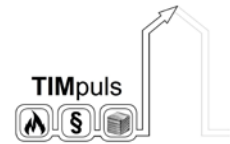


Abbildung 317: Umwelteinwirkungen durch Treibhausgase im gesamten Lebenszyklus der Decken (links), einschließlich Recyclingpotential (rechts)

Für A+B+C findet eine Reduzierung der Umwelteinwirkung durch Treibhausgase bei der Verwendung von HBV-Decken anstelle von Stahlbetondecken erst ab Spannweiten von 6 m statt. Die Einsparungen betragen ca. 10 % bis 15 %.

Die Reduzierungen der Umwelteinwirkung durch Treibhausgase betragen unter Berücksichtigung des Recyclingpotentials (D) bei 4 m Spannweite ca. 90 %, bei 8 m Spannweite ca. 70 %. Die prozentual betrachtete Reduzierung verringert sich mit zunehmender Spannweite, da die kalkulierten Holz-Beton-Verbunddecken (siehe Tabelle 39) gleichbleibende mit einer 10 cm Holzschicht, bei ansteigender Betonschichthöhe bemessen wurden. Es muss berücksichtigt werden, dass die hier dargestellten Gewinne nach den heutigen Möglichkeiten des Recyclings kalkuliert wurden. Tatsächlich fallen diese erst in 50 Jahren an und sind somit vom zukünftigen, gesellschaftlichen Umgang mit Abfällen abhängig.



3.1.8 Arbeitspaket 8 Leitlinie für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise bis zur Hochhausgrenze

Im Jahr 2019 wurde während der Projektlaufzeit ein erster Entwurf der Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise - MHolzBauRL - durch die Bauministerkonferenz veröffentlicht.

Im Juli 2019 wurde daher im Rahmen der Projektbearbeitung in Zusammenarbeit mit allen Projektpartnern eine Stellungnahme zum Entwurf (05/2019) der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile in Holzbauweise für Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 (M-HolzBauRL) verfasst, siehe hierzu Anhang 4.7.

Im Oktober 2020 wurde durch die Bauministerkonferenz die Projektgruppe Brandschutz Holzbau initiiert. Vertreter/innen der beteiligten Institute und des projektbegleitenden Ausschusses unterstützen als Teilnehmer den weiteren Entwicklungsprozess.

Die Erarbeitung von Bauteilaufbauten und Fügungen erfolgte innerhalb der in Kapitel 3.1.2.9 und III 3.1.2.12 im Zuge der Entwicklung der Bauteilaufbauten und Fügungen für die Brandversuche. Die Planung sowie Ausführung der Bauteilanschlüsse und die Elementstöße sind gemäß den gängigen, baupraktischen Vorgaben (inkl. Spaltmaß bis zu 20 mm) als auch den Erkenntnissen aus [65], [258] und [263] vorgenommen. Außerdem sind die Erkenntnisse aus der Vielzahl an recherchierten und im TIMpuls durchgeführten Brandversuche in die Erarbeitung mit eingeflossen.

3.1.9 Arbeitspaket Wissenstransfer / Dissemination

Die Strategie für den zielgerichteten Wissenstransfer, der in diesem Bericht beschriebenen Ergebnisse, wurde erarbeitet und im August 2021 bei der FNR als Projektantrag eingereicht.

Das Anschlussprojekt zur gezielten und flächendeckenden Ergebnisvermittlung „TIMpuls - Dissemination“ steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den Arbeitspaketen 0 bis 9 des Vorhabens „TIMpuls“. Über dies hinaus sollen ausgewählte, aktuelle Forschungsergebnisse parallellaufender nationaler und internationaler Projekte in das Anschlussprojekt „TIMpuls - Dissemination“ mit einfließen.

Erste Schritte in Form von vorbereitenden Arbeiten zu Seminaren und insbesondere der begleitende Dialog mit bauaufsichtlichen Gremien erfolgten während der Laufzeit des hier beschriebenen Vorhabens.

3.2 Verwertung

Das Bauen mit Holz wird in Deutschland mit Blick auf die gesetzten Klimaschutzziele zwangsläufig an Bedeutung gewinnen. Das zentrale Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es daher, Bedenken auf Seiten der Interessenvertreter des Brandschutzes (insb. Bauaufsicht und Feuerwehr) durch vollständige, wissenschaftlich begründete Untersuchungen auszuräumen bzw. konstruktive Lösungen zu entwickeln, um möglichen Risiken entgegenzuwirken und technische und wissenschaftliche fundierte Konzepte für brandschutztechnisch sichere Gebäude aus Holz zu entwickeln.

Eine maßgebende Rolle spielen hier die oben aufgeführten Ergebnisse. Ein Schlüssel zur Akzeptanz der Ergebnisse ist die Aufbereitung der umfangreichen Versuche in entsprechenden themenspezifischen Veröffentlichungen sowie die Aufbereitung und Bereitstellung der umfangreichen Versuchsergebnisse für die internationale Fachöffentlichkeit. Das genaue Vorgehen ist dem Folgeantrag Dissemination beschrieben.

Aus der Menge an Brandversuchen zum Raumbrandverhalten, zum Feuerwiderstandsverhalten von Holztafel- und Massivholzbauteilen sowie zur Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen wurden zahlreiche Erkenntnisse zum Brandverhalten und zur konstruktiven Ausbildung bei 90minütiger ETK- bzw. Naturbrandbeanspruchung gesammelt. Diese Erkenntnisse können unter anderem zur Konstruktion von Bauteilen für die brandschutztechnischen Anforderungen in Gebäudeklasse 5 herangezogen werden. Zudem sind die ersten Erkenntnisse hieraus bereits in die Arbeitskreise der Bauaufsicht für die Novellierung der Muster-Holzbaurichtlinie [155] eingeflossen.

Für eine zukünftige Verwendung der Brandschutzbekleidung können vier unterschiedliche Lösungsansätze in Betracht gezogen werden, wobei der Lösungsansatz d) die präferierte Variante darstellt und bereits in vereinfachter Form in [155] enthalten ist:

- a) In EN 13501-2 / EN 14135 die Verkohlungen im Bereich von Verbindungsmittel und Fugenbereichen zuzulassen. Die Begrenzung kann über eine Unterscheidung des Grades der Verfärbung oder durch eine Begrenzung der Ausbreitung/Fläche stattfinden. Weiterhin wird die Brandschutzbekleidung über eine Klassifizierungsnorm geregelt.
- b) In MVVTB die Bewertung der Brandschutzbekleidung ausschließlich auf Temperaturkriterien beschränken. Abweichend der Klassifizierungsnorm ist ein Verfärben zulässig aber ein Entzünden der Trägerplatte ist weiterhin auszuschließen. Dementsprechend ist eine Abweichung von der europäischen Klassifizierung erforderlich und eine geänderte Bezeichnung notwendig. Die Bauweise würde über die MVVTB geregelt.
- c) In der M-HolzbaURL eine geänderte Zuordnung der Brandschutzfunktion (K) gegenüber der Feuerwiderstandsdauer ermöglichen. Entsprechend ist für feuerbeständige Bauteile eine K₂60 Bekleidung möglich. Die Verwendbarkeit erfolgt weiterhin über die Klassifizierung (EN 13501-2) in Kombination mit der M-HolzbaURL.
- d) In der M-HolzbaURL könnte eine Zuordnung möglicher Kombination von Gipsplatten zu Feuerwiderstandsdauern erfolgen. Entsprechend ist für feuerbeständige Bauteile eine Kombination von 2 x 18 mm möglich (fb -> 2 x 18 mm; hfh -> 2 x 15 mm bzw. 15 mm + 18 mm (unabhängig welche 1. und 2. Lage ist); fh 1 x 18 mm oder 1 x 25 mm). Die Verwendbarkeit erfolgt über die M-HolzbaURL.

Ebenfalls zu beachten wäre eine Erweiterung der Klassifizierungszeiten der europäischen Normung um eine 45 Minuten Klassifizierung. Dadurch wäre die Klassifizierung von Bauteilen der Feuerwiderstandsklasse REI₆₀ K₂45 möglich, welche eine reduzierte Kapselung gegenüber der Tragfähigkeit und/oder Raumabschluss darstellt.

Die Skalierbarkeit der Versuchsergebnisse zwischen dem Klein-/Mittelmaßstab hinsichtlich des Raumbrandverhaltens bzw. der Branddynamik bei ungeschützten und anfängliche geschützten Holzbauteilen sowie der Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung auf den Großmaßstab konnte hier über entsprechende Brandversuche dargestellt werden. Dies ermöglicht eine weitestgehende Extrapolation der Vielzahl an Erkenntnisse der kleinformigen Brandversuche auf den Großmaßstab.

Eine Erweiterung des Naturbrandmodells bezüglich ungeschützter Holzflächen ermöglicht die Bestimmung von Naturbrandkurven in Räumen mit mobiler und struktureller Brandlast, welche eine leistungsorientierte Bemessung der Bauteile ermöglicht. Hierbei wird über die Berechnung der Abbrandtiefe unter Naturbrandbeanspruchung ein neues Anwendungsgebiet bei der Berechnung der Einwirkung von Holzbauteilen unter Naturbrandbeanspruchung geöffnet, wodurch eine wirtschaftlichere Ausnutzung der Ressourcen hervorgeht.

Bezogen auf eine leistungsorientierte Brandschutzbemessung können auch die Erkenntnisse der numerischen Untersuchungen als Erweiterung des Anwendungsgebietes angesehen werden. Die mit der CFD Analyse erarbeiteten Felder Pyrolysemodell und Reaktionsgleichung stellen für die Abbildung der strukturellen Brandlast in Feldmodellen einen neuen Anwendungsbereich dar. Die Anwendung von Feldmodellen für die Berechnung von thermischen Einwirkungen findet in der Praxis zunehmend häufiger statt. Vergleichbares zeigt sich für die thermischen Bauteilanalysen unter Norm- oder Naturbrandbeanspruchung. Diese beiden rechnergestützten Anwendungen, welche jedoch vom Benutzer mehr Erfahrung im Vergleich zu dem erweiterten Naturbrandmodell voraussetzen, ermöglichen ebenfalls eine optimale und wirtschaftlichere Verwendung der Baumaterialien dar.

Eine risikoorientierte Bewertung der Anwendbarkeit von Holz im mehrgeschossigen Bauen wurde vergleichend mit der semi-quantitativen Risikomethode FRIM-MAB durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass durch bauliche und/oder anlagentechnische Maßnahmen das bisherige brandschutztechnische Sicherheitsniveau aufrechterhalten werden kann. Zudem konnte aufgezeigt werden, dass insbesondere für die Gebäudeklasse 4 bauliche Erleichterungen möglich sind, ohne das brandschutztechnische Sicherheitsniveau zu reduzieren.

Für eine koordinierte und zielführende Umsetzung der Ergebnisse dienen zum einen die während der Laufzeit durchgeführten Sitzungen mit dem projektbegleitenden Ausschuss und zum anderen die beantragte Dissemination der Erkenntnisse in alle Bereiche und Tiefen der Baubeteiligten. Hierfür ist im Rahmen der Dissemination zwingend eine Aufbereitung der Ergebnisse entsprechend dem Fachgebiet und Kenntnisstand der Adressaten erforderlich, um die Verwertung zu fördern. Das genaue Vorgehen ist dem Folgeantrag Dissemination zu entnehmen.

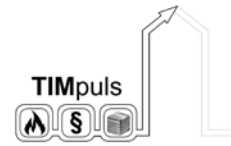
Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten hängen maßgebend von der Novellierung und Einführung der bauaufsichtlichen Regelungen (z. B. Muster-Holzbaurichtlinie, länderspezifische Holzbaurichtlinie) ab.

Im Zuge der leistungsorientierten Bemessung ist eine wirtschaftlichere Ausnutzung der Baumaterialien möglich. Die Umsetzung dieser ist mit der Güte der Dissemination verknüpft.

Die Resultate beeinflussen den Abwehrenden Brandschutz in Bezug auf der Entwicklung des Holzbaus in Deutschland und weltweit. Sowohl die einsatztaktischen Empfehlungen anderer Länder zur Brandbekämpfung im Holzbau sowie die durchgeführte Umfrage bei den Berufsfeuerwehren in Deutschland machen deutlich, dass der Fokus auf der Wissensvermittlung für eine hinreichende Vorbereitung der Einsatzkräfte, auf die Herausforderungen im mehrgeschossigen Holzbau, liegen sollte. Hierfür müssen geeignete Ausbildungskonzepte zu den geforderten Themen für die Feuerwehren bzw. Feuerwehrschulen angefertigt und bereitgestellt werden. Neben der Vermittlung von Kenntnissen zu Bauweisen des Holzbaus sind besonders branddynamische Veränderungen des Raumbrandes aufgrund der brennbaren Holzoberflächen darzustellen. Des Weiteren müssen die Einsatztaktiken aufbereitet werden. Viele der im Fragebogen angesprochenen Themen werden durch neue Erkenntnisse im Projekt TIMpuls teilweise betrachtet und erarbeitet. Daher muss besonders eine Vermittlung dieses Wissens an die Feuerwehren einen Schwerpunkt im Folgeantrag Dissemination bilden. Hierin ist auch eine Chance zu sehen, dass mit zunehmendem Wissen und späteren Erfahrungen der Feuerwehren auch die Akzeptanz von Holzbauweisen steigt.

Die Brandversuche zum Nachbrandverhalten und Selbstverlöschten von Holz und Holzwerkstoffen im Labormaßstab, als auch die Versuche im mittleren und großen Maßstab belegen Einflüsse und Randbedingungen für das Nachbrand und Abkühlverhalten von Bränden in Räumen in Holzbauweisen. Es ist nachgewiesen worden, dass Holz im Labormaßstab, unter Berücksichtigung der aufgeführten Randbedingungen, selbstverlöschend ist. Die Erkenntnisse aus diesen Brandversuchen sind eine Grundlage für die, im Rahmen des Forschungsvorhabens TIMpuls, entwickelten Bauteilaufbauten und ganzheitlichen Vorschläge zur Verwendung von Holzbauweisen in der Gebäudeklasse 5. Auf Grundlage der Ergebnisse kann bestimmt werden, bis zu welchem Grad die raumbildenden Bauteile mit brennbaren, bzw. nichtbrennbaren (bekleideten) Oberflächen ausgeführt werden, um wirksame Löscharbeiten durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr oder ein Selbstverlöschten der Brände zu ermöglichen.

Die abschließenden Realbrandversuche dienen als „Beleg“ der innerhalb des Forschungsvorhabens TIMpuls gewonnenen Erkenntnisse für mehrgeschossige Holzgebäude. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Labor-, Klein- und Großbrandversuchen weisen diese Realbrandversuche - im Vorhaben Belegversuche genannt - zum Ende des Vorhabens die Ergebnisse abschließend unter realen Randbedingungen und natürlichen Brandlasten nach. Dabei wurden bautypische, im mehrgeschossigen Holzbau übliche Kombinationen aus verschiedenen Konstruktionsformen (z. B. Brettsper Holz und Holztafelbau) berücksichtigt. Es wurden sowohl Decken und Wände mit bekleideten als auch mit sichtbaren Holzoberflächen berücksichtigt. Die Versuche lieferten für alle Interessenvertreter/innen ein klareres Bild, wie sich die gesamte Holzkonstruktion im Brandfall und während des Löschvorgangs durch die Feuerwehr verhält. Dies unter ganz realen Bedingungen, also praxisnah. Mit den gewonnenen



Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Erkenntnissen soll die bauordnungsrechtliche Öffnung der Gebäudeklasse 4 und 5 für den mehrgeschossigen Holzbau bekräftigt werden.

3.3 Erkenntnisse von Dritten

Im Juli 2019 fand eine Anhörung zum Entwurf der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile in Holzbauweise für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 – M-HolzBauRL durch die Bauministerkonferenz statt. Der Entwurf der M-HolzBauRL soll zukünftig eine Vereinheitlichung der Vorgaben bei der Verwendung brennbarer Baustoffe bundeslandübergreifend ermöglichen und die M-HFHolzR als Richtlinie ablösen. Die enge Einbindung der bauaufsichtlichen Gremien durch den projektbegleitenden Ausschuss ermöglichte es bereits während der Projektlaufzeit erste Erkenntnisse in diese Richtlinie einfließen zu lassen. Des Weiteren wurde seitens der bauaufsichtlichen Vertreter/innen zugesichert, dass die Erkenntnisse des Vorhabens TIMpuls nach Abschluss des Projektes zeitnah berücksichtigt werden und in die bauaufsichtlichen Regelungen einfließen.

Während der Projektbearbeitung erfolgte die Durchführung und gut dokumentierte Publikation von Ergebnissen zu Raumbrandversuchen an Holzkonstruktionen mit Realbrandlasten (z. B. Su 2018 [124] / [127], Epernon Fire Tests 2019 [40] / [41], Zelinka 2018 [123], RISE 2021 [262]). Die Ausführung der Holzbauteile erfolgte hierbei ungeschützt sowie anfänglich geschützt welche innerhalb der relevanten Arbeitspakete berücksichtigt wurden.

Des Weiteren zeigte Brandon 2018 [73] ein Ansatz zur Erweiterung der parametrischen Temperaturzeitkurven gemäß EC1-1-2 hinsichtlich ungeschützter Holzflächen.

3.4 Veröffentlichungen und Vorträge

Veröffentlichungen:

- Engel, Thomas (2021) Forschungsvorhaben TIMpuls: Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau bis zur Hochhausgrenze. Holzbau die neue Quadriga (5/2021)
- Engel, Thomas; Kurzer, Christoph; Werther, Norman; Brunkhorst, Sven; Winter, Stefan (2021) Aus der Forschung: TIMpuls - mehrgeschossige Holzbauten unter Feuer. FeuerTrutz Brandschutzkongress 2021
- Engel, Thomas; Kurzer, Christoph; Werther, Norman; Winter, Stefan (2021) Realbrandversuche als Grundlage neuer Forschungserkenntnisse für den Brandschutz im Holzbau. Brandschutz-Tagung 2021
- Brunkhorst, Sven; Engel, Thomas; Steeger, Felix; Butscher, Daniel; Kurzer, Christoph; Werther, Norman; Zehfuß, Jochen (2021): TIMpuls Großversuche an Holzbauten. Braunschweiger Brandschutztag 2021.
- Butscher, D.; Neske, M. (2021): TIMpuls – Erkenntnisse für den abwehrenden Brandschutz. vfdb Jahresfachtagung 2021.
- Zehfuß, J.; Kampmeier, B.; Brunkhorst, S.; Steeger, F. (2021): TIMpuls - Forschungsvorhaben zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen zur erweiterten Anwendung des Holzbaus. vfdb Jahresfachtagung 2021.
- Engel, Thomas; Kurzer, Christoph; Werther, Norman; Winter, Stefan (2021) TIMpuls - abschließende Realbrandversuche für den mehrgeschossigen Holzbau. vfdb Jahresfachtagung 2021.
- Engel, Thomas (2020) Sind Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen in Holzgebäuden notwendig? holzbau report (November 2020)
- Engel, Thomas; Brunkhorst, Sven; Steeger, Felix; Winter, Stefan; Zehfuß, Jochen; Kampmeier, Björn; Werther, Norman (2020) TIMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau. Bautechnik <https://doi.org/10.1002/bate.202000043>
- Engel, Thomas; Moosmüller, Katharina; Werther, Norman (2020) Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. Bautechnik, <https://doi.org/10.1002/bate.202000076>
- Engel, T.; Werther, N. (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>
- Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2020) Experimental and Numerical Analysis of Fire Development in Compartment Fires with Immobile Fire Load. In: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety 2020. Strbske, SVK. S. 185 - 190 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7>
- Steeger, F.; Dienst, S.; Kampmeier, B. (2020) Verhalten von Holz-Beton-Verbunddecken im Naturbrand, in FeuerTrutz Magazin Ausgabe 3.2020
- Engel, T.; Brunkhorst, S.; Werther, N.; Winter, S.; Zehfuß, J. (2020) Forschungsprojekt TIMpuls. Tagungsband 12. Biberacher Brandschutztag, 2019Biberach, Deutschland
- Winter, S.; Zehfuß, J.; Engel, T.; Brunkhorst, S.; Werther, N. (2019): Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung für eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. In: Tagungsband der Braunschweiger Brandschutz-Tage vom 25. – 26. September 2019 in Braunschweig. ISBN 978-3-89288-220-6.
- Brunkhorst, S.; Zehfuß, J. (2019) Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverlauf von Raumbränden mit immobilen Brandlast. In 6th Symposium Structural Fire Engineering. Braunschweig 24. September 2019.

- Engel, T.; Butscher, D. (2019) Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen für das Bauen mit Holz; BRANDSchutz / Deutsche Feuerwehr-Zeitung; Ausgabe 5/2019; ISSN 0006-9094

Vorträge:

- Engel, Thomas (2021) TIMpuls – Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau bis zur Hochhausgrenze. HOLZBAUTAGUNG KONSTANZ
- Engel, Thomas (2020) Brandschutztechnische Leistungsforderungen an mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise. 6. Niederbayerischer Brandschutztag Brandschutz im Holzbau
- Brunkhorst, S. (2019) Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchungen für eine erweiterte Anwendung des Holzbaus - Aktuelle Ergebnisse aus den TIMpuls Forschungsvorhaben. Herbsttagung und Mitgliederversammlung des DHV – Deutscher Holzfertigungsbau-Verband e.V.. 14. und 15. November 2019.
- Engel, T.; Brunkhorst, S.; Werther, N.; Winter, S.; Zehfuß, J. (2019) Forschungsprojekt TIMpuls; Tagungsband 12. Biberacher Brandschutztag; Biberach

Literatur

- [1] DIN EN 1991-1-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009.
- [2] DIN EN 13501-2:2016-12. Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2016.
- [3] Zehfuß, J. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht TB 04-01 der vfdb. Technischer Bericht. VdS-Verl., Köln, 2020.
- [4] McCaffrey, B. J.; Quintiere, J. G.; Harkleroad, M. F.: Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. *Fire Technology* 17 (1981), Heft 2, S. 98–119.
- [5] Foote, K., Pagni, P.J. and Alvares, N.J.: Temperature Correlations For Forced-ventilated Compartment Fires. *Fire Safety Science* 1, (1986). S. 139-148. doi:10.3801/IAFSS.FSS.1-139
- [6] Deal, S., Beyler, C.: Correlating Preflashover Room Fire Temperatures. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2, Volume 2, (1990). S. 33 – 88.
- [7] Peatross, M., Beyler, C.: Thermal Environmental Prediction in Steel-bounded Preflashover Compartment Fires. *Fire Safety Science - Proceedings of the Fourth International Symposium*, International Association for Fire Safety Science, 1994. S. 205–216.
- [8] Beyler, C.: Analysis of Compartment Fires with Overhead Forced Ventilation. *Fire Safety Science - Proceedings of the Third International Symposium*, International Association for Fire Safety Science, 1991. S. 291 - 300.
- [9] Magnusson, S. E., & Thelandersson, S. Temperature - Time Curves of Complete Process of Fire Development. (Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin 16; Vol. Bulletin 16). Lund Institute of Technology, Lund 1970.
- [10] Kawagoe, K., Sekine, T.: Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms. Building Research Institute. Occasional Report. No. 11. Tokyo 1963.
- [11] Ödeen, K.: Theoretical Study of Fire Characteristics in Enclosed Spaces. Division of Building Construction, Royal Institute of Technology. Bulletin No. 10. Stockholm 1963.
- [12] Hosser, D., Zehfuß, J.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum erforderlichen Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Stahlbauweise, Forschungsvorhaben S 503 im Auftrag der Stiftung Industrieforschung, Köln, Abschlussbericht: Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 2002.
- [13] Zehfuß, J.: Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Fachbereich Bauingenieurwesen, 2004.
- [14] Babrauskas, V.: A Closed-Form Approximation for Post-Flashover Compartment Fire Temperatures, *Fire Safety Journal*, 4, 1981. S. 63 – 73.
- [15] Babrauskas, V.; Williamson, R.: Post-Flashover Compartment Fires: Basis of a Theoretical Model, *Fire and Materials*, 2, Volume 2, 1978. S. 39 - 53.
- [16] Law, M.: A basis for the design of fire protection of building structures. *The Structural Engineer*, Vol. 61A. Institution of Structural Engineers, 1983. Nr. 1.
- [17] Delichatsios, M., Lee, Y.-P., Tofilo, and P.: A new correlation for gas temperature inside a burning enclosure. *Fire Safety Journal* 44, Volume (8), 2009. S. 1003 – 1009.
- [18] Matsuyama, K. et al.: A Simple Predictive Method for Room Fire Behavior. *Fire Science and Technology* 1, Volume 18, 1998. S. 23 – 32.
- [19] Feasey, R., Buchanan, A.: Post-flashover fires for structural design. *Fire Safety Journal* 37, 2002. S. 83 – 105.

- [20] Barnett, C.: BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures. Fire Safety Journal 37, Heft 5. 2002. S. 437 – 463.
- [21] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
- [22] Thomas, P.: Testing Products and Materials for their Contribution to Flashover in Rooms. Fire and Materials 3, Volume 5. 1981. S. 103 – 111.
- [23] Ma, Z., Mäkeläinen, P.: Parametric temperature - time curves of medium compartment fires for structural design. Fire Safety Journal 34, 2000. S. 361 – 375.
- [24] Feasey, R.: Post-Flashover design fires. Fire Engineering Research Report 99/6 Department of Civil Engineering University of Canterbury Christchurch, New Zealand. March 1999. ISSN 1173-5996.
- [25] Harmathy, T., Mehaffey, J.: Post-Flashover Compartment Fires. Fire and Materials, 7, Volume 2, 1983. S. 49 - 61.
- [26] Babrauskas, V.: Estimating Room Flashover Potential. Fire Technology 16 Volume 2. 1980. S. 94 – 104.
- [27] Musterbauordnung (MBO) Fassung Nov. 2002, zuletzt geändert auf Beschluss der Bauministerkonferenz Mai 2016.
- [28] Schneider, U. Ingenieurmethoden im Brandschutz. Werner Verlag, 2. Auflage. 2009. ISBN 978-3-8041-5238-0.
- [29] Hosser, H. et al Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2“ (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung). Abschlussbericht zum DIBT-Forschungsvorhaben ZP 52-5-4.168-1239/07. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 2008.
- [30] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [31] DIN EN 1990/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [32] Putynska, C.: Fire Dynamics in Multi-Scale Timber Compartments. Dissertation, School of Civil Engineering der University of Queensland, 2019.
- [33] DIN EN 14390:2007-04: Brandverhalten von Bauprodukten – Referenzversuch im Realmaßstab an Oberflächenprodukten in einem Raum; Deutsche Fassung EN 14390:2007.
- [34] ISO 9705-1:2016-2: Brandverhalten von Baustoffen - Prüfung mit einem in einer Ecke des Raumes befindlichen Brandherd (room corner test) für Wand- und Deckenbekleidungsprodukte - Teil 1: Prüfverfahren für kleine Räume.
- [35] DIN EN 300:2006-09: Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen (OSB) - Definitionen, Klassifizierung und Anforderungen; Deutsche Fassung EN 300:2006.
- [36] DIN EN 13353:2011-07: Massivholzplatten (SWP) – Anforderungen; Deutsche Fassung EN 13353:2008+A1:2011.
- [37] DIN EN 520:2009-12: Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 520:2004+A1:2009.
- [38] ETA-03/0050: fermacell Gipsfaserplatten - Gipsfaserplatten für die Bepunktung und Bekleidung von Bauteilen.
- [39] DIN 4074-1:2012-06: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz.
- [40] Robert, F. et al.: ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 010617: CLT slab (Natural Fire Test – Scenario 1), CERiB Fire Testing Centre, Frankreich, 2019. <http://www.epernon-fire-tests.eu>.
- [41] Robert, F. et al.: ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 013597: CLT slab (Natural Fire Test, Scenario 2), CERiB Fire Testing Centre, Frankreich, 2019. <http://www.epernon-fire-tests.eu>.

- [42] DIN EN 1995-1-2:2010-12: Eurocode 5, Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009.
- [43] Werther, N.: Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren. Dissertation am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der TU München, 2016.
- [44] Schmid, J; et al.: Timber under Real Fire Conditions – the Influence of Oxygen Content and Gas Velocity on the Charring Behavior, 9th International Conference on Structures in Fire (SiF), Princeton, USA, 8. – 10. Juni 2016.
- [45] McNamee, R.: et al.: Enclosure Fire Dynamics with a Combustible Ceiling. In Tagungsband der 15. interflam conference 2019 vom 01. – 03. Juli 2019 in London.
- [46] McGrattan, K., et al. Fire Dynamics Simulator - User's Guide (Sixth Edition). NIST Special Publication 1019. Revision: FDS6.7.0-0-g5ccea76. 2018. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>.
- [47] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHolzR). Fassung Juli 2004.
- [48] Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) (2021) Die gemeine Esche (*Fraxinus excelsior* L.) online; zuletzt abgerufen am 02.12.2021 <https://www.lwf.bayern.de/waldbau-bergwald/waldbau/106548/index.php>.
- [49] Hosser, D.; Wesche, J.; Zehfuß, J.; Becker, K.; Tichelmann, K.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 in Holzbauweise; Stufe 3: Empfehlungen und Umsetzung. Abschlussbericht 2001.
- [50] Rohling, A.; Paul, T.: Erarbeitung von Konstruktionsdetails zur Kapselung tragender Bauteile für die neue Gebäudeklasse 4 der MBO; Abschlussbericht 2007.
- [51] DIN EN 14135:2004-11: Brandschutzbekleidungen – Bestimmung der Brandschutzwirkung. Deutsche Fassung EN 14135:2004.
- [52] DIN EN 15283-2:2009-12: Faserverstärkte Gipsplatten – Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren – Teil 2: Gipsfaserplatten. Deutsche Fassung EN 15283-2:2008+A1:2009.
- [53] Hosser, D.; Kampmeier, B., Kruse, D. und Rüther, N. (2010) Optimierung der Konstruktion und der Herstellprozesse von hochfeuerhemmenden Holztafelelementen unter sicherheitsrelevanten, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten (Optimierung K60). Abschlussbericht 2010.
- [54] DIN 4102-8:2003-10: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 8: Kleinprüfstand. Beuth, Berlin.
- [55] DIN EN 60584-1:2013-07: Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen. Deutsche Fassung EN 60584-1:2013.
- [56] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2019) Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. Ausgabe Aug. 2019/1 vom 15.01.2020.
- [57] Engel, T.; Lechner, M. (2020) Baurechtskonformes Planen und Bauen mit Holz –Verwendbarkeitsnachweise und technische Regeln für den Brandfall im Holzbau. Version 1 März 2020; Technische Universität München. DOI 10.14459/2020md1543153
- [58] Engel, T.; Werther, N. (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. Bautechnik. <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>
- [59] Bell, A. (2019) Schriftliche Antwort per Mail auf Nachfrage bzgl. brandschutztechnisches Schutzziel an Fassaden an die Projektgruppe Brandschutz der Bauministerkonferenz.
- [60] Österreichisches Institut für Bautechnik Hrsg. (2015) OIB-Richtlinie 2 Brandschutz OIB-330.2-011/15. Ausgabe März 2015.
- [61] Bart, B.; Kotthoff, I.; Wiederkehr, R. et al. (2019) Lignum-Dokumentation Brandschutz 7.1 Aussenwände – Konstruktion und Bekleidungen. Lignum, Holzwirtschaft Schweiz Hrsg., Zürich.
- [62] Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) Hrsg. (2015) VKF-Brandschutzrichtlinie 14-15 Verwendung von Baustoffen. Bern.

- [63] ARGEBAU Bauministerkonferenz, Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder Hrsg. (2007) Muster-Richtlinien über Flächen für die Feuerwehr. Fassung Feb. 2007.
- [64] Güdemann, M. (2018) Untersuchung holzbautypischer Wand-Decken-Anschlüsse bezogen auf die Rauchdichtigkeit Master-Thesis. Technische Universität München.
- [65] Suttner, E.; Werther, N.; Dumler, P. (2020) Stand der Technik zur Qualität von Bauteil- und Elementfugen in Holzbaukonstruktionen im Hinblick auf den Durchtritt von Feuer und Rauch <https://www.doi.org/10.13140/RG.2.2.20566.80964>
- [66] DIN EN 1363-1:2012-10 (2012) Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth, Berlin.
- [67] Engel, T.; Heumann, F. (2020) Versuchsbericht Nr. 01-08-19 - Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung (ETK) und parametrischer Brandbeanspruchung. München: Technische Universität München.
- [68] Schmid, J.; Brandon, D.; Werther, N.; Klippel, M (2018) Technical note - Thermal exposure of wood in standard fire resistance tests, Fire Safety Journal, Volume 107, July 2019. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.02.002>
- [69] Fahrni, R.; Schmid, J.; Klippel, M.; Frangi, A. (2018) Correct temperature measurements in fire exposed wood, World Conference on Timber Engineering (WCTE 2018). <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000289850>
- [70] Antonio T.; Reto F.; Joachim S.; Michael K.; Andrea F. (2018) Temperature measurements in wood specimens, Book of abstracts of the final conference COST FP 1404 "Fire Safe Use of Bio-Based Building Products"
- [71] Winter, S.; Zehfuß, J.; Engel, T.; Brunkhorst, S.; Werther, N. (2019) Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung für eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. In: Tagungsband der Braunschweiger Brandschutz-Tage vom 25. – 26. September 2019 in Braunschweig.
- [72] Bruch, K. (2016) Vergleich der Bauteilbemessungen mit ETK und Naturbrandverfahren am Beispiel von Stahlbetonplatten Bachelorarbeit. Hochschule Magdeburg-Stendal und Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [73] Brandon, Daniel: Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – RFNFPA Phase 2: Task 4 – Engineering Methods, 2018
- [74] Bartlett, A. I. (2018) Auto-Extinction of Engineered Timber Dissertation, The University of Edinburgh
- [75] Bartlett, A. I.; Hadden, R. M.; Hidalgo J. P. et al. (2017) Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics, in: Fire Safety Journal 91, Elsevier, Amsterdam, S. 407-413.
- [76] Emberley, R.; Inghelbrecht, A.; Yu, Z.; Torero, J. L. (2017) Self-extinction of timber, in: Proceedings of the Combustion Institute Volume 36, Issue 2, Elsevier, Amsterdam, S. 3055-3062
- [77] ISO 5660-1:2015-03 (2015) Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen - Wärmefreisetzungs- Rauchentwicklungs- und Masseverlustrate - Teil 1: Wärmefreisetzungsrate (Cone Calorimeter-Verfahren) und Rauchentwicklungsrate (dynamische Messung). Beuth, Berlin
- [78] DIN EN 1992-1-2:2010-12 (2010) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall (EN 1992-1-2:2004 + AC:2008). Beuth, Berlin
- [79] DIBt Deutsches Institut für Bautechnik (2015) Allgemein bauaufsichtliche Zulassung für SFS VB Schrauben als Verbindungsmittel in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. AbZ Z-9.1-342, ausgestellt am 23.10.2015
- [80] DIBt Deutsches Institut für Bautechnik (2018) Europäische Technische Bewertung für SFS VB Schrauben als Verbindungsmittel in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. ETA-13/0699, ausgestellt am 14.06.2018

- [81] van Haaren, N. (2018) Bemessungsverfahren für mehrfeldrige HBV-Decken in Verbindung mit HBV Plattenbalkenunterzügen Bachelorarbeit. Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst in Hildesheim/Holzminden/Göttingen.
- [82] DIN EN 1992-1-1:2011-01 (2011) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (EN 1992-1-1:2004 + AC:2010). Beuth, Berlin.
- [83] BARTLETT, A. I.; HADDEN, R. M.; BISBY, L. A. (2018) A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction, in: Fire Technology, Volume 55, Issue 1, 2019, Springer Science+Business Media, Berlin, S. 1 - 49
- [84] Steeger, Felix; Kampmeier, Björn; Dienst, Sebastian: Tragverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken in einem natürlichen Brand, in Bautechnik (in Bearbeitung) Ausgabe 08.2020
- [85] Steeger, Felix; Dienst, Sebastian; Kampmeier, Björn: Verhalten von Holz-Beton-Verbunddecken im Naturbrand, in FeuerTrutz Magazin Ausgabe 3.2020
- [86] Lange, D. et al.: Timber and the fire resistance furnace – A comparative study of the conditions in a fire resistance furnace when testing combustible and non-combustible constructions.
- [87] Fahrni, R. et al.: Investigation of different temperature measurement designs and installations in timber members as low conductive material. 10th International Conference on Structures in Fire (SiF), Belfast, UK, 2018.
- [88] Kirsch, D. (2017) Optimierung der Wasserversorgung für Wohnraumsprinkleranlagen Masterarbeit. Hochschule Magdeburg-Stendal und Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [89] Karlson, Björn: Fire Risk Index Method Multistorey Apartment Buildings FRIM-MAB, 2002, online verfügbar: <https://www.traguiden.se/globalassets/forskning/brand---rapporter/fire-risk-index-method---multistorey-apartment-buildings-frim-mab.-version-2.0.pdf> (abgerufen 11.06.2020)
- [90] Kampmeier, Björn: Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau, 2008, online verfügbar: https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00024514 (abgerufen 11.06.2020)
- [91] Deutsches Institut für Bautechnik: Empfehlungen zur Sicherstellung der Schutzwirkung von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) aus Polystyrol, Merkblatt (18.06.2015), DIBt-Newsletter 3/2015, online verfügbar: https://www.dibt.de/fileadmin/dibt-website/Dokumente/Newsletter/2015_03.pdf (abgerufen 11.06.2020)
- [92] DIN EN 15804:2020-03 (2020) Nachhaltigkeit von Bauwerken Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte (EN 15804:2012+A2:2019). Beuth, Berlin
- [93] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2020) ÖKOBAUDAT online. Berlin: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. <https://www.oekobaudat.de/> Zugriff am 14.02.2020
- [94] Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2011) Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) online. Berlin: Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. https://www.nachhaltiges-bauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauedaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen__2011-11-03.pdf Zugriff am 14.02.2020
- [95] Moosmüller, K. (2019) Untersuchung der Brandgefahr durch Elektroinstallationen in Holzgebäuden Master-Thesis. Technische Universität München.
- [96] SIEMENS AG HRSG. (o. J.): Kohlebogenlampen: Scheinwerfer zur lichtstärksten Beleuchtung. München
- [97] PULM, Markus: Einsatztaktik für Führungskräfte: Praxiswissen für Gruppenführer. Stuttgart: Kohlhammer Verlag, 2017 (Fachbuchreihe Brandschutz)
- [98] MAYER, Ingo: Verborgenes Feuer - Brand in einem Einfamilienhaus in Riegelbauweise. In: Blaulicht 2015, Nr. 01, S. 4–5
- [99] WIDETSCHKE, Otto: Von den Bränden in den Wänden. In: Blaulicht 2015, S. 6–8

- [100] COFFEY, Mike: Building construction: How it effects your firefighting. URL <https://www.carolinafirejournal.com/articles>. – Aktualisierungsdatum: 2011-04-29 – Überprüfungsdatum 2020-07-14
- [101] MÜLLER, Jens: USA: Taktik folgt der Bausubstand - Vergleich der Wohnungsbrandbekämpfung in Deutschland und den USA. In: BrandSchutz Deutsche Feuerwehr-Zeitung 2011, Nr. 03
- [102] COXNER, Max; WIKLAND, Mathias Dalgren: Egendomsskydd vid brand i flerbostadshus, 2014
- [103] ERIKSSON, Per-Erik; NORD, Tomas; ÖSTMAN, Birgit: Kartläggning av brandincidener i flervåningshus med trästomme: Erfarenhet av 20 års brukande. Stockholm, 2016-02-21
- [104] SENEZ, P. L.; CALDER, K. D.; LI, H. H.: Fire loss statistical consideration in relating failure and building damage to the building code objectives. In: GRAYSON, Stephen (Hrsg.): INTERFLAM 2013: Proceedings of the thirteenth international conference; 13th International Fire Science & Engineering Conference; Royal Holloway College, University of London, UK, 24th - 26th June 2013. London: Interscience Communications, 2013
- [105] JOHANSSON, Nils: Fallstudie av konstruktionsbränder, 2015
- [106] VYLUND, Lotta; PALMKVIST, Krister: Taktik och metodik för släckning av höga trähus. 2017 (2017-12-21T12:40:00+0100)
- [107] FIRE CENTRAL PROGRAMME OFFICE: National Operational Guidance: Fires in Buildings. URL <https://www.ukfrs.com/guidance/fires-and-firefighting>. – Aktualisierungsdatum: 2019-07-10 – Überprüfungsdatum 2020-02-20
- [108] CIMOLINO, Ulrich; FUCHS, Martin; LAGBERG, Tommy; SÜDMERSEN, Jan; VRIES, Holger de: Brandbekämpfung in besonderen Lagen. Landsberg am Lech: ecomed Sicherheit, 2016 (Reihe)
- [109] KERBER, Stephen ; ZEVOTEK, Robin: Study of Residential Attic Fire Mitigation Tactics and Exterior Fire Spread Hazards on Firefighter Safety, 2014
- [110] RIDDER, Adrian (Hrsg.); CIMOLINO, Ulrich (Hrsg.): Brandbekämpfung im Innenangriff: Flashover und Backdraft, Löschmethoden, Einsatztaktik, Realbrandausbildung. Heidelberg, Hamburg: Ecomed Sicherheit Verl.-Gruppe Hüthig Jehle Rehm, 2013 (Einsatzpraxis)
- [111] CIMOLINO, Ulrich (Hrsg.); SVENSSON, Stefan (Hrsg.); EMRICH, Christian (Hrsg.): Taktische Ventilation: Be- und Entlüftungssysteme im Einsatz. Heidelberg, Hamburg: Ecomed Sicherheit Verl.-Gruppe Hüthig Jehle Rehm, 2012 (Einsatzpraxis)
- [112] PULM, Markus: Falsche Taktik - Große Schäden. 8th ed. Stuttgart: Kohlhammer Verlag, 2018
- [113] KRISTOFFERSEN, T.: Fremskutt Enhet I Bergen Brannvesen. In: Brannmannen 2012, Nr. 5
- [114] HOX, Kristian; SÆTER BØE, Andreas: Slokkemetoder med lite vann. Trondheim, 2017 (SPFR-rapport A17 20099-01:1)
- [115] SYLTE, C. J.; HANSEN, N. V. K.; FOSNES, S.: Er Inerg'en egnet til brannbekjempelse i skjulte hulrom i konstruksjoner? In: BRANN & SIKKERHET 2018, Nr. 04, S. 26-28
- [116] EBNER-VERLAG GMBH & CO KG (Hrsg.): Verhalten im Innenangriff: Ebner-Verlag GmbH & Co KG
- [117] AVILLO, Anthony: Fireground strategies: Fire engineering. Tulsa, Okla. : PennWell, 2002
- [118] WIDETSCHKE, Otto: Die neue Taktik im Feuerwehreinsatz, 2014 (Edition: Blaulicht)
- [119] KIRCHHOFF, Sabine: Der Fragebogen: Datenbasis, Konstruktion und Auswertung. 5. Aufl. Wiesbaden: VS-Verl., 2010
- [120] BUNDESGESETZBLATT: Gesetz zur Anpassung des Datenschutzrechts an die Verordnung (EU) 2016/679 und zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2016/680 (Datenschutz-Anpassungs- und -Umsetzungsgesetz EU- DSAnpUG-EU). 30. Juni 2017
- [121] AMTSBLATT DER EUROPÄISCHEN UNION: Verordnung (EU) 2016/679 des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. April 2016 zum Schutz natürlicher Personen bei

- der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG. Brüssel, 2016
- [122] Bundesverband der Gipsindustrie e.V.: GIPS-Datenbuch, Berlin, 2013.
- [123] Zelinka, S.; Hasburgh, L.; Bourne, K. et al. (2018): Compartment Fire Testing of a Two-Story Mass Timber Building – General Technical Report FPL-GTR-247. USDA, Madison, 2018.
- [124] Su, J.; Lougheed, G.D. (2014): Fire safety summary: Fire research conducted for the project on midrise wood construction – CLIENT REPORT: A1-004377.1. NRC CNRC, 2014.
- [125] Frangi, A.; Bochicchio, G.; Ceccotti, A. et al.: Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building, 2008.
- [126] Maag, T.; Fontana, M.: Brandversuche an Modulhotels in Holzbauweise. Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2000.
- [127] Su, J.; Lafrance, P.-S.; Hoehler, M. et al.: Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests. NFPA, Gaithersburg, 2018.
- [128] Schneider, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz. Werner, Düsseldorf, 2002.
- [129] König, J.; Walleij, L. (1999): One-Dimensional Charring of Timber Exposed to Standard and Parametric Fires in Initially Unprotected and Postprotection Situations. Trätekt, Rapport I 9908029.
- [130] Knudson, R.; Schniewind, A. (1975): Performance of structural wood members exposed to fire, Forest Products Journal 25.
- [131] Wullschleger, L., Ghazi Wakili, K. (2008): Numerical parameter study of the thermal behavior of a gypsum plasterboard at fire temperatures. Fire and Materials 32. <https://doi.org/10.1002/fam.956>
- [132] Hollmann, D., Schnetgöke, R (2016): Thermische Materialkennwerte von plattenförmigen Bekleidungsmaterialien für den Nachweis brandbeanspruchter Stahltragwerke. Beitrag Workshop Heißbemessung.
- [133] Draft EN 1995-1-2:2020 (E): Eurocode 5 – Design of timber structures Part 1-2: General – Structural fire design. 2. Draft, May 3, 2020.
- [134] Zehfuß, J.; Sander, L.; Schaumann, P.; Weisheim, W. (2018): Prüfverfahren für thermische Materialkennwerte von Brandschutzbekleidungen und reaktiven Brandschutzsystemen für die Bemessung von Stahltragwerken bei Naturbränden. Abschlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 19176 N im Auftrag Forschungsvereinigung Deutscher Ausschuss für Stahlbau e.V. (DAST).
- [135] König, J.; Walleij, L.: Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires - Part 2: A design model for standard fire exposure – Report I 0001001 Ausgabe 2000.
- [136] Kollmann, F.: Die mechanischen Eigenschaften verschieden feuchter Hölzer im Temperaturbereich von -200 bis +200°C – Mitteilungen aus dem Mechanisch-technologischen Institut der Reichsanstalt für Holzforschung zu Eberswalde. VDI, Berlin, 1940.
- [137] Glos, P.; Henrici, D.: Festigkeiten von Bauholz bei hohen Temperaturen – Abschlußbericht 87505 Ausgabe 1990.
- [138] Kollmann, F.; Schulz, F.: Versuche über den einfluß der Temperatur auf die Festigkeitswerte von Flugzeugholzbaustoffen – 1. Teilbericht. Reichsanstalt für Holzforschung Eberswalde, Ber. Nr. 130 Ausgabe 1944.
- [139] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe – Zweite Auflage - Erster Band. Springer, Berlin, 1951.
- [140] Schaffer, E.L.: Structural Fire Design: Wood – Research Paper FPL 450. United States Department of Agriculture, Forest Service, Madison Ausgabe 1984.
- [141] König, J.: The structural behaviour of axially loaded wood studs exposed to fire on one side – Report I 8808057 Ausgabe 1988.

- [142] König, J.: Fire resistance of timber joists and load bearing wall frames – Report I 9412971 Ausgabe 1995.
- [143] König, J.; Källsner, B.: The influence of the support conditions on the loadbearing capacity of axially loaded wood studs under simulated fire exposure (1988), Vol.2, S. 423-440.
- [144] König, J.; Norén, J.; Olesen, F.B. et al.: Timber frame assemblies exposed to standard and parametric fires - Part 1: Fire tests – Report I 9702015 Ausgabe 1997.
- [145] Young, S.A.: Structural modelling of plasterboard-clad, light timber-framed walls in fire. Victoria, Victoria University of Technology, Dissertation, 2000.
- [146] Young, S.A.: Compression Mechanical Properties of Wood at Temperatures Simulating Fire Conditions. In: Fire and Materials (2001), Fire Mater 25.
- [147] Bobacz, D.: Behavior of Wood in Case of Fire - Proposal for a Stochastic Dimensioning of Structural Elements. Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation, 2006.
- [148] Indefrey, A.: Thermomechanisches Materialverhalten von Nadelholz. München, Technische Universität München, 2013.
- [149] Östman, B.A.-L.: Wood tensile strength at temperatures and moisture contents simulating fire conditions. In: Wood Science and Technology (1985), Heft 19, S. 103-116.
- [150] Lau, P.W.C.: BEHAVIOUR AND RELIABILITY OF WOOD TENSION MEMBERS EXPOSED TO ELEVATED TEMPERATURES. Vancouver, University of British Columbia, Dissertation, 1996.
- [151] Fornather, J.: Brandverhalten von Holz unter besonderer Berücksichtigung stiftförmiger Verbindungsmittel – experimentelle und numerische Untersuchungen. Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Dissertation, 2003.
- [152] DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Holzbau. Ausgabe Dezember 2010.
- [153] DIN EN 408:2012-10: Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften.
- [154] Schmid, J.; Lange, D.; Sjöstrom, J.; Brandon, D.; Klippel, M.; Frangi, A. (2018) The Use of Furnace Tests to describe real Fires of Timber Structures; WCTE 2018, World conference on timber engineering
- [155] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz (2021) Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL). Fassung Oktober 2020. Ausgabe 4, 21.06.2021.
- [156] Kunkelmann, J.: Bewertung der Löschmittel Wasser und Wasser mit Zusätzen für den Feuerwehreinsatz, bei besonderer Berücksichtigung von Bränden in ausgebauten Dachgeschossen – Forschungsbericht Nr. 169. Forschungsstelle für Brandschutztechnik; Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, 2014, <https://edocs.tib.eu/files/e01fn17/788408151.pdf>.
- [157] Fuchs, P.: Untersuchung der Löschwirkung verschiedener Löschmittel und Löschmethoden bei unterschiedlichen Brandgütern, Brandschutzforschung der Bundesländer Heft 36, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an d. Univ. Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1979.
- [158] Schreiber, H.M.; Porst, P.: Löschmittel – Chemisch-physikalische Vorgänge beim Verbrennen und beim Löschen. Staatsverl. d. Deutschen Demokratischen Republik, Berlin, 1972.
- [159] Fuchs, P.: Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten. Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Forschungsbericht / Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis 5, Unterausschuss Feuerwehrangelegenheiten Heft 33, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an d. Univ. Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1978.
- [160] Bodamer, M.: Untersuchung der Löschwirkung verschiedener Löschmittel und Löschmethoden bei unterschiedlichen Brandgütern, Brandschutzforschung der Bundesländer Heft 56, Karlsruhe, 1985.

- [161] Siemens AG: Brandschutz-Wegweiser – Technischer Brandschutz und Brandschutzsysteme. Publicis Publishing, Erlangen, 2016.
- [162] Roy Crielaard: Self-extinguishment of Cross-Laminated Timber – Masterthesis. Delft University of Technology, 2015.
- [163] McGregor, C.: Contribution of cross laminated timber panels to room fires, 2013.
- [164] Osborne, L.; Dagenais, C.; Bénichou, N.: Preliminary CLT Fire Resistance Testing Report – Project No. 301006155 E-4794, Québec, 2012.
- [165] Fuchs, P.: Brand- und Löschversuche in natürlichem Maßstab, um geeignete Löschmittel oder Kombinationen von Löschmitteln zu finden, die den bei der derzeitigen Brandbekämpfung üblichen Wasserschaden verringern könnten. Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Forschungsbericht / Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis 5, Unterausschuss Feuerwehrangelegenheiten Heft 31, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an d. Univ. Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1977.
- [166] Brandschutz- und Hilfeleistungsgesetz des Landes Sachsen-Anhalt (Brandschutzgesetz - BrSchG), 2017.
- [167] DIN 14011:2018-01, Feuerwehrwesen - Begriffe.
- [168] DIN 4102-1:1998-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen.
- [169] Bauordnung für Berlin (BauO Bln) vom 12.10.2020.
- [170] Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (BauO NRW) vom 25.06.2021.
- [171] Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO) vom 18.07.2019.
- [172] Rasbash, D.J.; Drysdale, D.D.; Deepak, D.: Critical heat and mass transfer at pilot ignition and extinction of a material. In: Fire Safety Journal 10 (1986), Heft 1, S. 1-10. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(86\)90026-3](https://doi.org/10.1016/0379-7112(86)90026-3).
- [173] Drysdale, D.: An introduction to fire dynamics. Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
- [174] Hottel, H.C.: wood flammability under various conditions of irradiation – Report No. 195, 1942.
- [175] Emberley, R.; Putynska, C.G.; Bolanos, A. et al.: Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests. In: Fire Safety Journal 91 (2017), S. 327-335. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.024>.
- [176] Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR), 2016.
- [177] Kruse, D.; Dehne, M.: Brandschutzkonzepte für mehrgeschossige Gebäude und Aufstockungen – Holzbau Handbuch Reihe 3 Teil 5 Folge 1. Holzbau Deutschland - Institut e.V., Berlin, 2019.
- [178] Lippe, M.; Czepuck, K.; Möller, F. et al.: Kommentar mit Anwendungsempfehlungen und Praxisbeispielen zu der Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR, Muster-Systembödenrichtlinie MSysBöR, Muster einer Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen EltBauVO. Heizungs-Journal Verlags-GmbH, Winnenden/Württemberg, 2018.
- [179] Lippe, M.: Anforderungen an die Abschottung von Leitungsanlagen nach den Erleichterungen der MLAR 2005 / LAR / RbALei – Werkstatt+Montagepraxis Heft 5. Heizungs-Journal Verlags GmbH, 2008.
- [180] Musterbauordnung der Bauministerkonferenz, 1997.
- [181] Musterbauordnung der Bauministerkonferenz, 2002.
- [182] DIN 4102-4/A1:2018-11, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Änderung A1.
- [183] Schmid J, Klippel M, Fahrni R, Frangi A (2018) Brandeinwirkung auf Holzbauteile im Prüfofen und bei realen Bränden. Bautechnik 95:524–534. <https://doi.org/10.1002/bate.201800034>.

- [184] Muster-Lüftungsanlagen-Richtlinie (MLäAR), 2015.
- [185] DIN EN 15650:2010-09, Lüftung von Gebäuden - Brandschutzklappen; Deutsche Fassung EN 15650:2010.
- [186] Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.): Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) – Ausgabe 2020/1. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2021.
- [187] Wildeboer Bauteile GmbH: Anwenderhandbuch 5.0: FK90 Brandschutzklappen, 2019.
- [188] Wildeboer Bauteile GmbH: Anwenderhandbuch 5.3: FR90 Brandschutzklappen, 2019.
- [189] Trox GmbH: Leistungserklärung für FHRS-EU Brandschutzklappe DoP/FKRS/DE/003, 2018.
- [190] Bartholomäus GmbH: abZ/abG Z-41.3-686 für Absperrvorrichtungen gegen Feuer und Rauch in Lüftungsleitungen entsprechend DIN 18017-3 vom Typ AVR, 2018.
- [191] Air Fire Tech Brandschutzsysteme GmbH: Brandschutz für Lüftungsleitungen FSA & FSA-ST, 2019.
- [192] Meske-Dallal, S.: Grundsätzliche Regelungen zu Abständen bei Kabel- und Rohrabschottungen – DIBt Newsletter 05/2013. Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin, 2013.
- [193] DIN EN 1366-3:2009-07, Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen; Deutsche Fassung EN 1366-3:2009.
- [194] Deutsche Rockwool GmbH & Co. KG: abP P-3725/4130-MPA BS für Rockwool Rohrabschottung für nichtbrennbare Rohrleitungen, 2018.
- [195] W. u. J Derix GmbH & Co.: ETA-11/0189 für Derix X-LAM. Massives plattenförmiges Holzbaulement zur Verwendung als tragendes Bauteil in Bauwerken, 2019.
- [196] Hilti Entwicklungsgesellschaft mbH: abP P-MPA-E-17-101 für Brandschutzdichtmasse Hilti CFS-S ACR, 2018.
- [197] Hoppe, A.: Ergänzende Gutachten zu allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen, allgemeinen Bauartgenehmigungen oder allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen unzulässig! – Mitteilung des DIBt - Information 08/2018. Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin, 2018.
- [198] Thiele, C.; Lorenz, D.; Scherer, T. et al.: Leitungsdurchführungen im Holzbau – Abschlussbericht LeitHolz, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 3159. TU Kaiserslautern. Fraunhofer IRB Verlag, 2019.
- [199] DIN EN 206:2017-01, Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016
- [200] Li, X.; McGregor, C.; Medina, A. et al.: Real-scale fire tests on timber constructions, 2016.
- [201] Su, J.; Leroux, P.; Lafrance, P.-S. et al.: Fire testing of rooms with exposed wood surfaces in encapsulated mass timber construction. National Research Council of Canada. Construction, 2018.
- [202] Elsner, H.: Sand – auch in Deutschland bald knapp? – Commodity TopNews 56. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 2018.
- [203] Zehfuß, J.; Kampmeier, B.: Konstruktiver baulicher Brandschutz im Betonbau. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2018 – Bautenschutz, Brandschutz. Wilhelm Ernst & Sohn, Beton-Kalender Heft 107.2018. Ernst & Sohn a Wiley brand, Berlin, Germany, 2018, S. 437-509.
- [204] Musterbauordnung (MBO) der Bauministerkonferenz, 2020.
- [205] Niemann, C.: Brandschutztechnische Untersuchung von Holz-Beton-Verbunddecken im Naturbrand – Masterarbeit. Hochschule Magdeburg-Stendal, 2018.
- [206] Gressmann, H.-J.: Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz – Für Architekten, Bauingenieure und Feuerwehringenieure, Reihe Technik, expert Verl., Tübingen, 2019.

- [207] bvfa – Bundesverband Technischer Brandschutz e.V.: Löscherfolge von Sprinkleranlagen, <https://www.bvfa.de/33/themen/vorbildlicher-brandschutz/loescherfolge/> Zugriff am: 12.08.2021.
- [208] DIN EN 12259-14:2020-07, Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Bauteile für Sprinkler- und Sprühwasseranlagen - Teil 14: Sprinkler für die Anwendung im Wohnbereich; Deutsche Fassung EN 12259-14:2020.
- [209] DIN EN 16925:2019-03, Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Automatische Sprinkleranlagen für Wohnbereiche - Planung, Installation und Instandhaltung; Deutsche Fassung EN 16925:2018.
- [210] DIN EN 12845:2020-11, Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Automatische Sprinkleranlagen - Planung, Installation und Instandhaltung; Deutsche Fassung EN 12845:2015+A1:2019.
- [211] U.S. Fire Administration: Home Fire Protection, Residential Fire Sprinkler Systems Save Lives, FA-43. FEMA, 2008, <https://www.usfa.fema.gov/> Zugriff am: 18.08.2021.
- [212] C/AS2 Acceptable Solution for Buildings Other Than Risk Group SH: For New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection, Ministry of Business, Innovation & Employment, Hīkina Whakatutuki, 2019
- [213] DIN EN 1717:2011-08, Schutz des Trinkwassers vor Verunreinigungen in Trinkwasser-Installationen und allgemeine Anforderungen an Sicherungseinrichtungen zur Verhütung von Trinkwasserverunreinigungen durch Rückfließen; Deutsche Fassung EN 1717:2000; Technische Regel des DVGW.
- [214] DIN 1988-600: 2021-07, Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 600: Trinkwasser-Installationen in Verbindung mit Feuerlösch- und Brandschutzanlagen.
- [215] Kunkelmann, J.: Einsatz von Wassernebel-Löschanlagen zur Verhinderung der Ausbreitung von Bränden innerhalb von Treppenträumen mit Holztreppe(n) und/oder Holzverkleidungen in die darüberliegenden Wohnungen insbesondere bei Altbauten – Forschungsbericht Nr. 120. Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Brandschutzforschung der Bundesländer, Univ. Forschungsstelle für Brandschutz, Karlsruhe, 2000.
- [216] Kunkelmann, J.: Brand- und Löschversuche – Forschungsbericht Nr. 129, Brandschutzforschung der Bundesländer Heft 129, Univ. Forschungsstelle für Brandschutz, Karlsruhe, 2002.
- [217] Kunkelmann, J.: Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer "Brandgefahrenklasse" – Forschungsbericht Nr. 143. Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2007.
- [218] Kunkelmann, J.: Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Löschwassermengen in Abhängigkeit einer "Brandgefahrenklasse" Teil 2 – Forschungsbericht Nr. 144. Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2010.
- [219] Kaden, T.; Lager, M.; Busch, R. et al.: Abschlussbericht zum Projekt Entwicklung neuer architektonischer, tragwerks- und brandschutztechnischer Lösungen zur Realisierung von 10-12 geschossigen Wohngebäuden in Hybridbauweise mit dem Werkstoff Holz - Phase 1: Untersuchung der besonderen Planungsaspekte zur Erreichung der Genehmigungsfähigkeit eines Hochhauses in Holzbauweise – Az. 20969-25 DBU, 2014.
- [220] Frangi, A.; Fontana, M.: Fire Performance of Timber Structures under Natural Fire Conditions – FIRE SAFETY SCIENCE–PROCEEDINGS OF THE EIGHTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM, pp. 279-290. Institute of Structural Engineering IBK, Group for Steel, Timber and Composite Structures, Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich, Switzerland.
- [221] Peng, W.; Hu, L.; Yang, R. et al.: Full Scale Test on Fire Spread and Control of Wooden Buildings. In: Procedia Engineering 11 (2011), S. 355-359. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2011.04.669>.
- [222] Hox, K.: Branntest av massivtre – SPFR-rapport SPFR A15101, 2015.

- [223] NS-EN 12485:2017 Chemicals used for treatment of water intended for human consumption - Calcium carbonate, high-calcium lime, half-burnt dolomite, magnesium oxide, calcium magnesium carbonate and dolomitic lime - Test methods. Ausgabe 2017.
- [224] National Fire Protection Association:NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems. National Fire Protection Association, 2019.
- [225] VdS 2896:2013-07, VdS-Richtlinien für Sprinkleranlagen - Sprinkleranlagen für Wohnbereiche - Planung und Einbau.
- [226] VdS CEA 4001:2021-01, VdS-Richtlinien für Sprinkleranlagen - Planung und Einbau.
- [227] Viking Group Inc.: VK470 - Residential Pendent Sprinkler (K3.0), 2021, <https://www.viking-groupinc.com/vk470-residential-pendent-sprinkler-k30> Zugriff am: 12.08.2021.
- [228] Minimax Fire Protection:Residential Pendent Sprinkler (K3.0), 2021, <https://www.minimax-fire.com/products/61292/residential-pendent-sprinkler-k30> Zugriff am: 18.08.2021.
- [229] Hessische Bauordnung (HBO) vom 03.06.2020.
- [230] Landesbauordnung für das Land Schleswig-Holstein (LBO) vom 01.10.2019.
- [231] Bayerischen Bauordnung (BayBo) vom 25.05.2021.
- [232] Niedersächsische Bauordnung (NBauO) vom 10.11.2020.
- [233] Landesbauordnung Rheinland-Pfalz (LBauO) vom 03.02.2021.
- [234] Thüringer Bauordnung (ThürBO) vom 23.11.2020.
- [235] Bremische Landesbauordnung (BremLBO) vom 22.09.20.
- [236] Bauordnung des Landes Sachsen-Anhalt (BauO LSA) vom 18.11.2020.
- [237] Hamburgische Bauordnung (HBauO) vom 20.02.2020.
- [238] Bauprüfdienst 2018-3 Bauen in Massivholzbauweise. Bauprüfdienst 2018-3 Bauen in Massivholzbauweise.
- [239] Brandenburgische Bauordnung (BbgBO) vom 09.02.2021.
- [240] Landesbauordnung Mecklenburg-Vorpommern (LBauO M-V) vom 26.06.2021.
- [241] Landesbauordnung Saarland (LBO) vom 04.12.2019.
- [242] Sächsische Bauordnung (SächsBO) vom 12.04.2021.
- [243] Hosser, D.: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 2013.
- [244] DIN 14676-1:2018-12, Rauchwarnmelder für Wohnhäuser, Wohnungen und Räume mit wohnungsähnlicher Nutzung - 1: Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung.
- [245] DIN VDE V 0826-1 VDE V 0826-1:2019-12: Überwachungsanlagen - Teil 1: Gefahrenwarnanlagen (GWA) sowie Sicherheitstechnik in Smart Home Anwendungen für Wohnhäuser, Wohnungen und Räume mit wohnungsähnlicher Nutzung - Planung, Einbau, Betrieb, Instandhaltung, Geräte- und Systemanforderungen.
- [246] DIN VDE V 0826-2 VDE V 0826-2:2018-07: Überwachungsanlagen - Teil 2: Brandwarnanlagen (BWA) für Kindertagesstätten, Heime, Beherbergungsstätten und ähnliche Nutzungen – Projektierung, Aufbau und Betrieb.
- [247] Hausladen, G.; Giertlová, Z.; Nowak, W.: Holzbau der Zukunft – Teilprojekt 4: Verknüpfungen des anlagentechnischen Brandschutzes mit haustechnischen Installationen. Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Technische Universität München, 2007.
- [248] Magnusson, S.-E.; Rantatalo, T.: Risk assessment of timberframe multistorey apartment buildings - proposal for a comprehensive fire safety evaluation procedure – Report 7004, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, Sweden, 1998.
- [249] Karlsson, B.; Larsson, D.: Using a Delphi Panel for Developing a Fire Risk Index Method for Multistorey Apartment Buildings – Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, Report 3114, Lund, 2000.

- [250] DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020.
- [251] DIN EN 15978:2012-10, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011.
- [252] DIN EN 16485:2014-07, Rund- und Schnittholz – Umweltproduktdeklarationen - Produktkategorieeregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen; Deutsche Fassung EN 16485:2014.
- [253] Brockmann, T.; Figl, H.; Kerz, N. et al. (Hrsg.): ÖKOBAUDAT – Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Schriftenreihe Zukunft Bauen Band 09, Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, 2017.
- [254] DIN EN ISO 14025:2011-10, Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011.
- [255] Rauch, M.; Werther, N.; Kurzer, C.; Winter, S.; Kaufmann, H.; et al (2019) dataholz.de - Abschlussbericht zum Forschungsprojekt dataholz.de. München, 2019
- [256] Werther, N.; Kurzer, C.: Prüfbericht Brandprüfung von einem Decken- und Wandelement in Anlehnung an DIN EN 1363-4 zum Vergleich unterschiedlicher Bauteil- und Elementfügen im Holzbau bei jeweils einseitiger Brandbeanspruchung nach DIN EN 1363 zur Ermittlung des Feuerwiderstandes in Verbindung mit den Dokumentationskriterien zum Rauchdurchtritt nach DIN 4102-2. München, 2020
- [257] Werther, N.; Suttner, E.; Dumler, P.; Kurzer, C.; Winter, S.: DESIGN PRINCIPLES FOR FIRE SAFE DETAILING IN TIMBER STRUCTURES. WCTE 2020/21, 2020
- [258] Dederich, L.; Sudhoff, P.; Kampmeier, B.; Rütter, N.; Winter, S.; Suttner, E.; Werther, N.: HolzbauRLBW - Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Rottenburg, 2020
- [259] Holborn, P.; Nolan, P.; Golt, J.: An analysis of fire sizes, fire growth rates and times between events using data from fire investigations. Fire Safety Journal 39. 2004
- [260] Manes, M.; Rush, D.: Probabilistic Fire Risk Assessment In Buildings Using Event Tree Analysis Based on UK And USA Fire Statistics. Interflam 2019. Proceedings of the fifteenth international conference. London, 2019
- [261] Fu, I.; Rickard, I.; Hopkin, D.; Spearpoint, M.: Application of Python Programming Language in Structural Fire Engineering - Monte Carlo Simulation. Interflam 2019. Proceedings of the fifteenth international conference. London, 2019.
- [262] Brandon, D. et al. (2021): Fire Safe implementation of visible mass timber in tall buildings - compartment fire testing. RISE Fire Research Report 2020:94.
- [263] Dederich, L.; Rütter, N.; Sudhoff, P.; Kampmeier, B.; Suttner, E. Werther, N.; Winter, S. (2021): Leitdetails für Bauteilanschlüsse in den Gebäudeklassen 4 und 5 (Schriftenreihe R3-T5-F2 holzbau handbuch des Informationsdienst Holz). ISSN 0466-2114.
- [264] FNR (2021) Schlussbericht zum Vorhaben Verbundvorhaben: Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo-Dämmstoffe)
- [265] Linges, A. (2003) Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau. Dissertation. Technische Universität München
- [266] Ehrlenspiel, R.; Seemann, G.; Wegener, G. (2000): Forschungsvorhaben: Vergleichende Betrachtung europäischer Bauprodukten-Normen mit nationalen Bestimmungen: Teilprojekt E – 92/70c: Temperaturbeanspruchung von Bauholz. Abschlussbericht (Studie) zum Vorhaben. Institut für Holzforschung der Technischen Universität München
- [267] Lache, M. (1992): Untersuchungen zur Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz und zur Feuerwiderstandsdauer biegebeanspruchter Brettschichtholzträger. Dissertation an der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München

- [268] Seemann, M. (2000): Abbrandgeschwindigkeiten von Holz und Holzwerkstoffen. Diplomarbeit am Institut für Holzforschung der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität München
- [269] Tran, H. C.; White, R. H. (1992): Burning Rate of Solid Wood Measured in a Heat Release Rate Calorimeter. *Fire and Materials* 16: 197-206
- [270] Schmiermund, T. (2019): Das Chemiewissen für die Feuerwehr. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56606-0>
- [271] Brandon, D.; et. al. (2016) Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 1 - Literature Review.
- [272] Hakkarainen, T. (2002): Post-flashover fires in light and heavy timber construction compartments. *Journal of Fire Sciences* 20. S. 133–175.
- [273] Chen, Z. (2008): Design fires for motels and hotels. Carleton University. Ottawa, Ontario, Canada.
- [274] Lennon, T.; Hopkin, D.; El-Rimawi, J.; Silberschmidt, V. (2010): Large scale natural fire tests on protected engineered timber floor systems. *Fire Safety Journal* 45. S. 168–182.
- [275] Li, X.; Zhang, X.; Hadjisophocleous, G.; McGregor, C. J. (2014): Experimental study of combustible and non-combustible construction in a natural fire. *Fire Technology* 51. S. 1447–1474.
- [276] Hevia, M.; Ramón, A. (2015): Fire resistance of partially protected cross-laminated timber rooms. Carleton University. Ottawa, Ontario, Canada.
- [277] Su, J. Z.; Muradori, S. (2015): Fire demonstrations: cross laminated timber stair/elevator shaft. Client Report: A1-006010.1. National Research Council Canada. Ottawa, Ontario, Canada.
- [278] Kolaitis, D. I.; Asimakopoulou, E. K.; Founti, M. A. (2011): Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: a large scale compartment fire test. *Construction and Building Materials* 73. S. 168–182.
- [279] Janssens, M. (2015): Full-scale test in a furnished living room to evaluate the fire performance of protected cross-laminated and nail laminated timber construction. Final Report. Project No.: 01.21428.01.001. Southwest Research Institute. San Antonio, Texas, USA.
- [280] Janssens, M. (2017): Development of a fire performance assessment methodology for qualifying cross-laminated timber adhesives.
- [281] Just, A.; et. Al. (2018): CLT compartment fire test. World Conference on Timber Engineering.
- [282] Su, J.; et. al. (2018): Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings – Phase 2: Task 2 & 3 – Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests.
- [283] Peter, M. (2003): Numerische Tragfähigkeitsermittlung von Holzbauteilen im Brandfall unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens. Berlin: Fraunhofer IRB Verlag, 2003

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschied zwischen hochfeuerhemmend und F 60 B [57].....	8
Abbildung 2: Übersicht zur bauordnungsrechtlichen Zulässigkeit von Holzbau in Gebäudeklasse 4 und 5 Stand November 2021	10
Abbildung 3: Anteil der Bauweisen nach Gebäudeklasse in Prozent	13
Abbildung 4: Ausbildung der Brandschutzbekleidung im mehrgeschossigen Holzbau	14
Abbildung 5: Übersicht diverser experimenteller Brandraumtemperaturen von Raumbränden mit teilweise ungeschützten Holzflächen	15
Abbildung 6: Bilanz der Wärme- und Massenströme (Ursprungsgrafik aus [128]	16
Abbildung 7: Vergleich der Brandraumtemperaturen unterschiedlicher Brandmodelle mit experimentellen Daten	20
Abbildung 8: Gegenüberstellung der repräsentativen Naturbrandkurven mit experimentellen Raumbrandkurven	22
Abbildung 9: Abminderungsfaktor der Festigkeiten von Nadelholz nach [42].....	28
Abbildung 10: Abminderungsfaktor des E-Moduls von Nadelholz nach [42]	28
Abbildung 11: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Temperatur bei Vollholz und Schichtholz nach [139].....	29
Abbildung 12: Druckfestigkeit als Funktion der Temperatur nach [140].....	30
Abbildung 13: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [137].....	31
Abbildung 14: Vergleich der bezogenen Druckfestigkeit für das thermomechanische Verhalten der Druckfestigkeit.....	32
Abbildung 15: Prozentuale Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [148]	33
Abbildung 16: Prozentuale Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur in Bezug auf 20 °C nach [148]	33
Abbildung 17: Zugfestigkeit parallel zur Faser in Abhängigkeit der Materialtemperatur bei Kiefernholz nach [138]	34
Abbildung 18: Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Materialtemperatur nach [149].....	35
Abbildung 19: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [137].....	35
Abbildung 20: Übersicht der durchschnittlich gemessenen Zugfestigkeiten der einzelnen Probengruppen nach [150]	36
Abbildung 21: Gegenüberstellung der prozentualen temperaturabhängigen Zugfestigkeiten bezogen auf die Referenztemperatur von 20 °C nach [148]	37
Abbildung 22: Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Temperatur bei Kiefernholz, Schichthölzern und Pressschichtholz nach [138]	38
Abbildung 23: Biegefestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur nach [137].....	39
Abbildung 24: Darstellung der prozentualen temperaturabhängigen Biegefestigkeit aus der Literatur nach [148].....	39
Abbildung 25: Beispiel von Leitungsdurchführungen durch eine feuerhemmende Decke in Brettstapel-/Brettschichtbauweise nach den „Erleichterungen der MLAR, Abschnitt 4.3.2“ mit passgenauer Kernbohrung oder Leitungen mit	

Restverschluss durch eine Mineralwollstopfung, Schmelzpunkt $\geq 1000\text{ °C}$ und einem im Brandfall aufschäumenden Baustoff [178].....	43
Abbildung 26: Brandschutzklappe (Bild: Wildeboer Bauteile GmbH)	44
Abbildung 27: Einbau in Wände und Decken in Holzmassivbauweise mit Einbaurahmen und Holzrahmenbauweise mit Mörtelschott (Bild: Wildeboer Bauteile GmbH [187], [188]).....	44
Abbildung 28: Darstellung der umlaufenden Brandschutzbekleidung [177]	45
Abbildung 29: R 90 Rohrabschottung für nichtbrennbare Rohrleitungen in Brettsper Holzdecke (links) [194] und in Holzrahmenwand (rechts) [196].....	46
Abbildung 30: Beispiel von Leitungsabschottungen durch eine feuerbeständig ertüchtigte Holzbalkendecke mit Auslaibung und innenliegenden klassifizierten Abschottungen inkl. Haltleiste [178]	47
Abbildung 31: Sicherheitsabstand einer Verteilungsdichte M zum Grenzzustand [28]	48
Abbildung 32: Verteilungsdichten von Widerstand R und Einwirkung S [28].....	48
Abbildung 33: Bilanz der Wärme- und Massenströme (Ursprungsgrafik aus [128]).....	52
Abbildung 34: Darstellung des Room Corner Testraum nach DIN EN 14390 [33] bzw. ISO 9705-1 [34].....	53
Abbildung 35: Darstellung der mobilen Brandquelle sowie der möglichen Position im Versuch.....	54
Abbildung 36: Links: Vordere Ansicht des Room-Corner Versuchstandes; rechts Grundriss des Room-Corner Versuchstandes	55
Abbildung 37: Positionen der Temperaturmessbäume im Grundriss des Room-Corner Versuchstandes	58
Abbildung 38: links: Bidirektionale Sonden und Temperaturmessstellen am Messbaum 3; rechts: Temperaturmessstellen am Messbaum 2	58
Abbildung 39: Versuchsaufbau RC_V2, links: Vor dem Versuch; rechts In der stationären Brandphase (26. Versuchsminute)	59
Abbildung 40: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und Wärmefreisetzungsrate (HRR) bei unterschiedlicher Art der strukturellen Brandlast.....	60
Abbildung 41: Darstellung der beiden untersuchten Ventilationsöffnungen ($O = 0,049\text{ m}^{0,5}$ bzw. $0,020\text{ m}^{0,5}$)	61
Abbildung 42: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) bei unterschiedlichen Ventilationsbedingungen	61
Abbildung 43: Vergleich der Strömungsraten im oberen und unteren Bereich der Öffnung (Messbaum 3) für RC_V11 ($O = 0,049\text{ m}^{0,5}$) und RC_V12 ($O = 0,020\text{ m}^{0,5}$).....	62
Abbildung 44: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) für den Eintritt des zweiten Flashover.....	63
Abbildung 45: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) bei unterschiedlichen Brandquellen.....	64
Abbildung 46: Brandraum mit nur einer brennbaren Wand im Vollbrand zu Minute 11 (links) und selbstverloschener Brand zu Minute 38 (rechts) im Room-Corner-Test.....	65

Abbildung 47: Löschwasserverbrauch in RC_V5	66
Abbildung 48: Löschwasserverbrauch in RC_V6	66
Abbildung 49: Löschwasserverbrauch in RC_V7	66
Abbildung 50: Löschwasserverbrauch in RC_V16	66
Abbildung 51: Vergleich der Raumtemperatur (Messbaum 2, 2100 mm Höhe) und der Wärmefreisetzungsrate (HRR) beim Versagen der Brandschutzbekleidung	67
Abbildung 52 Darstellung der Prüfkörper (Sprengisometrie) für eindimensionale Brandbeanspruchung und Anordnung der Thermoelemente	69
Abbildung 53 Darstellung der Prüfkörper für dreiseitige Brandbeanspruchung und Anordnung der Thermoelemente (F= die drei dem Feuer zugewandten Seiten)	70
Abbildung 54 Die drei Soll-Brandofen-Temperaturverläufe der Brandversuche	70
Abbildung 55 Ansicht und Schnitt Brandofengeometrie mit Position der Thermometer.....	71
Abbildung 56 Prüfkörper Vollholz Eiche (v.l.n.r.) Holzkohleschicht, gebürstet, 3D-Scan.....	71
Abbildung 57 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler ETK- Beanspruchung zur 30. Minute	72
Abbildung 58 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler ETK- Beanspruchung zur 90. Minute	72
Abbildung 59 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche im Vergleich zur ETK beim Versuch Furnierschichtholz Buche – Temperaturdifferenz	74
Abbildung 60 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Mantelthermoelement auf der Prüfkörperoberfläche und für das Mantelthermoelement im Brandraum Versuch Furnierschichtholz Buche – Temperatur-Zeit Differenz beider Kurven.....	75
Abbildung 61 Integral unter Einheitstemperatur-Zeitkurve zur Ermittlung $\Delta TETK$	76
Abbildung 62 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger ETK-Beanspruchung zur 30. Minute	77
Abbildung 63 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger ETK-Beanspruchung zur 60. Minute	77
Abbildung 64 Verlauf von Naturbrand_1 mit Wendepunkten.....	78
Abbildung 65 Temperatur-Zeit-Diagramm für das Platethermoelement im Vergleich zum Naturbrand_1-Verlauf beim Versuch Brettschichtholz Buche – Temperaturdifferenz.....	78
Abbildung 66 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB1- Beanspruchung zur 5. Minute	79
Abbildung 67 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB1- Beanspruchung zur 44. Minute	79
Abbildung 68 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB1- Beanspruchung zur 120. Minute	80
Abbildung 69 Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger NB1-Beanspruchung zur 5. Minute	81

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Abbildung 70	Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger NB1-Beanspruchung zur 44. Minute	81
Abbildung 71	Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter dreiseitiger NB1-Beanspruchung zur 90. Minute	82
Abbildung 72	Verlauf von Naturbrand_2 mit Wendepunkten	83
Abbildung 73	Temperatur-Zeit-Diagramm für das Platethermoelement im Vergleich zum Naturbrand_2-Verlauf beim Versuch Vollholz Eiche – Temperaturdifferenz.....	83
Abbildung 74	Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB2-Beanspruchung zur 89. Minute.....	84
Abbildung 75	Temperaturverlauf in den Prüfkörpern unter eindimensionaler NB2-Beanspruchung zur 100. Minute.....	84
Abbildung 76:	Links: Versuchsaufbau unbeflammte Seite; rechts: Versuchsaufbau beflammte Seite jeweils während des Versuches	86
Abbildung 77:	Darstellung des kleinskaligen Versuchskörpers	87
Abbildung 78:	Technische Zeichnung eines Versuchskörpers	88
Abbildung 79:	Position der Thermoelemente und Indikator-Verbindungsmitel.....	89
Abbildung 80:	Temperaturentwicklung für unterschiedliche Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß ETK	91
Abbildung 81:	Vergleich von Verkohlungsstufen bei unterschiedlicher Trägerplatte nach ETK-Brandbeanspruchung	92
Abbildung 82:	Temperaturentwicklung für unterschiedliche Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1	93
Abbildung 83:	Vergleich der Verkohlungsstufen bei unterschiedlichen Bekleidungsstärken und Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1	93
Abbildung 84:	Temperaturentwicklung für unterschiedliche Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_2	94
Abbildung 85:	Vergleich von Verkohlungsstufen bei unterschiedlichen Bekleidungsstärken und Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_2	94
Abbildung 86:	Temperaturentwicklung für 2 x 18 mm Typ DF Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1 sowie ETK.....	95
Abbildung 87:	Vergleich von Verkohlungsstufen für 2 x 18 mm Typ DF Bekleidungsstärken in der Grenzschicht bei Brandbeanspruchung gemäß Naturbrand_1 sowie ETK	95
Abbildung 88:	Vergleich der Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen GKF und GF	96
Abbildung 89:	Vergleich der Rissbildung unter ETK Beanspruchung kurz nach Beendigung der Beflammung	96
Abbildung 90:	Vergleich der Temperaturentwicklung auf der brandabgewandten Seite an der Indikator-Schraube und der Thermoelemente auf der unbeflammten Seite	97
Abbildung 91:	Verkohlungsstufen unterschiedlicher Versuchskörper.....	98
Abbildung 92:	Vergleich der Durchwärmung (Grenzschichttemperatur) bei unterschiedlichen Trägerplatten und ggf. Hinterlegung mit MiWo für 2 x 18 mm Bekleidungen unter ETK Beanspruchung	99

Abbildung 93: Vergleich der Verkohlungsbilder der unterschiedlichen Trägerplatten unter ETK Beanspruchung	99
Abbildung 94: Versuchsaufbau (links) und Durchführung (rechts) ungeschützter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter	101
Abbildung 95: Versuchsverlauf eines ungeschützter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter	102
Abbildung 96: Temperaturverlauf der offenen Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter, Messstellen 15 mm und 25 mm im Probekörper, verschiedene Wärmestromdichte bis jeweils 70 M.-% Holzprobe, anschließend keinen weiteren, reduzierten Wärmestrom.....	102
Abbildung 97: Probekörpermasse nach dem Abschalten (0 kW/m ²), bzw. Reduzieren der Wärmestromdichte	103
Abbildung 98: Versuchsaufbau (links) und Durchführung (rechts) bekleideter Holzprobekörper im Cone-Kalorimeter	103
Abbildung 99: Schematischer Aufbau der Biegeprüfung nach DIN EN 408	105
Abbildung 100: Schematischer Aufbau der Druckprüfung nach DIN EN 408	105
Abbildung 101: Aufbau des Prüfstandes mit der Thermobox.....	106
Abbildung 102: Darstellung der gemessenen Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur	107
Abbildung 103: Darstellung der gemessenen Druckfestigkeit für die wiederabgekühlten Probekörper in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung.....	107
Abbildung 104: Darstellung der gemessenen Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Temperatur	108
Abbildung 105: Darstellung der gemessenen Biegefestigkeit für die wiederabgekühlten Probekörper in Abhängigkeit der Temperaturbeanspruchung.....	109
Abbildung 106: Graphitelektroden zur planmäßigen Lichtbogenerzeugung [95]	110
Abbildung 107: Einzelkomponenten des grundlegenden Schaltkreises zur Versuchsdurchführung [95].....	110
Abbildung 108: Schaltkreis zur Lichtbogenerzeugung mit einem Leiter [95]	112
Abbildung 109: Schaltkreis zur Lichtbogenerzeugung mit einer dreiadrigen Installationsleitung [95]	112
Abbildung 110: Anordnung der Graphitzugabe zwischen den beiden Kontaktstellen des Außenleiters [95].....	113
Abbildung 111: Elektrische Installationsleitungen nach Beendigung des Versuches [95].....	114
Abbildung 112: Anordnung der Prüfkörper (v.l.n.r.): Prüfkörper waagrecht – Lichtbogenerzeugung an der Oberseite des Prüfkörpers, Prüfkörper senkrecht – Lichtbogenerzeugung parallel zum Prüfkörper; Prüfkörper waagrecht – Lichtbogenerzeugung an der Unterseite des Prüfkörpers [95]	114
Abbildung 113: Prüfkörper nach Versuch: (v.l.n.r.): KVH, OSB bei Anordnung senkrecht und Dämmung 1 und 2 [95]	114
Abbildung 114: Versuchsanordnung senkrecht mit einer PVC-Elektroinstallation [95].....	115
Abbildung 115: Lichtbogen bei der senkrechten Anordnung des PVC-Kabels [95].....	115
Abbildung 116: Prüfkörper nach Lichtbogenerzeugung (oben waagrechte, unten senkrechte Anordnung) [95]	116

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Abbildung 117: Aufbau der Holztafelbauwand: (1) Gipskartonplatte 12,5 mm, (2) OSB 15 mm, (3) KVH 60 x 120 mm, (4) Mineralwolle Dämmstoff [95].....	116
Abbildung 118: Prüfkörper mit mittig verlegtem PVC-Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [95].....	117
Abbildung 119 : Prüfkörper mit am Ständer verlegtem PVC-Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [95].....	117
Abbildung 120: Prüfkörper mit am Ständer verlegtem halogenfreien Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [95].....	118
Abbildung 121: Versuchsaufbau der HBV-Deckenbauteile im Bauteilofen	120
Abbildung 122: Temperaturmessungen der Brandversuche mit HBV-Deckenbauteilen	120
Abbildung 123: Unter-/Holzseite des Probekörpers vor (links) und unmittelbar nach dem Brandversuch (rechts)	121
Abbildung 124: Decke V1 nach dem Brandversuch und schematische Darstellung der Messpunkte für die Restholzdicke/Holzabbrand	122
Abbildung 125: Querschnitt des Versuchsaufbaus mit Darstellung der Ventilationsbedingungen	123
Abbildung 126: Draufsicht auf den Versuchsaufbau mit Bezeichnung der Wände und Blickrichtung der Brandraumkamera	126
Abbildung 127: Ansicht eines Versuchsaufbaues im Brandofen	126
Abbildung 128: Darstellung der unterschiedlichen Anschlussdetails.....	128
Abbildung 129: Position der Brandraumelemente zur Temperaturlaufzeichnung	128
Abbildung 130: Position der Thermoelemente vom Typ K in den Wänden (Ansicht von beflammt Seite)	129
Abbildung 131: Position der Thermoelemente vom Typ K in den Wand-Wand Anschlüssen (Ansicht von beflammt Seite)	129
Abbildung 132: Position der Thermoelemente vom Typ K in den Wand-Decke Anschlüssen (Ansicht von beflammt Seite)	130
Abbildung 133: Verlauf der Brandraumtemperaturen der 1. Serie Großbrandversuche	131
Abbildung 134: Vergleich der Brandraumtemperaturen unter ETK- bzw. Naturbrand_1-Beanspruchung.....	132
Abbildung 135: Gegenüberstellung der Grenzschichttemperatur und Verkohlungsbild bei 2 x 18 mm GF	133
Abbildung 136: Gegenüberstellung der Grenzschichttemperatur und Verkohlungsbild bei 2 x 15 mm GF	133
Abbildung 137: Vergleich zur Skalierbarkeit der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Maßstäbe für 2 x 18 mm Brandschutzbekleidungen unter 90minütiger ETK-Beanspruchung.....	134
Abbildung 138: Vergleich zur Skalierbarkeit der Versuchsergebnisse unterschiedlicher Maßstäbe für 2 x 15 mm Brandschutzbekleidungen unter 90minütiger ETK-Beanspruchung.....	134

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Abbildung 139: Verlauf Brandraumtemperatur (K15/16_V06_24%) und Temperatur in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holzkonstruktion bei 2 x 18 mm Gipsplatten von V06.....	136
Abbildung 140: Aufnahme des Brandraumes kurz nach Abnehmen der Deckenelemente (links) beflamte Deckenseite (rechts) von V06	136
Abbildung 141: Temperaturentwicklung in der Brettsperrholzdecke	137
Abbildung 142: Verlauf Brandraumtemperatur (K15/16_V07_24%) und Temperatur in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holzkonstruktion bei 2 x 15 mm bzw. 2 x 18 mm Gipsplatten von V07	137
Abbildung 143: Vergleich Brandraumtemperaturen (K15/16_V05_24%) und Grenzschichttemperaturen unterschiedlicher Bekleidungsicken für Belegversuch V3 und Ofenversuch V05.....	138
Abbildung 144: Verkohlungsbilder der anfänglich geschützten Bauteile in V05	139
Abbildung 145: Brandraumbild zum Zeitpunkt nach dem Abstellen der Brenner sowie vor Beginn der Löschmaßnahmen.....	140
Abbildung 146: Verlauf der Brandraumtemperaturen der 2. Serie Großbrandversuche.....	140
Abbildung 147: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V01.....	142
Abbildung 148: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V02.....	142
Abbildung 149: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V03.....	143
Abbildung 150: Brandraumtemperaturen und Löschwasserdurchfluss (rot) im Großbrandversuch V04.....	143
Abbildung 151: Temperaturzeitkurven K15/16 V05 – Holz-Beton-Verbunddecke	144
Abbildung 152: Auflager Abzugsseitig.....	144
Abbildung 153: Auflager Brennerseite.....	144
Abbildung 154: Auflager Abzugsseite geöffnet	145
Abbildung 155: Auflager Brennerseite geöffnet.....	145
Abbildung 156: Feldmitte	145
Abbildung 157: Koppelbrett freigelegt	145
Abbildung 158: seitliches Auflager	145
Abbildung 159: Exemplarischer Vergleich des Massenverlustes für Holz unterschiedlicher Literatur	147
Abbildung 160: Exemplarischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeit für Holz unterschiedlicher Literatur	148
Abbildung 161: Exemplarischer Vergleich der spez. Wärmekapazität für Holz unterschiedlicher Literatur.....	148
Abbildung 162: Exemplarischer Vergleich des Massenverlustes für Gipsplatten unterschiedlicher Literatur.....	149

Abbildung 163: Exemplarischer Vergleich der Wärmeleitfähigkeit für Gipsplatten unterschiedlicher Literatur	149
Abbildung 164: Exemplarischer Vergleich der spez. Wärmekapazität für Gipsplatten unterschiedlicher Literatur	150
Abbildung 165: Darstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufes der ausgewählten Kennwerte vergleichend zu Versuchsergebnissen von ungeschütztem Holz unter ETK-Beanspruchung.....	152
Abbildung 166: Darstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufes der ausgewählten Kennwerte vergleichend zu Versuchsergebnissen von 2 x 18 mm Gipsplatten unter ETK-Beanspruchung	153
Abbildung 167: Darstellung des Temperatur-Zeit-Verlaufes der ausgewählten Kennwerte im Vergleich zu Versuchsergebnissen bei ungeschützten Holzprobekörpern unter Naturbrand_1-Beanspruchung	154
Abbildung 168: Beispiel für die Temperaturzeitverläufe der Wandaufbauten aus den Naturbrandversuchen nach Su [127].....	156
Abbildung 169: Summe der Brandraumtemperaturen bis zum Erreichen von 300°C auf der Bekleidungsrückseite.....	157
Abbildung 170: Summe des Energieäquivalents bis zum Erreichen von 300°C auf der Bekleidungsrückseite.....	158
Abbildung 171: Werkfeuerwehr TUM Garching bei der Brandbekämpfung.....	159
Abbildung 172: Perspektiven V0, V1, V2	162
Abbildung 173: Perspektiven V3, V4.....	162
Abbildung 174: Raummodell V0, V1, V2.....	162
Abbildung 175: Raummodell V3.....	162
Abbildung 176: Grundriss mit Anordnung der neun Holzkrippen und der vier Messbäume für V0, V1, V2.....	162
Abbildung 177: Grundriss mit Anordnung der 18 Holzkrippen und der sechs Messbäume für V3.....	162
Abbildung 178: Raummodell V4.....	163
Abbildung 179: Grundriss mit Anordnung der 18 Holzkrippen und der sechs Messbäume für V4.....	163
Abbildung 180: Darstellung der Varianten der Elementstößen der Brettschichtholzdecke	165
Abbildung 181: Darstellung der mobilen Brandlast durch Holzkrippen.....	166
Abbildung 182: Verteilung der Brandlast bzw. Holzkrippen über die Brandraumgrundfläche (Maße in cm).....	166
Abbildung 183: Brandraum V0	167
Abbildung 184: 40. Minute V0: Beginn der Abkühlphase.....	168
Abbildung 185: 45. Minute V0: Abkühlphase	168
Abbildung 186: 60. Minute V0: nur Krippen hinten im Brandraum brennen	168
Abbildung 187: 103. Minute V0: Holzkrippen nur noch Glutreste	168
Abbildung 188: 115. Minute V0: Abfallen der oberen Lage der Bekleidung der Decke.....	168

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Abbildung 189: Temperatur-Zeit-Verläufe V0 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)	169
Abbildung 190: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V1)	169
Abbildung 191: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V1	171
Abbildung 192: 45. Minute V1: Beginn der Abkühlphase	172
Abbildung 193: 60. Minute V1: Abkühlphase	172
Abbildung 194: 92. Minute V1: kurz vor dem Löschangriff	172
Abbildung 195: 93. Minute: Löschanfang	172
Abbildung 196: 93. Minute V1: Löschanfang	172
Abbildung 197: 94. Minute V1: 40 Sek nach Löschanfang V1	172
Abbildung 198: 95. Minute V1: Flammen gelöscht	173
Abbildung 199: 100. Minute V1: Löschkräfte betreten den Brandraum	173
Abbildung 200: 108. Minute V1: Brand unter Kontrolle	173
Abbildung 201: 142. Minute V1: Ende der Löscharbeiten	173
Abbildung 202: Nachkontrolle V1: Fugenbrand	173
Abbildung 203: Nachkontrolle V1: Fugenbrand	173
Abbildung 204: Temperatur-Zeit-Verläufe V1 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)	174
Abbildung 205: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V2)	175
Abbildung 206: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V2	177
Abbildung 207: 45. Minute V2: Beginn der Abkühlphase	177
Abbildung 208: 60. Minute V2: Abkühlphase	177
Abbildung 209: 92. Minute V2: kurz vor dem Löschangriff	177
Abbildung 210: 92. Minute V2: Löschanfang	177
Abbildung 211: 94. Minute V2: Flammen gelöscht	178
Abbildung 212: 98. Minute V2: Löschkräfte betreten den Brandraum	178
Abbildung 213: 133. Minute V2: Ende der Nachlöscharbeiten und Öffnung zur Entrauchung in Wand 2	178
Abbildung 214: ca. 3 h nach Versuchsende V2: Glimmen am Holzstände der Öffnungslaibung	178
Abbildung 215: ca. 5 h nach Versuchsende V2: Glimmen des Brettsperrholzes Wand 1	178
Abbildung 216: Temperatur-Zeit-Verläufe V2 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)	179
Abbildung 217: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V3)	180
Abbildung 218: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V3	182
Abbildung 219: 45. Minute V3: Beginn der Abkühlphase	183
Abbildung 220: 60. Minute V3: Abkühlphase	183
Abbildung 221: 150. Minute V3: kurz vor dem Löschangriff	183

Abbildung 222: 150. Minute V3: Löschbeginn.....	183
Abbildung 223: 154. Minute V3: Öffnen des Sturzes mit Einreißhaken	183
Abbildung 224: 158. Minute V3: Löschkkräfte betreten den Brandraum	183
Abbildung 225: 172. Minute V3: Brand unter Kontrolle	183
Abbildung 226: 180. Minute V3: Öffnungen zur Entrauchung in Wand 2	183
Abbildung 227: 197. Minute V3: Ende der Löscharbeiten.....	184
Abbildung 228: Nachkontrolle V3: Löschen des Fassadenschildes an der Vorderseite.....	184
Abbildung 229: Nachkontrolle V3: Einbrand in die Fuge	184
Abbildung 230: Nachkontrolle V3: Einbrand in Fuge Decke/Wand 3.....	184
Abbildung 231: Foto ca. 2 h nach Versuchsende V3: Glimmen des Ständers der Laibung der Brandraumöffnung	184
Abbildung 232: Temperatur-Zeit-Verläufe V3 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)	185
Abbildung 233: 360° Aufnahme aus dem Inneren des Brandraumes (V4)	186
Abbildung 234: Anordnung der linearen Bauteile (zwei Stützen und Unterzug), der sechs Messbäume und der 18 Holzkrippen bei V4.....	186
Abbildung 235: Löschwasserdurchfluss im Belegversuch V4.....	188
Abbildung 236: 50. Minute V4: Beginn der Abkühlphase.....	189
Abbildung 237: 63. Minute V4: kurz vor dem Löschangriff	189
Abbildung 238: 65. Minute V4: Löschbeginn.....	189
Abbildung 239: 80. Minute V4: Brand unter Kontrolle	189
Abbildung 240: Temperatur-Zeit-Verläufe V4 im Brandraum in verschiedenen Höhen (Mittelwert)	189
Abbildung 241: Vergleich der Brandraumtemperaturen der Belegversuche in 2300 mm Höhe	191
Abbildung 242: Vergleich der Wärmefreisetzungsraten der Belegversuche für den Boden (mobile Brandlast).....	195
Abbildung 243: Vergleich der Wärmefreisetzungsraten der Belegversuche für das Gebäude (strukturelle Brandlast).....	196
Abbildung 244: Vergleich der Temperaturen vor der Fassade der Versuche V0 und V1 in verschiedenen Höhen.....	197
Abbildung 245: Aufnahmen während der Versuchsdurchführung (stationäre Brandphase) von V0 (links) und V1 (rechts)	197
Abbildung 246: Vergleich der Temperaturen vor der Fassade der Versuche V3 und V4 in verschiedenen Höhen.....	198
Abbildung 247: Vorzeichendefinition der Geschwindigkeiten für die Strömungsrichtung in der Öffnung der Brandräume	199
Abbildung 248: Linkes und rechtes Profil der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung der Brandräume bei der 12. und 40. Minute Versuchsdauer	200

Abbildung 249: Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassade in 1 m Höhe über der Brandraumöffnung für V0 / V1 / V2 (links) und Darstellung der Vorzeichendefinition der Geschwindigkeit für die Strömungsrichtung (rechts)	201
Abbildung 250: Strömungsgeschwindigkeiten an der Fassade in 2 m Höhe über der Brandraumöffnung für V0 / V1 / V2 (links) und Darstellung der Vorzeichendefinition der Geschwindigkeit für die Strömungsrichtung (rechts)	202
Abbildung 251: Schematische Darstellung der Temperaturmesspunkte in den Wänden	203
Abbildung 252: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion für V0	203
Abbildung 253: 360° Drohnenaufnahme der Massivholzoberfläche nach Demontage der Brandschutzbekleidung für V0	204
Abbildung 254: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Massivholzkonstruktion für V1	204
Abbildung 255: 360° Drohnenaufnahme der Massivholzoberfläche nach Demontage der Brandschutzbekleidung für V1	205
Abbildung 256: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V2	205
Abbildung 257: 360° Drohnenaufnahme der Bauteiloberflächen nach Demontage der Brandschutzbekleidung und Gefachdämmung für V2	206
Abbildung 258: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V3	206
Abbildung 259: Belegversuch V3 kurz vor Beginn der Löschmaßnahmen	207
Abbildung 260: Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen Brandschutzbekleidung und Holztafelkonstruktion für V4	208
Abbildung 261: Versuch V4 kurz vor Beginn der Löschmaßnahmen	208
Abbildung 262: Systematik zur konstruktiven Ausführung von Anschlüssen für Element- und Bauteilfügungen nach [65]	209
Abbildung 263: Vergleich Temperatur-Zeit-Verläufe V0, V1, V2 im Brandraum in 230 cm Höhe (Mittelwert)	210
Abbildung 264: Vergleich der Temperatur-Zeit-Verläufe in der Mitte des Fassadenschildes in den Höhe 1 m und 5 m über die Brandraumöffnung für die Versuche V0, V1, V2	211
Abbildung 265: Schematischer Versuchsaufbau der Brandversuche in [75]	213
Abbildung 266: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate der Brandversuche in [75]	213
Abbildung 267: Darstellung des Brandraumes und Versuchskonfiguration in [200]	214
Abbildung 268: Versuchsübersicht der Großbrandversuche aus [201]	214
Abbildung 269: unbekleidete Wand A und teilweise unbekleidete Decke im Brandversuch Test 2 [201], vor (links), zur 240. Versuchsminute (Mitte) und der Temperaturzeitverlauf im Brandraum (rechts)	215
Abbildung 270: unbekleidete Wand, Stütze und Unterzug im Brandversuch Test 4, vor (links), zur 220. Versuchsminute (Mitte) und der Temperaturzeitverlauf im Brandraum (rechts) [201]	215

Abbildung 271: Beispiel einer HBV-Decke mit Auflagernocken [205].....	220
Abbildung 272: Querschnitt einer HBV-Decke mit SFS-Schrauben [205] Längsschnitt HBV- Decke mit Kerven	221
Abbildung 273: Mindestabmessungen für Stahlbetondecken, Tabelle 5.8 der DIN EN 1992-1- 2 [78].....	222
Abbildung 274: Standardauflagersituation einer HBV-Decke (links) (Bild : PIRMIN JUNG Deutschland GmbH)	223
Abbildung 275: Alternatives Auflager einer HBV-Decke mit Auflagernocke, nach dem Abbrand der Holzschicht (Bild: PIRMIN JUNG Deutschland GmbH).....	224
Abbildung 276: Anzahl der an der Umfrage teilgenommenen Organisationsformen.....	228
Abbildung 277: Bewertung der eigenen Feuerwehr bezüglich Ausrüstung (links) und Ausbildung (rechts).....	229
Abbildung 278: Antworten der Berufsfeuerwehren bezüglich zusätzlicher Einsatzmittel und Ausbildungen für die Brandbekämpfung in mehrgeschossigen Holzgebäuden.....	230
Abbildung 279: Meinungen der Feuerwehren zur Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus in Deutschland (oben) und Aufteilung der Zustimmung zum Holzbau nach den Eigenschaften mit/ ohne Hohlräume und nichtbrennbare/ brennbare Dämmmaterialien (unten)	231
Abbildung 280: Schutzmatrix der Sicherheitseinrichtungen und der zugeordneten Flüssigkeitskategorien [213]	236
Abbildung 281: Schematische Darstellung des freien Auslaufs mit Vorlagebehälter (Bild: DVGW e.V)	236
Abbildung 282: zulässige Anschlussarten an der Löschwasserübergabestelle DIN 1988-600 [214].....	237
Abbildung 283: mögliche Wasserverteilung bei Sprinkleranlagen (links, Bild: Minimax GmbH) und Wassernebellöschanlagen (rechts, Bild: FOGTEC Brandschutz GmbH)	238
Abbildung 284: Versuchsaufbau (links) und Ergebnisse mit Sprinkleranlagen (rechts) [220]	239
Abbildung 285: Grundriss (links) und Schnitt (rechts) des Versuchsaufbaus [221].....	239
Abbildung 286: Brandraumtemperaturen der Brandversuche [221]	240
Abbildung 287: Grundriss des Brandraums und des angrenzenden Flurs (links), Brandraum mit Mischbrandlasten (rechts) [222]	240
Abbildung 288: Mischbrandlasten in „Living room“ (links) und „Bedroom“ (rechts) [123]	241
Abbildung 289: Grundriss des Brandversuchs mit Anordnung der Sprinklerdüsen (links) und Sprinklerdüse (rechts) [123]	241
Abbildung 290: Wasserbeaufschlagung in Abhängigkeit der Wirkfläche entsprechend [224].....	242
Abbildung 291: erforderlicher Betriebsdruck der Löschwasserversorgung von Wohnraumsprinklern je Geschoss, bei zwei ausgelösten Sprinklern, WB = 2,1 mm/min, k-Wert = 57	249
Abbildung 292: Beispiel eines einfachen Ereignisbaums einer quantitativen Risikoanalyse [90].....	253
Abbildung 293: Verlauf der Einheits-Temperaturzeitkurve	254

Abbildung 294: Hochfeuerhemmende Holztafelbauwand (links, Bild: Knauf KG) und Querschnitt (rechts)	254
Abbildung 295: Verlauf der Einheits-Temperaturzeitkurve und Naturbrandkurve NB_1	257
Abbildung 296: Versuchsübersicht und Visualisierung der Realbrandversuche in „TIMpuls“	257
Abbildung 297: Brandraum V0 am Folgetag, Brandschutzbekleidung teilweise geöffnet.....	258
Abbildung 298: Temperaturverlauf zwischen der Brandschutzbekleidung und dem Holztafelbau in Wand 3 im Realbrandversuch V3	259
Abbildung 299: Brandraum V2 nach Versuchsende (links), Brandschutzbekleidung und Dämmstoffe zurückgebaut (rechts).....	259
Abbildung 300: Brandraum V3 in der Abkühlphase	260
Abbildung 301: Darstellung der Hierarchieebenen der FRIM-MAB [90]	268
Abbildung 302: Bewertung des Einflusses der aufbauenden Hierarchieebenen (links) und resultierender Einfluss der untersten auf die oberste Hierarchieebene (rechts) [90].....	268
Abbildung 303: Vergleich des berechneten Temperaturzeitverlaufs des erweiterten Naturbrandmodells zu gemessenen Temperaturzeitkurven der „Epernon Fire Tests“ nach [40] (links) sowie [41] (rechts)	285
Abbildung 304: Vergleich der Abbrandtiefen aus Versuchen bei unterschiedlichen Naturbrandbeanspruchungen mit den Ansätzen zur Abbildung der Abbrandtiefe im Naturbrandmodell	286
Abbildung 305: Vergleich zwischen dem erweitertem Naturbrandmodell und den Brandraumtemperaturen der Belegversuche.....	286
Abbildung 306: Vergleich der Zersetzung im Pyrolysemodell mit Daten von thermogravimetrischen Analysen.....	287
Abbildung 307: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate (HRR < 200 KW) des Simulationsmodells zur 15. Minute	288
Abbildung 308: Vergleich der Wärmefreisetzungsrate (links) und Brandraumtemperatur (rechts) zwischen RC_V1 und dem Simulationsmodell mit Ansatz b).....	288
Abbildung 309: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate (HRR < 200 KW) des Simulationsmodells zur 14. Minute	289
Abbildung 310: Vergleich Brandraumtemperatur zwischen einem Brandversuch [40] und dem Simulationsmodell unter Verwendung von Ansatz a) und Ansatz b).....	289
Abbildung 311: Simulationsmodell in FDS von Belegversuch V0	290
Abbildung 312: Schematisches vorgeben zur Durchführung der vollprobabilistischen Analysen	291
Abbildung 313: Ergebnisse der ökologischen Bewertung je Modul	298
Abbildung 314: Ergebnisse der ökologischen Bewertung, Module A+C zusammengefasst.....	298
Abbildung 315: Ergebnisse der ökologischen Bewertung, Module A+C+D zusammengefasst.....	299
Abbildung 316: Umwelteinwirkungen durch Treibhausgase in den Lebenszyklusphasen einer Decke mit 6 m Spannweite	300
Abbildung 317: Umwelteinwirkungen durch Treibhausgase im gesamten Lebenszyklus der Decken (links), einschließlich Recyclingpotential (rechts).....	301

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Abbildung 318: Darstellung der fünf Realbrandversuche (3x klein, 2x groß)	343
Abbildung 319: Ungeschützter (links) und bekleideter Holzprobekörper (rechts) im Cone-Kalorimeter	357
Abbildung 320: Brandofen zur Feuerwiderstandsprüfung in Anlehnung an DIN EN 1363-1 (Bauteilofen) als Visualisierung (links), Versuchsstand (Mitte), und HBV-Probekörper horizontal (rechts)	357
Abbildung 321: Holzschicht und Bewehrungslage der Holz-Beton-Verbunddecke in der Herstellung (links) und Ausführung von Temperaturmessstellen in der Grenzschicht zwischen Holz und Beton sowie an der Bewehrung (rechts)	357
Abbildung 322: Erforderlicher Betriebsdruck der Löschwasserversorgung von Wohnraumsprinklern je Geschoss, bei zwei ausgelösten Sprinklern, WB = 2,1 mm/min, k-Wert = 57	358
Abbildung 323: Ergebnisse der ökologischen Bewertung, Module A+C zusammengefasst, D informativ	359
Abbildung 324: Darstellung des Temperaturschwankungsbereich (min. und max. auftretende Temperaturen) in der Ebene 50 cm (links) und 200 cm (rechts) der Brandraumtemperaturdaten für die Mittelung beispielhaft für den V3.....	361
Abbildung 325: Messpositionen der bidirektionalen Sonden in der Öffnung der Brandraum und an der Fassade.....	362



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses.....	11
Tabelle 2: Eingangsparameter der verwendeten repräsentativen Naturbrandkurven	23
Tabelle 3: Plattenförmiges Bekleidungsmaterialien der Room-Corner Versuchsreihe	55
Tabelle 4: Versuchsmatrix der Room Corner Versuchsreihe	57
Tabelle 5: Zusammenfassung der Löscharbeiten und des Löschmittelbedarfs in den Room-Corner-Tests	65
Tabelle 6: Abbrandrate für eindimensionale ETK-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme , Abweichung zu β_0 aus DIN EN 1995 und angepasste Abbrandrate	76
Tabelle 7: Abbrandrate für dreiseitige ETK-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme , Abweichung zu β_n aus DIN EN 1995 und angepasste Abbrandrate.....	77
Tabelle 8: Abbrände und Abbrandraten für eindimensionale Naturbrand_1-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme	80
Tabelle 9: Abbrände und Abbrandraten für dreiseitige Naturbrand_1-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme	82
Tabelle 10: Abbrände und Abbrandraten für eindimensionale Naturbrand_2-Beanspruchung ermittelt über 300°C – Isotherme	85
Tabelle 11: Versuchsmatrix der Brandversuche zur Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung.....	90
Tabelle 12: Ergebnisse der Druckprüfungen in Abhängigkeit der Temperatur	106
Tabelle 13: Ergebnisse der Biegeprüfungen in Abhängigkeit der Temperatur	108
Tabelle 14: Dauer des seriellen Lichtbogens [95]	113
Tabelle 15: Dauer der Versuche und Lichtbögen am KVH [95]	115
Tabelle 16: Dauer der Versuche und Lichtbögen in der Holztafelbauwand [95].....	117
Tabelle 17: Dicken des Restholzes und der Holzkohleschicht der Brandversuche mit HBV-Decken im Bauteilofen	122
Tabelle 18: Versuchsmatrix der Großbrandversuche im Brandofen	125
Tabelle 19: Verbindungsmittelabstände für die Befestigung der Brandschutzbekleidung aus Gipsplatten Typ DF	127
Tabelle 20: Verbindungsmittelabstände für die Befestigung der Brandschutzbekleidung aus Gipsfaserplatten	127
Tabelle 21: Menge und Verhältnis der ungeschützten Holzoberflächen	131
Tabelle 22: Vergleich der thermischen Einwirkung (Integral der Temperaturzeitkurve)	132
Tabelle 23: Abbrandtiefe der ungeschützten Holzbauteile im Großmaßstab (V01 - V04 als Mittelwert von 10 Stichprobenmessungen) und Kleinmaßstab (NH_BSH als Mittelwert aus 3 Stichprobenmessungen) für Fichte.....	135
Tabelle 24: Übersicht über das Löschen der Großbrandversuche	141
Tabelle 25 - Vergleich der Anteile am Energiefluss durch die Umfassungsbauteile im Brandfall	158

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Tabelle 26: Übersicht zu den Konstruktionsformen der Versuche.....	161
Tabelle 27: Übersicht der Holzkonstruktionen aus den Versuchen	164
Tabelle 28: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V0.....	167
Tabelle 29: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V1	169
Tabelle 30: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V1.....	171
Tabelle 31: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V2.....	175
Tabelle 32: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V2.....	176
Tabelle 33: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V3.....	180
Tabelle 34: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V3.....	182
Tabelle 35: Beobachtungsprotokoll des Belegversuchs V4.....	187
Tabelle 36: Protokoll der Löscharbeiten des Belegversuchs V4.....	187
Tabelle 37: Übersicht über die Löscharbeiten in den Belegversuchen.....	190
Tabelle 38: Übersicht internationaler Großbrandversuche und Feststellung des Selbstverlöschens von Bränden in Räumen in Holzbauweisen	212
Tabelle 39: Ergebnisse der Bemessung der HBV- und Stahlbetondecken	222
Tabelle 40: Farbe der Flüssigkeit im Sprinkler und Nennauslösetemperatur nach DIN EN 12259-1 [208].....	235
Tabelle 41: Anlagentypen und Mindestauslegungskriterien nach DIN EN 16925 [209]	243
Tabelle 42: Auslegungsparameter und Mindestanforderungen entsprechend VdS 2896 [225]	243
Tabelle 43: Gebäudetypen entsprechend VdS 2896 [225]	244
Tabelle 44: Maximale Schutzflächen je Sprinkler nach DIN EN 12845 [210] und VdS 4001 [226].....	244
Tabelle 45: Sprinklerarten und K-Faktoren für Brandgefahrenklassen nach DIN EN 12845 [210] und VdS 4001 [226].....	245
Tabelle 46: Zusammenfassung der Parameter für die hydraulische Auslegung	248
Tabelle 47: Übersicht des erforderlichen Betriebsdrucks für Wohnraumsprinkleranlagen	250
Tabelle 48: Vorschläge für die Gebäudeklasse 4	265
Tabelle 49: Vorschläge für die Gebäudeklasse 5	266
Tabelle 50: Gegenüberstellung der Gewichtungen der FRIM-MAB-D und FRIM-MAB 2.0.....	269
Tabelle 51: Anpassung der FRIM-MAB Parameter für die Gebäudeklasse 5	270
Tabelle 52: Alte Bewertung des Parameters P5a entsprechend FRIM-MAB-D	270
Tabelle 53: Neue Bewertung des Parameters P5a.....	271
Tabelle 54: Alte Bewertung der Sub-Parameter P5b und P15c entsprechend FRIM-MAB-D	271
Tabelle 55: Neue Bewertung der Sub-Parameter P5b und P15c	272
Tabelle 56: Neue Bewertung des Sub-Parameters P14b	274
Tabelle 57: Alte Bewertung des Parameters P15a entsprechend FRIM-MAB-D	274
Tabelle 58: Parameterbewertung der Vorschläge für die Gebäudeklasse 4	276
Tabelle 59: Parameterbewertung der Vorschläge für die Gebäudeklasse 5	277

Schlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben TIMpuls

Tabelle 60: Risikoindizes der Vorschläge für die Gebäudeklasse 4	278
Tabelle 61: Risikoindizes der Vorschläge für die Gebäudeklasse 5	279
Tabelle 62: Kompensationsindex für Vorschlag 3 a	280
Tabelle 63: Kompensationsindex für Vorschlag 3 b	280
Tabelle 64: Kompensationsindex für Vorschlag 4 a	281
Tabelle 65: Kompensationsindex für Vorschlag 4 b	281
Tabelle 66: Kompensationsindex für Vorschlag 5 a	282
Tabelle 67: Kompensationsindex für Vorschlag 5 b	282
Tabelle 68: Kompensationsindex für Vorschlag 6	283
Tabelle 69: Kategorien der Ökobilanzdatensätze [253]	293
Tabelle 70: verwendet Datensätze für die ökologische Bewertung	294
Tabelle 71: Bauteilschichten Holztafelbau HT_1	295
Tabelle 72: Bauteilschichten Holztafelbau HT_2	296
Tabelle 73: Bauteilschichten Holztafelbau HT_3	296
Tabelle 74: Bauteilschichten Holzmassivbau HM_1	296
Tabelle 75: Bauteilschichten Holzmassivbau HM_2	296
Tabelle 76: Bauteilschichten Holzmassivbau HM_3	297
Tabelle 77: Bauteilschichten Mauerwerk Massiv_1	297
Tabelle 78: Bauteilschichten Mauerwerk Massiv_2	297
Tabelle 79: Risikoindizes der Vorschläge für die Gebäudeklasse 5	358
Tabelle 80: Thermoelemente zur Bestimmung der Brandraumtemperaturen	360

4 ANHANG

4.1 Teilvorhaben 1 „Integrale Systementwicklung brandschutztechnisch sicherer Holzgebäude“

4.1.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das themenübergreifende Teilprojekt „**Integrale Systementwicklung brandschutztechnisch sicherer Holzgebäude**“ umfasst neben der Gesamtkoordination des Verbundforschungsvorhabens ebenso die Bewertung der Leistungsfähigkeit aktueller abwehrender Brandschutzmaßnahmen und die Zusammenführung der Teilergebnisse innerhalb einer Leitlinie für brandschutztechnisch sichere mehrgeschos- sige Holzgebäude bis zur Hochhausgrenze unter Berücksichtigung ganzheitlicher Planungsparameter.

4.1.2 Bearbeitete Arbeitspakete

AP 0 Koordination

AP 1.1 (Inter-) nationaler Stand der Wissenschaft und Technik, präskriptive Anforderungen

AP 1.2 Aufbereitung, Analyse, Gegenüberstellung der präskriptiven Anforderungen für mehrgeschos- sige Gebäude in Holzbauweise

AP 1.3 Beurteilungskonzepte zur Erfassung der Brandeinwirkungen

AP 1.4 Brandverhalten von Holzbauteilen und deren Rauchdichtigkeit

AP 1.6 Schutzzieldefinition und Sicherheitskonzept

AP 2.1 Raumbrandversuche unter Naturbrandbeanspruchung

AP 2.2 Bauteilversuche in Normbrandofen unter ETK und Naturbrandkurven

AP 2.4 Analytische Auswertung der Messdaten

AP 2.5 Grundlagenuntersuchungen für numerische Beurteilungen

AP 2.7 Durchführung ganzheitlicher Belegversuche im Realmaßstab

AP 4.1 Unterschiede in der Einsatztaktik zwischen den GKL, freiwillige – Berufsfeuerwehr, Stadt – Land

AP 4.3 Auswertung bundesweiter Einsatzdaten hinsichtlich Hilfsfrist und Einsatzzeiten

AP 4.4 Evaluierung abwehrender Brandschutzmaßnahmen im Hinblick auf die Forschungsergebnisse

AP 6.1 Entwicklung eines probabilistischen Simulationsmodells

AP 6.4 Ganzheitliche Musterkonzepte

AP 8.1 Entwicklungen von Bauteilaufbauten und –fügungen

AP 8.4 Vorschläge für bauaufsichtliche Regelwerke

AP 8.5 Vorschlag auf bauaufsichtlicher Ebene

AP 9 Dissemination

4.1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

AP 0 – Koordination

Das Arbeitspaket 0 ist für die zentrale Zusammenführung und Verteilung von Informationen, Zwischenergebnissen und die Vernetzung der Projektbeteiligten verantwortlich.

Es wurden bis zur Erstellung dieses Berichts elf Treffen für alle Projektbeteiligten in München, Braunschweig und Heyrothsberge bzw. per WEB-Meeting durchgeführt. Im Rahmen dieser Veranstaltungen wurde u.a. der jeweilige Projektfortschritt diskutiert, das gemeinsame weitere Vorgehen abgestimmt und Ergebnisse vorgestellt.

Weiter erfolgte im Rahmen des Arbeitspaktes die zweiwöchentliche Koordination von Telefonkonferenzen mit den Projektbeteiligten.

Eine Projekthomepage zur Öffentlichkeitsarbeit www.timpuls.tum.de wurde erstellt und eine klare konkrete Zielsetzung veröffentlicht. Ein Projektserver zum Datenaustausch und zielgerichteter Zusammenarbeit wurde allen Partnern bereitgestellt.

Bis zur Erstellung dieses Berichts haben fünf Treffen des projektbegleitenden Ausschusses in München stattgefunden. Im Rahmen dieser Treffen wurden erste Ergebnisse vorgestellt und das weitere Vorgehen mit den jeweiligen Experten besprochen und abgestimmt.

Allgemeine Anfragen zum Forschungsvorhaben TIMpuls wurden bearbeitet und grundlegende Informationen weitergegeben.

AP 1 – Theoretische Grundlagenermittlung - Stand der Wissenschaft und Technik

Das deutsche Bauordnungsrecht ist für die baupraktische Anwendung oftmals eine Herausforderung. Viele unterschiedliche Dokumente sind für die Planung und den Bau heranzuziehen. Oftmals sind die gegenseitigen Abhängigkeiten und unzähligen Verweise auf den ersten Blick nicht klar ersichtlich. Um das Planen und Bauen mit Holz für alle Beteiligten zu vereinfachen, wurde mit Hilfe von Grundlagen aus diesem Vorhaben der Brandschutznavigator (www.brandschutznavigator.de) entwickelt. Dadurch soll der Einstieg in den Holzbau erleichtert werden.

Aufbauend auf den grundlegenden Forderungen der Bauordnung lassen sich aktuell in Deutschland verschiedene Erläuterungen zur Konkretisierungen des Schutzziels „Begrenzung der Brandausbreitung über die Fassade“ finden. Eine allgemeingültige Festlegung gibt es bisher nicht. Ein klar definiertes Schutzziel als Vorgabe zur Begrenzung der Brandweiterleitung über Außenwandbekleidungen wäre auch in Deutschland für die Betrachtung von Fassaden und Außenwandbekleidungen aus brennbaren Baustoffen an Gebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5 eine wichtige Grundlage. Dadurch lassen sich konstruktive Maßnahmen für normalentflammbare Außenwandbekleidungs-systeme auf ihre brandschutztechnische Wirksamkeit hin untersuchen und sinnvolle Systemlösungen für „brandschutztechnisch sichere“ Fassaden mit akzeptierbaren Brandschäden finden. Der ursprünglich, mit Blick auf WDVS mit EPS, entwickelte Fassadenbrandversuch nach DIN 4102-20 ist für die orientierende Prüfung von normalentflammbaren Fassadensystemen geeignet. Dies lässt sich dadurch begründen, dass für normalentflammbare Fassaden das Schutzziel darin besteht, ein selbstständiges Mitbrennen außerhalb der Primärflamme über Geschosstrennungen hinweg zu verhindern. Das Prüffeuer des DIN-4102-20-Versuchs mit einer Brandlast von $30 \pm 1,5$ kg bildet lediglich die Flammenspitze eines realistischen Raumbrands, mit entsprechend deutlich mehr Brandlast, ab. Dieses Prüffeuer ist jedoch rein zur Bewertung des selbstständigen Mitbrands außerhalb der Primärflamme ausreichend. Die umfangreichen Erkenntnisse der Nachbarländer (v. a. der Schweiz für Holzfassaden) mit schutzzielorientierten Vorgaben zur Beurteilung des Gesamtbrandverhaltens von normalentflammbaren Außenwandbekleidungs-systemen lassen sich, bei Vorliegen eines klar definierten Schutzziels, auch auf Deutschland adaptieren.

AP 2 – Experimentelle Brandversuche und numerische Untersuchungen

Für die brandschutztechnische Beurteilung von Holzbauteilen ist die, durch das jeweilige Einwirkungsszenario hervorgerufene, Abbrandtiefe und Temperaturverteilung im verbleibenden Bauteilquerschnitt maßgebend. Abbrandraten unter Normbrandbeanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) sind auf Basis zahlreicher Untersuchungen für verschiedene Materialien und Gruppierungen von Holzarten in der DIN EN 1995-1-2 42 aufgeführt. Insbesondere in Bezug auf die Holzarten ist diese Liste jedoch noch nicht vollständig, da mit dem klimatischen Wandel der Waldstruktur neue, bisher im Ingenieurholzbau nicht genutzte Holzarten zur Anwendung kommen. Erkenntnisse zum Abbrand und zur

Temperaturverteilung bei Naturbrandbeanspruchungen liegen nur in einem begrenzten Umfang vor. Infolge des unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus in der Aufheiz- und Abkühlphase liegt zusätzlich keine zeitliche Konstanz der Abbrandrate wie bei Normbrandbeanspruchung vor 125. Auf Basis von Brandversuchen wurden daher weiterführende Untersuchungen zum Abbrand- und Erwärmungsverhalten von Holz unter Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung durchgeführt.

Aus den bisherigen Erkenntnissen lässt sich schließen, dass die normativen Werte für den Abbrand nach [42] im Fall von Esche modifiziert werden sollten, der Sachverhalt wird weiter untersucht.

Ein Drittel aller Brände in Gebäuden lassen sich auf so genannte Elektrobrände zurückzuführen. Eine, spätestens seit Einführung der DIN VDE 0100-420 im Jahr 2016 und der allgemeinen Forderung zur Verwendung von Brandschutzschaltern (AFDDs) in Holzgebäuden, diskutierte Frage ist, ob die brennbare Konstruktion ein erhöhtes Risiko bei Elektrobränden darstellt und folglich Holzgebäude spezieller geschützt werden müssen. Im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Untersuchung wurde diese Fragestellung für moderne mehrgeschossige Gebäude aus Holz untersucht. Brennbarkeitsstoffe waren nicht Teil des Untersuchungsumfanges. Im Rahmen der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass das Risiko eines Auftretens von Elektrobränden innerhalb der Konstruktion verhältnismäßig gering ist und die vorhandenen Schutzeinrichtungen eines Hausanschlusses einen Teil möglicher Defekte bereits abdecken. Als maßgebendes Einwirkungsszenario wurde ein Lichtbogen ermittelt. Bei allen durchgeführten Versuchen trat ein Selbstverlöschen auf. Eine Notwendigkeit von AFDDs in Standardgebäude ließ sich nach Auswertung der Versuche nicht erkennen.

Im Rahmen der Tätigkeit als koordinierende Stelle übernahm die TUM die Projektleitung für die Planung und Durchführung der abschließenden Realbrandversuche (Belegversuche), die maßgebend für das erfolgreiche Erreichen des Gesamtprojektziels sind. Die Realbrandversuche dienen zum Beleg der innerhalb des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse und als Grundlage zum Nachweis der bauordnungsrechtlichen Schutzziele, wie die Tragfähigkeit, der Raumabschluss, das Selbstverlöschen bzw. die Löschbarkeit der Konstruktionen durch die Feuerwehr (Nachbrandverhalten) sowie die Begrenzung der Brandausbreitung. Untersucht wurden Raumbrände in Holzkonstruktionen mit einer normativen mobilen Brandlast und bautypischen Ausführungen. Besonders die Variation zwischen ungeschützten, anfänglich geschützten und vollständig geschützten Holzoberflächen ist hierbei von hoher praxisrelevanter Bedeutung.

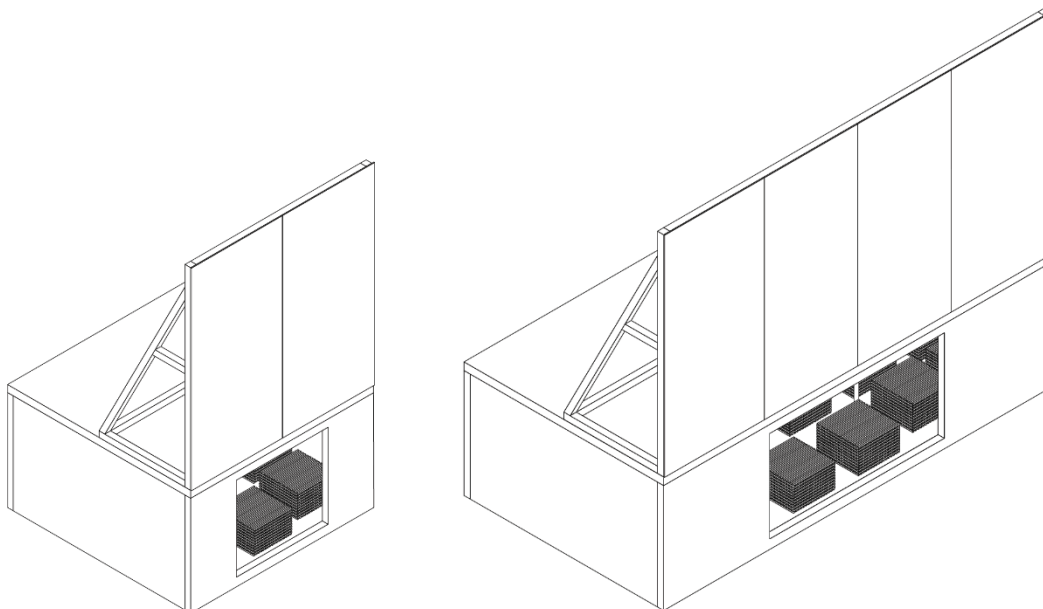


Abbildung 318: Darstellung der fünf Realbrandversuche (3x klein, 2x groß)

Konkrete Untersuchungsziele sind hierbei:

- Beleg der Ergebnisse der vorherigen, im Bauteilmaßstab durchgeführten Versuche im „realen Versuchsbauwerk“ unter Naturbrandbedingungen
- Einfluss brennbarer Bauteiloberfläche auf den Brandverlauf
- Verhalten der Brandschutzbekleidung und deren Schutzzeiten unter Naturbrandbeanspruchung

- Verhalten bzgl. Selbstverlöschen und Nachbrandverhalten von Holzkonstruktionen
- Lösbarkeit der praxisüblichen Konstruktionen im Holzbau
- Analyse der Brandweiterleitung über die Fassade in das Geschoss über dem Brandgeschoss durch brennbare Oberflächen im Raum
- Untersuchung der Auswirkungen von brandschutztechnischen Schutzmaßnahmen im Stoß- und Fügungsbereich von Bauteilen
- Bewertung der Standsicherheit unter Naturbrandbeanspruchung
- Bewertung des Raumabschlusses (Feuer und Rauch, Wärmedämmung) unter Naturbrandbeanspruchung
- Überprüfung und abschließende Beurteilung der Vorgaben des Entwurfes der M-HolzBauRL

Zusammenfassend sollte unter realen Bedingungen untersucht werden, wie ein Vollbrand in mehrgeschossigen Holzgebäuden verläuft. Im Rahmen der Versuche wurden daher umfangreiche Messdaten (Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Gewichtsverlust der mobilen Brandlast und Bauteile usw.) aufgezeichnet, die ausgewertet ein klareres Bild davon geben, wie sich die Gesamtkonstruktion im Brandfall und während des Löschvorgangs verhält. Letzteres nimmt auch bei diesen Versuchen einen großen Stellenwert ein. Hierdurch soll eine gesamtheitliche Betrachtung von Bränden in Holzgebäude ermöglicht werden, da von der Entstehung bis zur Brandbekämpfung durch die Feuerwehr alle Phasen eines realistischen Brandereignisses eingeschlossen sind.

AP 4 – Abwehrender Brandschutz, Auswertung realer Einsatzdaten zu mehrgeschossigen Gebäuden

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge eine Strategie für den zielgerichteten Wissenstransfer für den abwehrenden Brandschutz zum Thema „Taktik im mehrgeschossigen Holzbau“ erarbeitet und die Konzeption der Versuche stetig auf diesen zu füllenden Themengebieten hin überprüft. Entscheidend für den Gesamterfolg dieser Maßnahmen ist insbesondere auch das im Folgeantrag Dissemination genannte Anschlussprojekt.

AP 8 – Zusammenführung der Ergebnisse in einer Leitlinie für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise bis zur Hochhausgrenze - Entwicklung von Bauteilaufbauten

Gemeinschaftlich wurden die gewonnenen Forschungsergebnisse aus den vorhergehenden Arbeitspaketen 1 bis 7 zusammengetragen.

AP 9 – Wissenstransfer: Kommunikation der Projektergebnisse

Zusammen mit den beteiligten Projektpartnern wurde ein Folgeantrag zur Dissemination erarbeitet, welcher die erlangten Erkenntnisse und Ergebnisse in die Anwenderkreise weiterleiten soll. Hiermit soll eine zügige und zielorientierte Weiterleitung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens TIMpuls ermöglicht werden.

4.2 Teilvorhaben 2 „Beurteilung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Bauteilen und Systemen“

4.2.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 2 **Beurteilung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit von Bauteilen und Systemen** behandelt die Ermittlung wesentlicher Informationen zum Feuerwiderstand von Holzbauteilen mittels experimenteller und numerischer Analysen. Diese Ergebnisse werden in Kombination, mit den im Verbundprojekt bereitgestellten Informationen der weiteren Teilprojekte, in eine ganzheitliche Risiko-betrachtung für mehrgeschossige Holzgebäude integriert. In dem Teilprojekt 2 erfolgen dazu vollprobabilistische Untersuchungen zur akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit von Brandschutzbekleidungen sowie der raumabschließenden Funktion.

4.2.2 Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1.3 Beurteilungskonzepte für Brandeinwirkung

AP 1.6 Schutzzieldefinition und Sicherheitskonzept

AP 2.1 Raumbrandversuche unter Naturbrandbeanspruchung

AP 2.2 Bauteilversuche in Normbrandofen unter ETK und Naturbrandkurven

AP 2.4 Analytische Auswertung der Messdaten

AP 2.5 Grundlagenuntersuchungen für numerische Beurteilungen

AP 2.6 Beurteilung zum Feuerwiderstand auf Basis numerischer Betrachtungen

AP 2.7 Durchführung ganzheitlicher Belegversuche im Realmaßstab

AP 6.1 Entwicklung eines probabilistischen Simulationsmodells

AP 6.2 Simulation auf Basis gesammelter Daten und Ergebnisse

AP 8.1 Entwicklungen von Bauteilaufbauten und –fügungen

AP 8.5 Vorschlag auf bauaufsichtlicher Ebene

AP 9 Dissemination

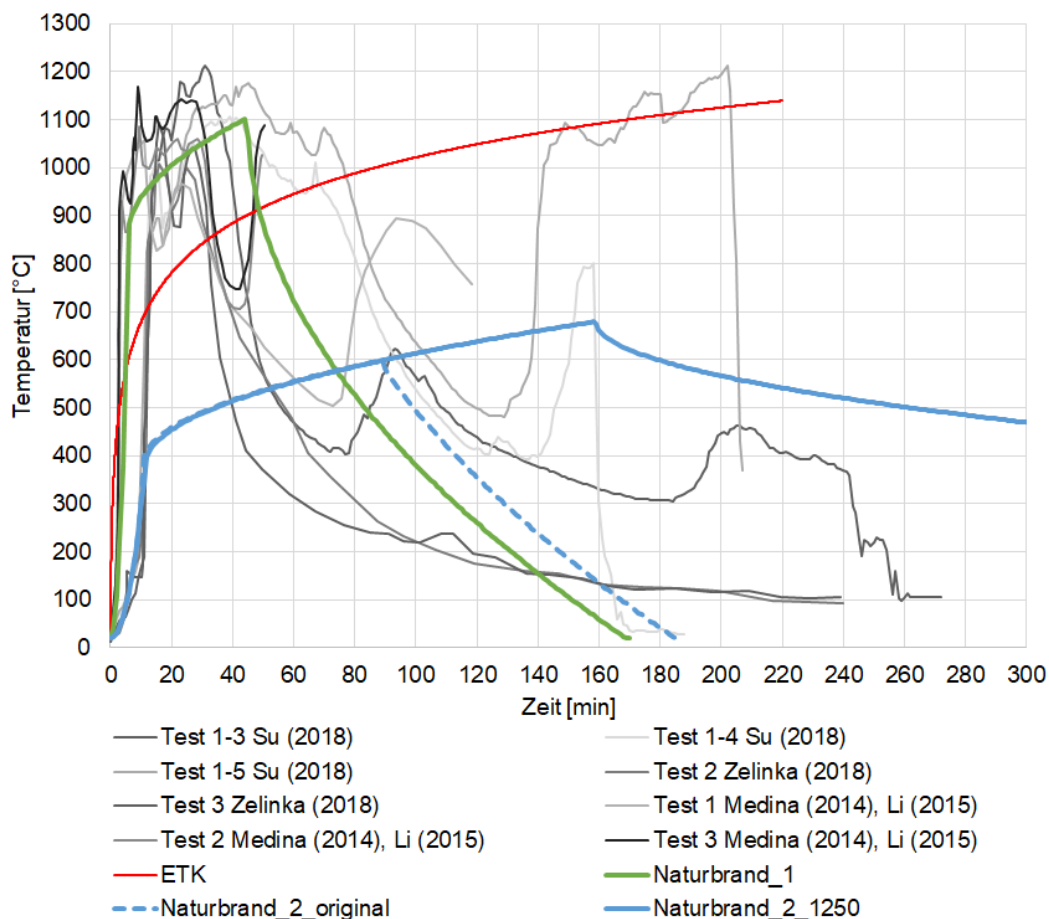
4.2.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

AP 1.3 – Beurteilungskonzepte zur Erfassung der Brandeinwirkungen

Die zusammengetragenen, empirischen Ansätze aus der Literatur wurden anhand grundlegender Eigenschaften wie Kurvenverlauf, Eingangsparameter, Anwendungsgrenzen, Komplexität und Ansatzgrundlage miteinander verglichen. Ziel dieser Analyse war es festzustellen, ob neben dem Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-2/NA ein weiteres Brandmodell für eine Erweiterung zur Berücksichtigung brennbarer Raumboflächen herangezogen werden konnte. Hierbei musste der empirische Ansatz zunächst einen natürlichen Brandverlauf mit Brandentwicklungsphase, stationärer Brandphase und Abkühlphase realitätsnah abbilden können. Zudem musste das empirische Modell eine Unterscheidung des Brandregimes in brandlast- und ventilationsgesteuert ermöglichen.

Diese hohen Anforderungen an die empirischen Ansätze konnten nur von dem Ansatz von Barnett und dem Ansatz von Magnusson und Thelandersson, welche die parametrischen Temperaturzeitkurven nach DIN EN 1991-1-2 – Anhang A entsprechen, erfüllt werden. Dementsprechend folgte für die drei gewählten Brandmodelle (Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-2/NA, BFD-Kurven aus dem Ansatz von Barnett und parametrischen Temperaturzeitkurven nach DIN EN 1991-1-2) eine Überprüfung der Güte zur Abbildung von gemessenen Brandraumtemperaturen aus der Literatur. Durch den Vergleich mit experimentellen Daten von Raumbrandversuchen in Holzkonstruktionen mit Realbrandlasten ließ sich die Eignung des Brandmodells für die Abbildung von Raumbränden feststellen. Außerdem wurden die Brandmodelle hinsichtlich einer möglichen Erweiterung zur Berücksichtigung von ungeschützter Holzoberflächen und deren Beitrag zum Brandverlauf analysiert.

Zur Beurteilung des Feuerwiderstandsverhaltens der Bauteile unter Naturbrandbeanspruchung wurden drei repräsentative Naturbrandkurven erarbeitet. Die Ergebnisse der Bauteilversuche unter Naturbrandbeanspruchung dienen zur Äquivalenzbetrachtung zwischen Beanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) und Naturbrandkurven. Die festgelegten repräsentativen Naturbrandkurven bilden die Temperaturzeitverläufe für Brände in Holzgebäuden mit Wohnnutzung und teilweise ungeschützten Holzoberflächen wieder. Grundlage für die repräsentativen Naturbrandkurven bildet das erarbeitete erweiterte Naturbrandmodell nach EC1-1-2/NA (Anhang AA).



Der Verlauf der Brandkurve Naturbrand_1 orientiert sich an experimentellen Daten von Raumbrandversuchen, welche auch aus der Literatur entnommen wurden. Die Maximaltemperatur dieser Brandkurve wurde bedingt durch die limitierte Umsetzung in einem Normbrandofen auf 1100 °C begrenzt. Die Brandkurve Naturbrand_2 stellt einen unteren Grenzwert bei einem stark unterventilierten Brandereignis da. Hierbei wurde eine geringe Maximaltemperatur von 600 °C festgelegt. In der Kurve Naturbrand_2_1250 ist dieselbe Brandlastdichte wie für Naturbrand_1 zugrundegelegt, wodurch eine Vergleichbarkeit zu Naturbrand_1 besteht.

Eingangsparameter	Naturbrand_1	Naturbrand_2	Naturbrand_2_1250
Brandlastdichte MJ/m ²	1250	675	1250
Ventilationsöffnungen m ² (H x B)	6,8 (2,0 x 3,4)	1,44 (0,6 x 2,4)	1,44 (0,6 x 2,4)
Brandraumfläche m ² (L x B)	24,0 (4,0 x 6,0)	20,0 (4,0 x 5,0)	20,0 (4,0 x 5,0)
Brandraumhöhe m	2.7	2.7	2.7
Öffnungsfaktor m ^{0,5}	0,094	0,013	0,013
Verbrennungseffektivität -	0,8	0,8	0,8
Brandentwicklungsgeschwindigkeit s	150	600	600
Wärmespeichervermögen der Umfassungsbauteile J/(m ² · s ^{0,5} · K)	950	950	950
Integral T·min	135.196	68.607	199.336

AP 1.6 – Schutzzieldefinition und Sicherheitskonzept

In Bezug auf die Brandschutzbemessung von Bauteilen stellt das Sicherheitskonzept grundsätzlich einen wichtigen Zusammenhang zwischen der im öffentlichen Interesse liegenden Sicherheit und der gebotenen Wirtschaftlichkeit bei der Konstruktion her. Eine ausreichende Sicherheit besteht, wenn z. B. ein Versagen des Bauwerkes innerhalb der geplanten Nutzungsdauer nur mit einer akzeptierbar kleinen Wahrscheinlichkeit (Zielversagenswahrscheinlichkeit) auftritt.

Bei der Brandschutzbemessung der baulichen Brandschutzmaßnahmen müssen die Unsicherheiten und Parameterstreuungen der verwendeten Materialien durch die Auswahl geeigneter Bemessungswerte abgedeckt werden. Dadurch wird ein bedingtes Versagen mit angemessener Zuverlässigkeit vermieden. Diese Bemessungswerte werden, in Übereinstimmung mit dem Teilsicherheitskonzept der konstruktiven Eurocodes, über charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte definiert. Die damit erreichte Zuverlässigkeit bzw. das verbleibende Restrisiko ist für den Aufsteller der Nachweise jedoch nicht erkennbar.

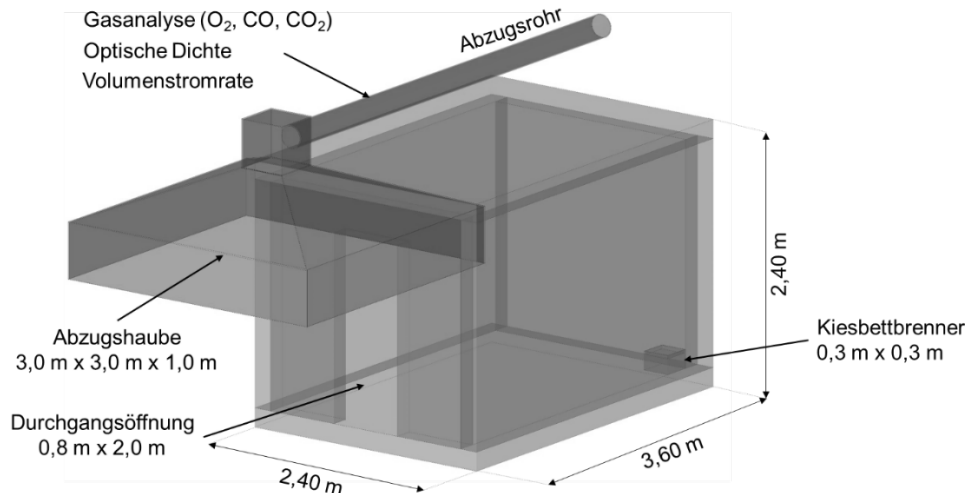
Das bestehende semiprobabilistische Sicherheitskonzept der Eurocodes wurde hingehend der Schutzziele analysiert. Die Grundanforderungen nach dem Eurocode für die Planung und der Berechnung des Tragwerks umfassen Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Diese Anforderungen lassen sich in den Schutzzielen nach § 3 der Musterbauordnung wiederfinden.

Die sich auf den Brandschutz beziehenden Schutzziele sind im § 14 der Musterbauordnung verankert. Bei Anwendung von ingenieurmäßigen Bemessungsverfahren im Brandschutz enthält die DIN EN 1991-1-2/NA ein auf Teilsicherheitsbeiwerte basierendes Sicherheitskonzept für den baulichen Brandschutz, welches auf Einwirkungs- und Materialparameter, anlagentechnische und abwehrende Brandschutzmaßnahmen eingeht. Dieses Sicherheitskonzept für den baulichen Brandschutz orientiert sich an den in den europäischen Normen getroffenen Festlegungen und integriert diese. Das betrifft einerseits die generellen Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit von Bauwerken und Tragwerken,

die bauart- und baustoffübergreifend in DIN EN 1990 geregelt sind, und andererseits das im Eurocode enthaltene semiprobabilistische (auf Teilsicherheitsbeiwerte basierend) Sicherheitskonzept.

AP 2.1 – Raumbrandversuche unter Naturbrandbeanspruchung

Eine Versuchsreihe von 20 Raumbränden erfolgte im Room Corner-Versuchsstand nach DIN EN 14390 bzw. ISO 9705-1. Die Abmessungen des normierten Raumes sind nachfolgend dargestellt. Der Room Corner empfiehlt sich aufgrund der umfangreichen Messdatenerfassung für eine systematische Untersuchung des Raumbrandverhaltens im mittleren Maßstab.

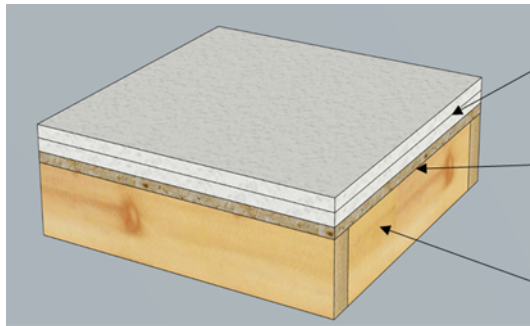


Aus den durchgeführten Room Corner Versuchen war ersichtlich, dass ein vorhanden sein von struktureller Brandlast eine Änderung der Brandraumdynamik bei sonst ausschließlich mobiler Brandlast zu Folge hat. Aus den experimentellen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich durch die strukturelle Brandlast eine kürzere Brandentwicklungsdauer bis zum Eintritt des Flashovers und eine Steigerung der Wärme-freisetzungsrates ergab. Zudem wurde durch die zusätzliche strukturelle Brandlast ein ventilationsgesteuertes Brandregime zu einem früheren Zeitpunkt im Brandverlauf erreicht, welches eine geringere maximale Wärmefreisetzungsrates aber eine längere Branddauer zur Folge hatte.

Mit der Versuchsreihe konnte ein Selbstverlöschen immer beim Verlöschen der mobilen Brandlast (Stützfeuer) zuverlässig beobachtet werden, sofern nur die Decke oder eine Wand als ungeschützte Holzoberfläche ausgeführt wurde. Durchgeführte Löschmaßnahmen führten, beim Einsatz einer minimalen Löschmittelmengens, mit 3 – 4 Sprühstößen schnell zum Ablöschen des Vollbrandes. Der durchschnittliche Löschmittelbedarf zum Ablöschen des Vollbrandes wurde dabei mit < 10 l (Löschmittel = Wasser) gemessen. Dementsprechend zeigte sich ein, bezogen auf den Brandraum dieser Brandversuche, beherrschbares Brandszenario. Die hier erlangten Erkenntnisse stimmen in der grundlegenden Branddynamik mit den Erkenntnissen aus z. B. [40], [41], [32], [75], [123] und [127] überein. Es bleibt anzumerken, dass die Brandversuche in den angegebenen Quellen zum Teil einen anderen Fokus hatten und somit sich teilweise Unterschiede ergeben.

AP 2.2 Bauteilversuche in Normbrandofen unter ETK und Naturbrandkurven

Die Schutzwirkung der gipsbasierten Brandschutzbekleidungen, infolge der Dehydratation des chemisch und physikalisch gebundenen Wassers, zeigte in diesem Maßstab keine nennenswerten Unterschiede zwischen der Gipsfaserplatte und der Gipsplatte Typ DF oder Typ A. Für die Kombination von mehrlagigen gegenüber einlagigen Brandschutzbekleidungen konnte in diesen Versuchen eine höhere Leistungsfähigkeit ermittelt werden. Als maßgebender Einflussparameter einer Brandschutzbekleidung unter Brandbeanspruchung ist jedoch die Gesamtdicke zu nennen. Die 17 kleinskaligen Brandversuche an 34 Versuchskörper zur Untersuchung der Sicherheitsreserven und Leistungsfähigkeit von Brandschutzbekleidungen zeigten bei entsprechend starker Schichtdicke der Brandschutzbekleidungs das Verhindern der Entzündung und selbstständige Verbrennen der Trägerplatte.



Kombination aus Brandschutzbekleidung:

- Gipsplatten Typ DF (DIN EN 520)
- Gipsfaserplatten (DIN EN 15283-2)

Trägerplatte:

- 19 mm Spanplatte (Norm-Trägerplatte)
- 15 mm OSB/3-Platte (DIN EN 300)
- 40 mm Massivholzplatten (SWP) (DIN EN 13353)

Fichtenholzrahmen (100 mm x 40 mm)

In Bezug auf die Rissbildung der Bekleidung konnte ein deutlich unterschiedliches Verhalten der Bekleidungstypen festgestellt werden. Die Gipsfaserplatte neigte zur massiven Rissbildung und Wölbung der gerissenen Bekleidungsteile in den Brandraum, während die Gipsplatte Typ DF nur gleichmäßig über die beflammete Oberfläche verteilte Haarrisse aufweist. Die Gipsplatte Typ A hingegen zeigte neben einer starken Rissbildung auch ein Herabfallen von Bekleidungsteilen. Entsprechend wird für die Ausbildung einer Brandschutzbekleidung der Bekleidungstyp Gipsfaserplatte oder Gipsplatte Typ DF empfohlen. Bei einer Betrachtung des Einflusses der Rissbildung unter Naturbrandbeanspruchung führt eine starke Rissbildung zu einer schnelleren Durchwärmung in der Aufheizphase aber auch zu einer zügigeren Temperaturabgabe in der Abkühlphase.

Unter Beanspruchung durch die ETK konnte für unterschiedliche Kombinationen von Brandschutzbekleidungen die Leistungsfähigkeit, in Form des Schutzes vor einer Entzündung und dem selbstständigen Weiterbrennen der geschützten Trägerplatte, ermittelt werden. Grundsätzlich wurde hierzu festgestellt, dass bei einer Grenzschichttemperatur von ca. 270 °C sichtbare Verkohlungen, jedoch kein Entzünden der Trägerplatte, auftraten. Für eine Auslegung der Brandschutzbekleidung, mit dem Ziel eine Entzündung der Trägerplatte unter Brandbeanspruchung durch die ETK zu verhindern, konnten folgende Kombinationen festgestellt werden. Für die Bewertung folgte ein Heranziehen der normativen Leistungskriterien der Temperaturbegrenzung nach [2].

- 90 min ETK → 2 x 18 mm (36 mm) bzw. 15 mm + 18 mm (33 mm),
- 60 min ETK → 2 x 15 mm (30 mm) bzw. 1 x 25 mm und
- 30 min ETK → 1 x 18 mm.

Sichtbare Verfärbungen traten bereits ab einer Grenzschichttemperatur von 200 °C in der ungestörten Fläche auf. Im Bereich von Verbindungsmittel waren hier teilweise bereits Verkohlungen festzustellen. Die Art bzw. die Struktur der Trägerplatte weist eine leicht unterschiedliche Neigung zu Verfärbungen/Verkohlungen auf. Die Oberflächenstruktur der OSB/3 Trägerplatte zeigte eine stärkere Neigung zur Verfärbung/Verkohlung gegenüber Norm-Trägerplatte (Spanplatte, Baustoffklasse B2).

Die Untersuchungen bei Naturbrandbeanspruchung zeigten ein Verhindern der Entzündung der Trägerplatte bei einer Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm Gipsplatten, wobei die Trägerplatte hierbei zum Teil Verfärbungen und Verkohlungen aufwies. Eine Äquivalenz hinsichtlich Temperaturentwicklung in der Grenzschicht sowie dem Grad der Verkohlung der Trägerplatte zu einem identischen Versuchskörper unter 90-minütiger ETK Beanspruchung konnte festgestellt werden. Daraus lässt sich eine Vergleichbarkeit vom Feuerwiderstandsverhalten des Bauteils für diese unterschiedlichen Brandbeanspruchungen (ETK – Naturbrand_1) ableiten.

Innerhalb des Nachbrandverhaltens bzw. der Ankühlphase war ein Selbstverlösch des Versuchskörpers nur in den Fällen zu beobachten, sofern die Trägerplatte nicht entzündet und selbstständig weiterbrannte. Es sei hierbei anzumerken, dass die Analyse eines Selbstverlöschens in diesen Versuchen technisch bedingt (z. B. Brandraumgröße, Konstruktion der Versuchskörper) limitiert war. Entsprechend ermöglichen diese Versuchsergebnisse keine zuverlässige Aussage zum Nachbrandverhalten bzw. Selbstverlösch.

Aus den Versuchsergebnissen der Großbrandversuche im Brandofen konnten die Erkenntnisse der vorangegangenen klein- und mittelskaligen Brandversuche weitestgehend bestätigt werden. In Bezug auf die Menge der ungeschützten Holzflächen zeigten auch die Großbrandversuche, dass bei einer ungeschützten Holzfläche die Brandraumtemperaturen in der Abkühlphase deutlich schneller absanken im Vergleich zu den Versuchen mit mehreren ungeschützten Holzflächen. Bezogen auf die Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidungen wiesen die Bekleidungskombinationen in den großmaßstäblichen

Brandversuchen unter Beachtung der Plattenstöße, der Verbindungsmittel und der Verspachtelung annähernd die gleichen Ergebnisse auf, wie in den kleinmaßstäblichen Untersuchungen. Zur Verhinderung einer Entzündung und dem selbstständigen Weiterbrennen der anfänglich geschützten Holzfläche war nach diesen Versuchs-ergebnissen mindestens die Kombination von 2 x 18 mm Gipsplatten erforderlich. Der Vergleich der Temperaturen in der Grenzschicht zwischen den klein- und großmaßstäblichen Versuchen lässt hier auf eine Skalierbarkeit der Erkenntnisse schließen. Bei Bekleidungsstärken oberhalb von 2 x 18 mm war eine Vergrößerung der Leistungsfähigkeit respektive der Schutzwirkung gegenüber dem Entzünden der anfänglich geschützten Holzflächen festzustellen. In Abhängigkeit der Brandeinwirkung kann somit eine unterschiedliche Kombination von Bekleidungsstärken zum Schutz vor einer Entzündung angesetzt werden. Ein klares Beispiel dafür zeigten die Versuchsergebnisse unter einer deutlich abweichenden Brandbeanspruchung.

Der Einfluss einer thermischen Delamination von Brettsperrholzbauteilen auf den Brandverlauf konnte in sehr deutlicher Form festgestellt werden. Der thermisch bedingte Abbau der Adhäsion zwischen dem Kleber und den einzelnen Lamellen des Bauteils in Kombination mit der Schwerkraft führte zu einem Abfallen von einzelnen Lamellen. Hierbei wurde zum einen eine nicht verkohlte Holzfläche freigelegt, die sich am Brandgeschehen beteiligte, und es sammelte sich die Brandlast aus abgefallenen Lamellen auf dem Brandraumboden. Entsprechend konnte in diesem Versuch kein Selbstverlöschten beobachtet werden. Zudem gestalteten sich die Löschmaßnahmen infolge der Brandlastverteilung, der hohen Brandraumtemperaturen und der erschwerten Zugänglichkeit als aufwändig.

Mittels Äquivalenzvergleich ist über die betrachtete Versuchsdauer eine Gleichwertigkeit des Feuerwiderstandsverhaltens der Holzbauteile zwischen den Brandbeanspruchungen ETK (90 Minuten) und Naturbrand_1 festzustellen. Dieses zeigte sich vor allem in der Schutzwirkung der Brandschutzbekleidung. Infolge der unterschiedlichen Maximaltemperaturen in der Grenzschicht, welches auch an der veränderten Durchwärmung infolge der vollumfänglichen Bauteilaufbauten sowie der Brandkurven lag, zeichnete sich für den Großbrandversuch unter ETK-Belastung eine stärkere Verkohlungs/Verfärbung der anfänglich geschützten Holzfläche ab.



Die durchgeführten Löschmaßnahmen stellten bei Anwendung der Löschanlage für das Ablösen des Flammenbrandes eine sehr effektive und löschmittelsparende Methode dar. Bei der Anwendung wurden die Einsatzkräfte keiner thermischen Einwirkung ausgesetzt. Ein abschließend notwendiger Innenangriff zur Detektion und Bekämpfung von möglichen Glimmnestern sowie gängige Nachlöscharbeiten folgten unter Verwendung des Hohlstrahlrohrs.

AP 2.4 Analytische Auswertung der Messdaten

Die erste Aufbereitung der Messdaten erfolgte parallel zu den experimentellen Untersuchungen. Eine detaillierte Auswertung der Messdaten wurde im Anschluss der Versuche vollzogen. Hinsichtlich der jeweiligen Fragestellung wurden teilweise versuchsübergreifende Auswertungen auch unter Einbeziehung von recherchierten Versuchsdaten durchgeführt. Die ausgewerteten Daten wurden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens zur Validierung der numerischen bzw. empirischen Modelle herangezogen.

AP 2.5 – Grundlagenuntersuchungen numerischer Beurteilungen

Aufgrund der am iBMB gemachten Erfahrung mit Verfahren zur experimentellen Bestimmung von thermischen Materialkennwerten heterogener Baustoffe ist im Rahmen der Projektbeteiligten abgestimmt

worden, keine Ermittlung thermischer Materialkennwerte über experimentelle Verfahren vorzunehmen. Hier soll die umfangreiche Literaturstudie sowie die Rechercheergebnisse vorheriger Forschungsarbeiten der Beteiligten als ausreichend für die Grundlagenbestimmung angesehen werden.

Aus der vertieften Recherche zu thermischen Materialkennwerten für Nadelholz, gipsbasierte Brandschutzbekleidung (Gipsplatten) und mineralischer Dämmstoffe konnte eine überschaubare Anzahl an Kennwerten zusammengestellt werden. Ein Großteil der Kennwerte weisen Modifikationen auf, um den Effekt von physikalischen oder chemischen Vorgängen abzubilden, dieses sind beispielsweise die Verdampfungsenthalpie, Rissbildung oder Materialzersetzung. Entsprechend können diese Kennwerte als sogenannte effektive thermische Materialkennwerte bezeichnet werden.

AP 2.6 – Weiterführende Beurteilungen zum Feuerwiderstand auf Basis numerischer Betrachtungen

Die weiterführenden numerischen Arbeiten bestehen aus einer Analyse der in AP 2.5 recherchierten effektiven, thermischen Materialkennwerte hinsichtlich der Güte zur Abbildung von Versuchsdaten unter Einheits-Temperaturzeitkurve sowie Naturbrandkurve in einer eindimensionalen thermischen Analyse. Beginnend erfolgte eine, auf den ersten Simulationsergebnissen basierende, Vorauswahl zur Reduktion der recherchierten Kennwerte. Mit der verbleibenden Auswahl an effektiven, thermischen Kennwerten folgte eine vertiefende Analyse unter Verwendung einer größeren Vergleichsdatenmenge. Unter Beachtung der Anzahl der Versuchsdaten und der Streuung dieser konnte eine hinreichende Abbildung aus den Ergebnissen der numerischen Simulationen unter ETK-Beanspruchung für die weitere Analyse der thermischen Materialkennwerte feststellen.

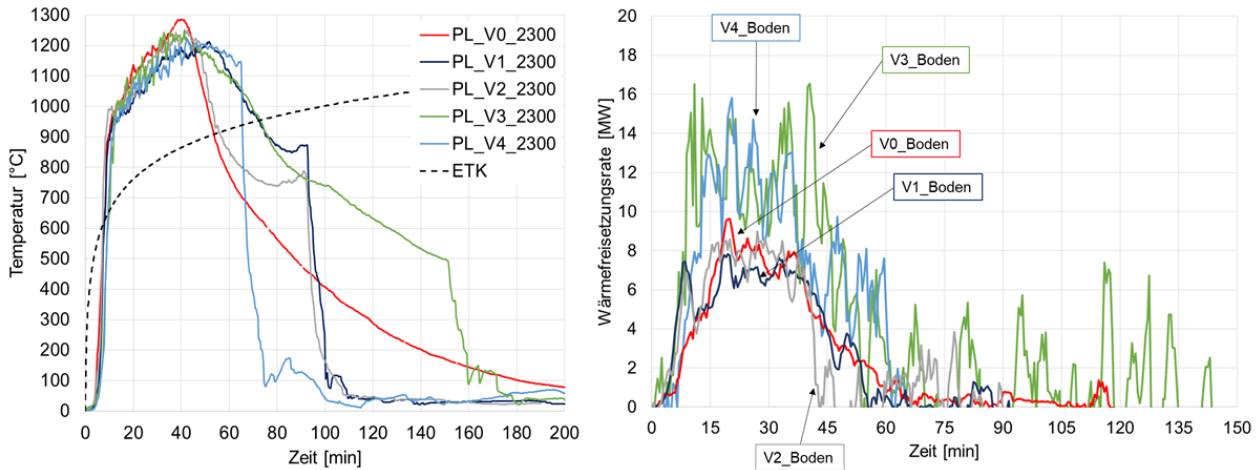
Zur numerischen Abbildung der Versuchsergebnisse unter Naturbrandbeanspruchung wurden die vorausgewählten thermischen Materialeigenschaften für eine Analyse verwendet. Abgeschlossene Untersuchungen zu thermischen Materialkennwerten von Brandschutzbekleidungen unter Naturbrandbeanspruchung wiesen bereits auf die Problemstellung bei der numerischen Betrachtung hin. Die Problemstellung betrifft das nicht reversible Materialverhalten unter Brandbeanspruchung. Die Wärmeleitfähigkeit von Gipsplatten oder Holz bei 200 °C in der Aufheizphase ist anders als bei 200 °C in der Abkühlphase infolge der thermisch bedingten Umwandlungs- bzw. Zersetzungsprozesse.

Für die thermische Analyse unter Naturbrandbeanspruchung wurde der Ansatz zur Implementierung einer zusätzlichen Feldvariable verfolgt. Die Begründung liegt in der Allgemeingültigkeit bzw. Robustheit des Simulationsmodells hinsichtlich einer variablen Einwirkung. Bedingt durch den Mehraufwand für den Abschluss einzelner Arbeitspakete konnte die tiefere thermische Analyse von Bauteilen unter Naturbrand mit dem verfolgten Ansatz nicht erfolgreich bearbeitet werden.

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass für die Modellierung der Bauteiltemperaturen von Holz in der Abkühlphase die in der Literatur verfügbaren thermischen Kennwerte nur bedingt geeignet sind. In anschließenden Forschungsvorhaben sind geeignete Materialkennwerte zu bestimmen. Aus dem Vorhaben TIMpuls liegen eine Vielzahl an Versuchsergebnissen vor, anhand derer die zu bestimmenden Materialkennwerte kalibriert und validiert werden können.

AP 2.7 Durchführung ganzheitlicher Belegversuche im Realmaßstab

Der Einfluss des Beitrages von strukturellen Brandlasten ist innerhalb der Belegversuche deutlich in den berechneten Wärmefreisetzungsraten des Gebäudes und in den Temperaturmessungen vor der Fassade sichtbar. Bezogen auf die Brandraumtemperaturen zeigt sich der Einfluss a) durch einen etwas früheren Eintritt des Flashover und b) in Form eines intensiveren Nachbrandverhalten während der Abkühlphase. Die Menge der am Brand beteiligten strukturellen Brandlast ist ebenfalls als ein Einflussparameter auf das Nachbrandverhalten und eines möglichen Selbstverlöschens zu nennen. Diese zeigen die Messdaten der Brandraumtemperaturen und die berechneten Wärmefreisetzungsraten des Versuchsraumes.



Das Versagen der Brandschutzbekleidung und dem damit verbundenen Mitbrennen der anfänglich geschützten Holzbauteile erfolgt in Abhängigkeit der Bekleidungsstärke nach unterschiedlichen Beanspruchungsdauern. Das Mitbrennen findet für 1 x 18 mm Gipsplatten nach ca. 35. Minuten, für 2 x 12,5 mm Gipsplatten nach ca. 50 Minuten und für 2 x 18 mm nach ca. 60. Minuten Naturbrandbeanspruchung statt.

Die Umsetzung von wirksamen Löscharbeiten konnte bei den Versuchen V1 bis V4 unabhängig der jeweiligen Holzbauweise zielführend und ohne besondere Maßnahmen erfolgen. Ein Mehraufwand bei den Nachlöscharbeiten in V4 ist auf die Abbildung der Brandlast durch Holzrippen zurückzuführen, welche auch bei einer nichtbrennbaren Bauweise vorliegen würde. Hinsichtlich der benötigten Löschmittelmenge liegt diese, entsprechend dem Brand zum Beginn der Löscharbeiten, zwischen 1.500 l und 3.500 l für den Löscharriff inkl. etwaiger Nachlöscharbeiten.

AP 6.1 Entwicklung eines probabilistischen Simulationsmodells

Zur Berücksichtigung des Einflusses von ungeschützten Holzoberflächen für eine Erweiterung des vereinfachten Naturbrandmodells nach DIN EN 1991-1-2/NA wurde ein entsprechender Ansatz erarbeitet. Die zusätzliche Wärmefreisetzungsrate aus den ungeschützten Holzoberflächen (strukturelle Brandlasten) müssen im entsprechenden Modell in den Gleichungen für die Brandlastdichte und der maximalen Wärmefreisetzungsrate für den brandlastgesteuerten Brandfall berücksichtigt werden.

Zur Ermittlung der Abbrandtiefe unter Naturbrandbeanspruchung wurden zwei Ansätze untersucht. Ein vereinfachter Ansatz berechnet die Abbrandtiefe über das Zeitintervall bei dem die Raumtemperatur oberhalb 300 °C liegt unter Verwendung der in DIN EN 1995-1-2 gegebenen eindimensionalen (konstanten) Abbrandrate. Der zweite empirisch erarbeitete Äquivalenzansatz gemäß Draft EN 1995-1-2 ermittelt die Abbrandtiefe unter Berücksichtigung einer Regressionsgleichung, die die kumulierte thermische Einwirkung beinhaltet. Eine Überprüfung der Prognosefähigkeit der beiden Ansätze für die Abbrandtiefen gegenüber Versuchsdaten zeigte eine deutlich bessere Prognose der Abbrandtiefen über den Äquivalenzansatz gemäß Draft EN 1995-1-2 auf.

Die aktuelle Fassung des erweiterten Naturbrandmodells weist noch Schwächen bei der Prognose der Raumtemperaturen in der Abkühlphase auf, da das Versagen der Brandschutzbekleidung von anfänglich geschützten Holzbauteilen, wie oben bereits beschrieben, nicht abgebildet werden kann. Zusätzlich bleibt eine abschließende Parameterstudie mit angeknüpfter Sensitivitätsanalyse zur Überprüfung von Anwendungsgrenzen und Sicherheitselementen offen. Bedingt durch die massive Arbeitsauslastung der Aufgaben in Arbeitspaket 2 konnte die abschließenden Punkte nicht erbracht werden.

Ergänzend und verifizierend zum vereinfachten Verfahren für die Ermittlung der Brandraumtemperatur über das erweiterte Naturbrandmodell erfolgt die Erarbeitung von Ansätzen zur Berücksichtigung von ungeschützten Holzbauteilen für allgemeine Verfahren. Für diese numerische Betrachtung wird das Computer Fluid Dynamics (CFD) Programm Fire Dynamics Simulator (FDS) in der Version 6.7.1 verwendet.

Zur Berücksichtigung des Beitrages von ungeschützten Holzbauteilen am Brand findet der Ansatz eines erarbeiteten Pyrolysemodells zur Abbildung der thermischen Zersetzung bzw. Wärmefreisetzungs von Holz Anwendung. Die komplexe Zersetzung von Holz wird hier vereinfacht in einer dreistufigen Zersetzungsreaktion erfasst.

- Dehydratation – endothermer Vorgang

- Pyrolyse – exothermer Vorgang
- Oxidation – exothermer Vorgang

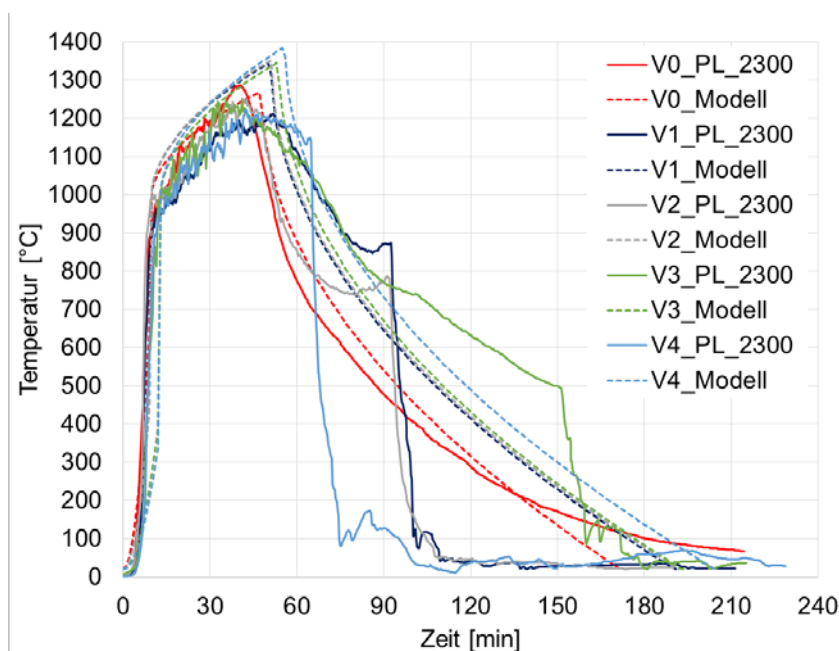
Das Kalibrieren und Validieren des Pyrolysemodells fand anhand recherchierter Ergebnisse thermogravimetrischer Analysen (TGA) und Cone-Kalorimeter Untersuchungen von Holz statt. Der Zersetzungsvorgang wird mittels Arrhenius-Gleichung dargestellt. Die notwendigen Eingangsparameter der Arrhenius-Gleichung, präexponentieller Faktor und Aktivierungsenergie, wurden über die recherchierten Ergebnisse der thermogravimetrischen Analyse iterativ angenähert.

Zur Ermittlung von anzusetzenden Versagenswahrscheinlichkeiten der Brandschutzbekleidung sowie der Bewertung des Raumabschlusses von Holzbauteilen sind vollprobabilistische Analysen vorgesehen. In einem erarbeiteten Ablaufschema erfolgte erst nach der Grundlagenermittlung und der Eingangsdatenbestimmung die Durchführung der Zuverlässigkeitsanalyse. Hierbei muss eine automatisierte Zusammenstellung der Eingangsgrößen aus streuenden und parametrisierten Größen erfolgen. Anschließend findet im selben Schritt die thermische Analyse, zur Ermittlung der Bauteiltemperaturen, und der Zuverlässigkeitsanalyse, zur Überprüfung ab welchem Zeitpunkt die Grenzzustandsgleichung nicht mehr erfüllt wird, statt. Damit die aus der Zuverlässigkeitsanalyse bestimmte Versagenswahrscheinlichkeit allgemeingültig ist, sind hierfür mehrere tausend Rechendurchläufe notwendig, wobei für jeden Durchlauf die Eingangsgrößen neu zusammengestellt werden. Im Anschluss lässt sich auf Basis der Ergebnissumme der vorangegangenen Zuverlässigkeitsanalyse eine Sensitivitätsanalyse durchführen, die die Eingangsgrößen entsprechend dem Einfluss am Gesamtergebnis ausgibt.

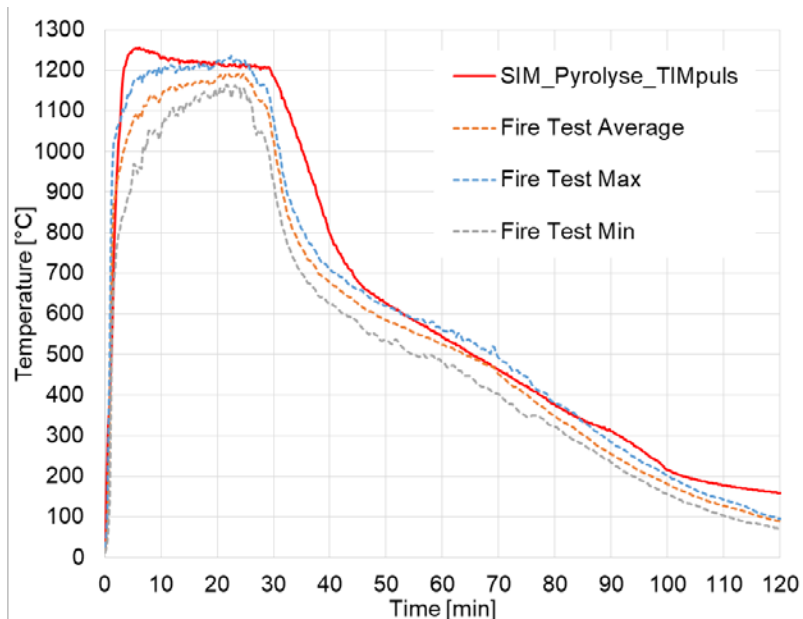
Infolge der nicht abgeschlossenen Arbeiten in für eine thermische Analyse unter Naturbrandbeanspruchung und der fehlenden Kalibrierung des erweiterten Naturbrandmodells ist die Umsetzung der vollprobabilistischen Analysen zwar möglich, jedoch nicht zielführend. Bei der Anwendung von Submodellen (Finite Element Modell, erweitertes Naturbrandmodell) sollten die Unsicherheiten und der Fehler dieser weitestgehend reduziert werden, da sonst die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse durch die Fehlerfortpflanzung schwerer zu deuten sind, sowie keine belastbare Aussage mehr ermöglichen.

AP 6.2 Simulation auf Basis gesammelter Daten und Ergebnisse

Eine Bereichsweise gute Übereinstimmung ist zwischen den Berechnungsergebnissen des erweiterten Naturbrandmodells und den aufgezeichneten Brandraumtemperaturen der Belegversuche erkennbar. Zur Abbildung von V0 ist das Ausgangsmodell gemäß DIN EN 1991-1-2/NA herangezogen, welches eine sehr gute Übereinstimmung aufweist. Die Abweichungen mit dem erarbeiteten, erweiterten Naturbrandmodell gegenüber den Versuchsdaten V1 bis V4 lassen sich in den Maximaltemperaturen und in der Abkühlphase feststellen. Dieses beruht zum einen an der Anwendungsgrenze der Brandlastdichte aus mobilem und strukturellem Anteil von maximal 1.300 MJ/m² und zum anderen an der fehlenden Berücksichtigung des Beitrages der anfänglich geschützten Holzbauteile. Aktuell besitzt das erweiterte Naturbrandmodell nicht die Eingangsbedingungen zur Berücksichtigung des Versagens einer Brandschutzbekleidung und dem zusätzlichen Beitrag der anfänglich geschützten Holzbauteile am Brandgeschehen.



Ein Vergleich zwischen den Messdaten eines realmaßstäblichen Brandversuches 40 und dem Simulationsergebnis aus FDS, mit dem Pyrolysemodell für die ungeschützten Holzbauteile, zeigt eine sehr gute Abbildung der Versuchsdaten.



Die Simulation der Belegversuche im TIMpuls kann aufgrund der Umsetzung der Belegversuche Anfang 2021 und der zugrundeliegenden Rechendauern der Simulationen von ca. 4 – 6 Wochen nur oberflächlich bearbeitet werden. Beginnend erfolgt eine Kalibrierung des Simulationsmodells mittels der Versuchsdaten aus V0 hinsichtlich der mobilen Brandlast. Sofern die Kalibrierung abgeschlossen ist folgt die Ergänzung des Pyrolysemodells für die ungeschützten Bauteile (strukturelle Brandlast) für die Simulation von V1 und V2. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes ist die Kalibrierung noch nicht abgeschlossen.

AP 8.1 Entwicklungen von Bauteilaufbauten und –fügungen

Parallel zur Planung, Umsetzung und Auswertung der Brandversuche fand eine Entwicklung von Bauteilaufbauten und –fügungen statt. Hierbei sind auch die bewährte Datenbank für klassifizierte Holzbauteile dataholz.eu sowie Erkenntnisse themenverwandter Forschungsvorhaben oder Publikationen miteinbezogen.

Für die Ausbildung der Brandschutzbekleidung sind entsprechende Vorschläge (90 min ETK → 2 x 18 mm (36 mm) bzw. 15 mm + 18 mm (33 mm); 60 min ETK → 2 x 15 mm (30 mm) bzw. 1 x 25 mm und 30 min ETK → 1 x 18 mm) dargestellt und in Versuchen analysiert worden.

AP 8.5 Vorschlag auf bauaufsichtlicher Ebene

Gemäß den Erkenntnissen aus den TIMpuls Forschungsvorhaben erfolgte die Ausformulierung einer Stellungnahme zur Anhörung der M-HolzBauRL (Fassung Mai 2020). Außerdem findet eine regelmäßige Vorstellung der Forschungsergebnisse bzw. Empfehlungen über die projektbegleitenden Sitzungen oder über Beiträge in den Sitzungen der Fachgruppe Holzbau (Erarbeitung der MM-HolzBauRL) statt.

AP 9 Dissemination

Zusammen mit den beteiligten Projektpartnern wurde der Folgeantrag TIMpuls - Dissemination erarbeitet und eingereicht, welcher die erlangten Erkenntnisse und Ergebnisse in die Anwenderkreise weiterleiten soll. Hiermit soll eine zügige und zielorientierte Weiterleitung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens TIMpuls in die Praxis ermöglicht werden.

4.3 Teilvorhaben 3 „Anlagentechnischer Brandschutz und Nachbrandverhalten“

4.3.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 3 beschäftigte sich im Besonderen mit dem Brandverhalten von Holzbauteilen in der abklingenden Brandphase. Es wurde sowohl das Selbstverlöschen von Holz- und Holzbauteilen untersucht, als auch das Ablöschen infolge eines Löschangriffes der Feuerwehr oder durch anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen.

Es wurde untersucht, unter welchen Bedingungen Holzbauteile, die durch eine Brandeinwirkung bedingt in Brand geraten sind oder glimmen bzw. schwelen, wieder selbstständig verlöschen. Daraus können Gebäudekonzepte und Bauteile definiert werden, die einen Brandverlauf, ohne Löschmaßnahmen, ohne Verlust der Tragfähigkeit und des Raumabschlusses überstehen. Die Untersuchungsergebnisse zum Nachbrand- und Löschverhalten bilden eine wesentliche Grundlage für die Erweiterung des in DIN EN 1991-1-2/NA [21] enthaltenen Konzeptes zur Naturbrandbemessung, welches ein gemeinsames Kernziel der Verbundpartner des Vorhabens darstellt.

Im Rahmen der Risikobeurteilung von mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweisen wurde die semi-quantitative Risikomethode für Holzbauten der Gebäudeklasse 4 (FRIM-MAB-D) weiterentwickelt, so dass mit dieser eine risikogerechte Beurteilung von Holzbauten der Gebäudeklasse 5 möglich ist.

Einen weiteren Schwerpunkt des Teilvorhabens bildete die Beurteilung der Nachhaltigkeit (Umweltbelastung, Wirtschaftlichkeit, Funktionalität) der entwickelten Brandschutzlösungen. Diese wurden mit üblichen Massivbau- und den derzeitigen Holzbaukonzepten in der Gebäudeklasse 5 verglichen.

Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1.4 Brandverhalten (Löschverhalten und Selbstverlöschen) von Holzbauteilen

AP 1.5 Lösungsansätze für haustechnische Installationen

AP 1.6 Schutzzieldefinition und Sicherheitskonzept

AP 2.1 Raumbrandversuche unter Naturbrandbeanspruchung

AP 2.2 Bauteilversuche in Normbrandofen unter ETK und Naturbrandkurven

AP 2.3 Versuche zur Löschbarkeit und zum Brandentstehungsrisiko

AP 2.4 Analytische Auswertungen der Messdaten

AP 2.7 Durchführung ganzheitlicher Belegversuche im Realmaßstab

AP 3.1 Ingenieurmodell zum Selbstverlöschen von Holzbauteilen

AP 3.2 Konzept zur Durchführung von Naturbrandnachweisen für Holzbauteile

AP 5.1 Technische Möglichkeiten und Ausfallwahrscheinlichkeiten

AP 5.2 Vorschläge zur anlagentechnischen Auslegung mehrgeschossiger Gebäude in Holzbauweise

AP 6.1 Entwicklung eines probabilistischen Simulationsmodells

AP 6.3 Ableitung und Definition von Anforderungen

AP 6.4 Ganzheitliche Musterkonzepte

AP 8.1 Entwicklungen von Bauteilaufbauten und –fügungen

AP 8.5 Vorschlag auf bauaufsichtlicher Ebene

AP 9 Dissemination

4.3.2 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

AP 1 – Theoretische Grundlagenermittlung

Im Rahmen der Grundlagenermittlung des Arbeitspaketes 1.4 „Brandverhalten“ wurden bisherige Forschungsarbeiten zum Selbstverlöschten und Löschverhalten, infolge des Löschangriffs der Feuerwehr oder anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen, von Bauteilen aus Baustoffen nachwachsender Rohstoffe zusammengefasst. Die Recherchen umfassen mehrere Datenbanken (Fachdokumentation Brandschutz, Fraunhofer IRB, umfassende Veröffentlichungen des Karlsruher Institutes für Technologie, Holzforschung Austria, Lignum Holzwirtschaft Schweiz). In Arbeitspaket 1.5 „Lösungsansätze Haustechnik“ erfolgte eine Zusammenstellung aktuell zugelassener Abschottungssysteme für den Holzbau, bzw. anderer Bauweisen in Verbindung mit Ausführungs- und Überführungsvorschlägen der Hersteller in die Holzbauweise. Hierbei kann auf weinige direkt für den Holzbau zugelassene Systeme zurückgegriffen werden. In vielen Fällen werden jedoch Abschottungen konventioneller Bauweisen wie dem Mauerwerksbau und dem Stahlbetonbau eingesetzt, die beispielsweise durch den Einbau eines Stahlbetonrahmens in eine Holzbalkendecke nutzbar gemacht werden. Im Rahmen des Arbeitspaketes 1.6 „Schutzzieldefinition“ erfolgte die Recherche zu den brandschutztechnischen Grundanforderungen in Bezug auf die natürlichen Lebensgrundlagen (Umwelt) und der anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen.

AP 2 – experimentelle Brandversuche, numerische Untersuchungen und AP 3 – Nachbrand- und Löschverhalten

Im Arbeitspaket 2 wurde das Nachbrand- und Löschverhalten von Holz und Holzbauteilen in Brandversuchen im Labor- (Abbildung 319) und Realmaßstab untersucht. Die Brandversuche belegen Einflüsse und Randbedingungen auf das Nachbrand- und Abkühlverhalten von Bränden in Räumen in Holzbauweisen. Die durchgeführten Großbrandversuche in Brandöfen sowie die abschließenden Belegversuche wurden durch die anwesende Berufsfeuerwehr gelöscht. Das Löschgerät der Feuerwehr wurde um ein Durchflussmessgerät, welches die Wassermenge in Liter je Sekunde erfasst, des Projektpartners IBK Heyrothsberge ergänzt. Die aufgezeichneten Daten zum Löschwasserdurchfluss wurden verwendet, um die Löscharbeit der Holzkonstruktionen in Nutzungseinheiten und Brandabschnitten äquivalent zum Massivbau nachzuweisen. Das Beschreiben des Nachbrand- und Löschverhaltens erfolgte jeweils im Abschnitt des entsprechenden Brandversuchs. Weiterführend wurde im Rahmen einer umfangreichen Recherche das Nachbrand- und Löschverhalten internationaler Großbrandversuche mit Brandräumen in Holzbauweise betrachtet. Auf Grundlage der Ergebnisse der Brandversuche und der Recherchearbeit wurde im Arbeitspaket 3 dokumentiert, bis zu welchem Grad die raumbildenden Bauteile mit brennbaren, bzw. nichtbrennbaren (bekleideten) Oberflächen ausgeführt werden, um wirksame Löscharbeiten durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr oder ein Selbstverlöschten der Brände zu ermöglichen. Als weiterer Lösungsweg wurde die Modifikation von Holz-Beton-Verbunddecken (HBV) untersucht. Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgte die Planung, Vorversuche (siehe Abbildung 320), realmaßstäbliche Herstellung (siehe Abbildung 321) und Brandprüfung als Großbrandversuch im Brandofen einer modifizierten HBV-Decke. Durch das Einlegen einer zusätzlichen Bewehrung und veränderten Auflagerbedingungen wurde ermöglicht, dass der Brand spätestens nach Erreichen der Betonschicht zum Erliegen kam. Es wurde rechnerisch nachgewiesen, dass der verbleibende Stahlbetonrestquerschnitt weiterhin in der Lage ist, die im Brandfall deutlich reduzierten Lasten tragen zu können. In Kombination der genannten Bauteile erscheint somit für von unten unbekleidete Holz-Beton-Verbunddecken (häufiger Bauherren- und Architektenwunsch) mit nichtbrennbar bekleideten Wandbauteilen ein erfolgreicher Tragfähigkeitsnachweis im Brandfall im Rahmen des bauaufsichtlich zugelassenen Naturbrandverfahrens nach DIN EN 1991-1-2 [1] möglich.

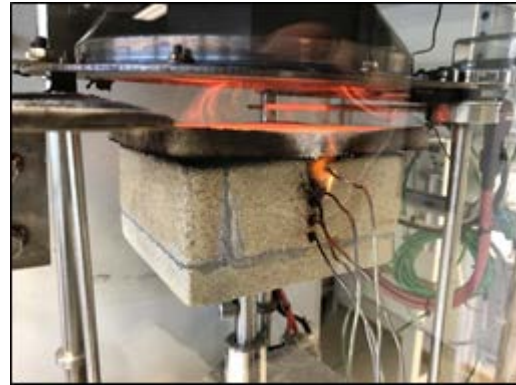


Abbildung 319: Ungeschützter (links) und bekleideter Holzprobekörper (rechts) im Cone-Kalorimeter



Abbildung 320: Brandofen zur Feuerwiderstandsprüfung in Anlehnung an DIN EN 1363-1 (Bauteilofen) als Visualisierung (links), Versuchsstand (Mitte), und HBV-Probekörper horizontal (rechts)



Abbildung 321: Holzschicht und Bewehrungslage der Holz-Beton-Verbunddecke in der Herstellung (links) und Ausführung von Temperaturmessstellen in der Grenzschicht zwischen Holz und Beton sowie an der Bewehrung (rechts)

AP 5 – Anlagentechnische Schutzmaßnahmen

Es wurden internationale Großbrandversuche in Brandräumen in Holzbauweise mit installierten Sprinkleranlagen ausgewertet. Weiterhin wurden das Prinzip, verschiedene Anlagentypen und die Relevanz von Sprinklern für den mehrgeschossigen Holzbau dargestellt. Abschließend erfolgte die exemplarische, hydraulische Auslegung von Wohnraumsprinkleranlagen für mehrgeschossige Wohngebäude in Holzbauweise entsprechend DIN EN 16925 [209] und VdS 2896 [225], siehe Abbildung 322. Es wurde dargestellt, dass Wohnraumsprinkler mit geringeren Anforderungen an die Löschwasserversorgung, gegenüber Sprinkleranlagen für die Industrie oder Gewerbebereich, technische realisierbar und ökonomischer sind.

erforderlicher Betriebsdruck der Löschwasserversorgung je Geschoss

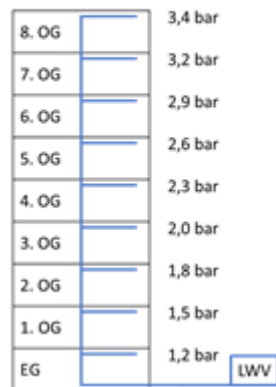


Abbildung 322: Erforderlicher Betriebsdruck der Löschwasserversorgung von Wohnraumsprinklern je Geschoss, bei zwei ausgelösten Sprinklern, WB = 2,1 mm/min, k-Wert = 57

AP 6 – Risikoanalyse und Bewertung

Arbeitspaket 6 umfasste die Weiterentwicklung der semi-quantitativen Risikoanalyse FRIM-MAB-D [90] zur Anwendung in der Gebäudeklasse 5. Die Weiterentwicklung der FRIM-MAB-D wurde durch alle Projektbearbeiter begleitet und dem projektbegleitenden Ausschuss präsentiert. Im Rahmen des Abschlussberichts wurde eine semi-quantitative Risikoanalyse verschiedener Vorschläge zur Fortschreibung der Muster-Holzbaurichtlinie in den Gebäudeklassen 4 und 5 in Holztafel- und Holzmassivbauweise durchgeführt und deren Sicherheitsindex ermittelt.

Tabelle 79: Risikoindizes der Vorschläge für die Gebäudeklasse 5

	1	2	3 a	3 b	4 a	4 b	5 a	5 b	6
Bezeichnung	MBO	M-Holz-BauRL (Holzmassiv)	bekleideter Holztafelbau		Holzmassivbau 75 % unbekleidet		Holzmassivbau 50 % unbekleidet		Löschanlage
Bauteile	REI 90 (nb)	REI 90 75% K ₂ 30; 25% K ₀	REI 90 K ₂ 60 (nichtbrennbar Dämmstoffe)		REI 90 75% K ₂ 60; 25% K ₀	REI 90 75% K ₂ 30; 25% K ₀	REI 90 75% K ₂ 60; 25% K ₀	REI 90 50% K ₂ 30; 50% K ₀	REI 90 K ₀
max. Größe der NE	≤ 1600m ²	≤ 200 m ²	≤ 200 m ²	≤ 1600 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 400 m ²	≤ 1600 m ²
Personenrettung	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW	2 bauliche RW	RW + FW
Autom. Brandmeldung	batterie. RWM	batterie. RWM	batterie. RWM	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	vernetzte RWM*	Löschanlage mit Alarm
Autom. Löschanlage	-	-	-	-	-	-	-	-	

NE = Nutzungseinheiten, nb = nichtbrennbare Bauweise (bspw. Mauerwerk), RW = Rettungswege, FW = Feuerwehr, * = beispielsweise nach DIN VDE V 0826

AP 7 – Lösungsansätze hinsichtlich Nachhaltigkeit, Sanierungsmöglichkeit, Wirtschaftlichkeit

Im Arbeitspaket 7 erfolgte die vergleichende ökologische Bewertung von Wandbauteilen in Holzbauweisen sowie Stahlbetondecken und Holz-Beton-Verbunddecken. In Abbildung 323 ist ersichtlich, dass für eine vergleichende Bewertung der Ressourcennutzung und Umweltwirkung der verschiedenen Bauweisen insbesondere die Entscheidung der zu berücksichtigenden Lebenszyklusphasen maßgebend ist. Werden die Module A1, A2, A3, C3 und C4 berücksichtigt, wird im Lebenszyklus einer Holztafelbauwand mit Bekleidung aus Gipsplatten weniger kg CO₂-Äquivalent freigesetzt, als bei Holzmassiv- und Massivbauweisen (Mauerwerk). Die Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze (D), beispielsweise durch Recycling oder Wiederverwendung, werden nur informativ berücksichtigt, da die Substitution der eigentlich erforderlichen Ressourcen außerhalb des betrachteten Gebäudes wirkt. Werden diese Vorteile des Moduls D im Rahmen der Bilanzierung berücksichtigt, wird der ökologische Nutzen von Holzmassivbauweisen aufgrund ihrer thermischen Verwertung deutlich.

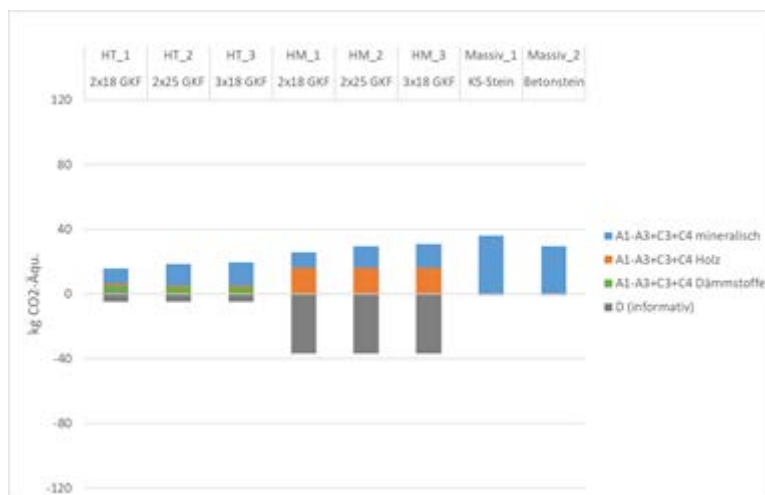


Abbildung 323: Ergebnisse der ökologischen Bewertung, Module A+C zusammengefasst, D informativ

Die geplante Kostenschätzung der erarbeiteten Gesamtlösungen in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern wurde angestrebt. Es erfolgte umfangreiche Anfragen Industriepartner und Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses. Angefragt wurden insbesondere auf realen Bauvorhaben basierende Kostenschätzungen/-berechnungen in den Planungsphasen und Kostenfeststellungen der Abrechnung des Vorhabens. Ziel war es, systematische Abweichungen der Kostenermittlung in der Planungs- und Bauphase von Gebäuden in Holzbauweise festzustellen. Die Daten sollten genutzt werden, um bei Alternativlösungen den kostengünstigeren Weg zu favorisieren. Aufgrund der Rückmeldungen und Verfügbarkeit der Industriepartner konnte die vorgesehene Untersuchung nicht durchgeführt werden. Die Komplexität der ökonomischen Bewertung von Gebäuden in Holzbauweise resultiert in die Empfehlung zur Entwicklung eines separaten Forschungsvorhabens.

AP 8 – Leitlinie für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise bis zur Hochhausgrenze

Gemäß den Erkenntnissen aus den TIMpuls Forschungsvorhaben erfolgte die Ausformulierung einer Stellungnahme zur Anhörung der MHolzBauRL (Fassung Mai 2020). Außerdem fanden regelmäßige Vorstellung der Forschungsergebnisse bzw. Empfehlungen über die projektbegleitenden Sitzungen oder über Beiträge in den Sitzungen der Fachgruppe Holzbau statt.

AP 9 – Wissenstransfer

Zusammen mit den beteiligten Projektpartnern wurde der Folgeantrag TIMpuls – Dissemination erarbeitet und eingereicht, welcher die erlangten Erkenntnisse und Ergebnisse in die Anwenderkreise weiterleiten soll. Hiermit soll eine zügige und zielorientierte Weiterleitung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens TIMpuls in die Praxis ermöglicht werden.

4.4 Teilvorhaben 4 „Durchführung großmaßstäblicher Brandversuche

4.4.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das vorrangige Ziel dieses Teilvorhabens ist die Durchführung von realmaßstäblichen Belegversuchen, wobei die Durchführung aus logistischen Gründen bezüglich der Gebäudeelemente nach Garching verlegt wurde. Das IBK Heyrothsberge hat bei der gesamten Umsetzung der Versuche durch Messtechnik für Temperatur und Strömungsmessungen unterstützt. In diesem Teil soll kurz auf die Messtechnik und die Auswertemethoden, die zu den Ergebnissen im Abschlussbericht geführt haben, eingegangen werden. Der weitere Inhalt dieses Abschlussberichtes umfasst die Aufgaben zur Bereitstellung von Informationen des Abwehrenden Brandschutzes im Zusammenhang mit der Entwicklung des Holzbaus in Deutschland und weltweit. Hierfür wurde durch das IBK Heyrothsberge eine Recherche über einen möglichen Einfluss des Holzbaus auf die Einsatztaktiken der Feuerwehren anderer Länder durchgeführt. Zum anderen wurde eine Onlineumfrage bei den Feuerwehren in Deutschland umgesetzt, um das Meinungsbild zu der Entwicklung des Holzbaus zu erfassen.

4.4.2 Bearbeitete Arbeitspakete

AP 2.7: Durchführung realmaßstäblicher Belegversuche

Die Durchführung der realmaßstäblichen Belegversuche erfolgte in Garching, nicht in Heyrothsberge. Entsprechend hat die TU München den überwiegenden Anteil bei den Vorbereitungen übernommen. Für die Durchführung der Versuche Anfang 2021 erfolgte eine Aufgabenverteilung der verschiedenen messtechnisch zu erfassenden Zielgrößen unter den Projektpartnern. Das IBK stellte für die Erfassung der Brandraumtemperaturen, die Strömungsgeschwindigkeiten in der Öffnung und an der Fassade sowie zur Erfassung des Löschwasserverbrauches Messtechnik sowie weitere erforderliche Materialien zur Verfügung. Die Ergebnisse dieser Messgrößen sind im gemeinsamen Abschlussbericht dargestellt. An dieser Stelle soll über die verwendete Messtechnik ein kurzer Überblick gegeben werden. Ebenfalls wird auf die weitere Bearbeitung der Messergebnisse bis zu den dargestellten Ergebnissen im gemeinsamen Abschlussbericht eingegangen.

Temperaturmessungen in den Brandräumen:

Die verwendeten Thermoelemente in den einzelnen Versuchen zur Erfassung der Brandraumtemperaturen sind in der Tabelle 80 dargestellt. Wie in dieser Auflistung zu sehen ist, wird der übliche Thermoelementtyp K in allen Versuchen verwendet. Die anfänglich verwendeten Mantelthermoelemente mit 1 mm Durchmesser mussten aufgrund mehrerer Ausfälle in den ersten beiden Versuchen, was auch in den Ergebnissen zu sehen ist, durch 3 mm Mantelthermoelemente ab dem Versuch V2 ersetzt werden.

Tabelle 80: Thermoelemente zur Bestimmung der Brandraumtemperaturen

Versuch	Thermoelemente Typ	Durchmesser	Anzahl Messbäume/ Anzahl Thermoelemente
V0	Typ K	1 mm	4 Messbäume / 20 Thermoelemente
V1	Typ K	1 mm	4 Messbäume / 20 Thermoelemente
V2	Typ K	3 mm	4 Messbäume / 20 Thermoelemente
V3	Typ K	3 mm	6 Messbäume / 30 Thermoelemente
V4	Typ K	3 mm	6 Messbäume / 30 Thermoelemente

Für einen besseren Überblick und zum Vergleich der einzelnen Versuche wurde für die Auswertung der Brandräume eine Datenkomprimierung durch die Bildung von Mittelwerten aus den gemessenen Brandraumtemperaturen in jeder Höhenebene vorgenommen. Die einzelnen Messstellen einer Ebene unterliegen aufgrund der zeitlichen Ausbreitung des Feuers im Brandraum und der Entwicklung der verschiedenen Wand- und Deckenkonstruktionen dabei gewissen Schwankungen, die für eine detaillierte Auswertung von Bauelementen relevant sind und deshalb hier kurz näher erläutert werden sollen.

Temperaturschwankungen treten besonders bei den unteren Messstellen des Brandraumes (50 cm Höhe im Brandraum) auf. Mit steigender Höhe der Messstellen fallen die Schwankungen in ihrer Intensität geringer aus. Für einen Eindruck sind beispielhaft die Temperaturverläufe von V3 in 50 cm Höhe und 200 cm Höhe in der Abbildung 324 dargestellt. Die Ursache für die Schwankungen in der 50 cm Ebene ergeben sich vor allem aufgrund der notwendigen Zeit, bis die Wärme sich auf dieser Ebene des

Brandraumes gleichmäßig ausgebreitet hat. Zum anderen befinden sich die Messstellen zwischen den einzelnen Holzkrippen, wodurch eine direkte Einwirkung von Wärmestrahlung am Anfang auf die Thermoelemente nicht stattfindet und entsprechend der Anstieg dieser Messpunkte im Vergleich zu höheren Ebenen ungleichmäßig erfolgt. Ebenfalls findet in dieser Ebene die Luftzufuhr von außen über die Öffnung für das Feuer statt. Entsprechend fallen die Temperaturen an den Messstellen im Bereich des Einganges kühler aus. Mit zunehmender Höhe im Brandraum sinken die Schwankungen der Messwerte um die gemittelten Brandraumtemperaturen. Als Beispiel hierfür ist in der Abbildung 324 auf der rechten Seite der Temperaturverlauf der maximalen und minimal gemessenen Temperaturen für die Höhe 200 cm dargestellt. Bis auf die anfänglichen Schwankungen zwischen der 10. Minute und der 60. Minute, welche deutlich kleiner ausfallen als in der 50 cm Messebene, sind geringe Temperaturunterschiede in der Abkühlphase ab etwa der 80. Minute zu erkennen. Diese entstehen aufgrund des unterschiedlichen Versagens der Brandschutzbekleidungen und der entsprechenden Brandentwicklung an den Wänden.

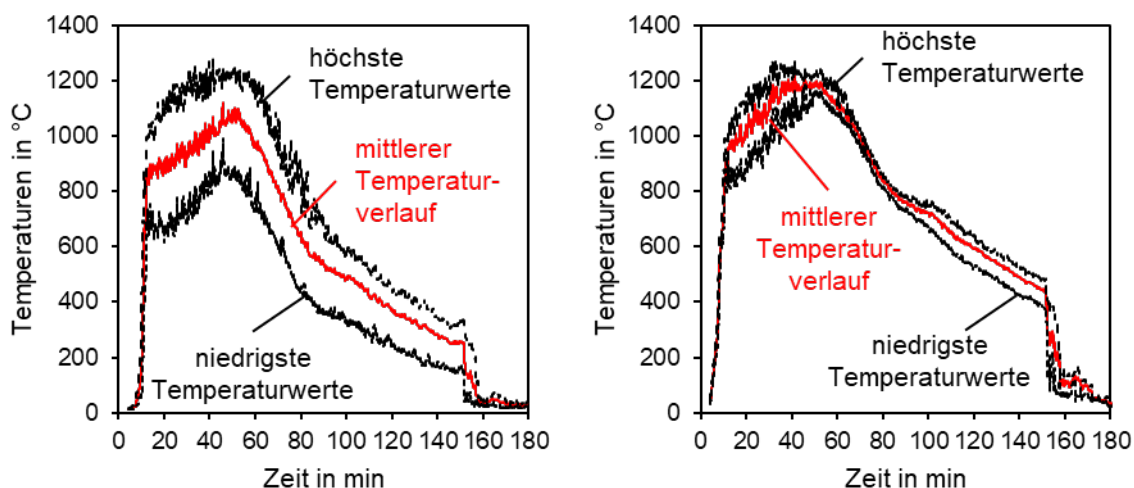


Abbildung 324: Darstellung des Temperaturschwankungsbereichs (min. und max. auftretende Temperaturen) in der Ebene 50 cm (links) und 200 cm (rechts) der Brandraumtemperaturdaten für die Mittelung beispielhaft für den V3

Somit sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Mittelung der Brandraumtemperaturen und der damit verursachten Unschärfe, welche sich hauptsächlich auf der untersten Ebene der Brandräume ausprägt, zu Gunsten eines besseren Überblicks und der einfacheren Vergleichbarkeit der Brandversuche untereinander akzeptiert worden. Die gemittelten Daten der Brandraumtemperaturen sind für die vergleichende Betrachtung aller Großversuche zufriedenstellend genau.

Strömungsgeschwindigkeit in der Öffnung und an der Fassade:

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten wurden bidirektionale Sonden eingesetzt, welche den Differenzdruck messen, der sich aufgrund einer anliegenden Strömung in den Sonden ergibt. Die Erfassung des Differenzdruckes erfolgte mit Differenzdruck-Messumformer vom Typ Setra Model 264 mit einem Messbereich von -25 Pa bis +25 Pa. Für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten ist die Dichte der Strömung und hierfür entsprechend die Messung der Temperatur erforderlich. Die Temperatur der Strömung wurde mit einem Thermoelement vom Typ K bestimmt. Die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit mit den verwendeten Sonden ergibt sich nach der folgenden Gleichung:

$$v_{\text{Sonden}} = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{2\Delta p T}{\rho_0 T_0}} \quad \text{mit } K = 1,08, \rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3 \text{ und } T_0 = 273,15 \text{ K} \quad (1)$$

Bei der Berechnung der Dichte wird für die Strömungsgeschwindigkeit von einem idealen Gas ausgegangen. Zudem wäre bei einem Löschangriff der Einfluss der feuchten Luft für die Berechnung der Dichte zu beachten, da aber bei den Versuchen die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten vor dem Beginn des Löschangriffes abgebrochen wurde, da die Gefahr bestand die Messtechnik durch das Treffen der Sonden mit dem Löschmittel zu beschädigen, kann bei der Berechnung die feuchte Luft vernachlässigt werden.

Die bidirektionalen Sonden waren bei den Versuchen hauptsächlich auf beiden Seiten der Brandraumöffnung und mittig an der Fassade positioniert. Die einzelnen Messstellen für die bidirektionalen Son-

den sind in der nachfolgenden Abbildung 325 mit allen erforderlichen Daten dargestellt. Aufgrund anfänglicher fehlender Sonden wurden in den ersten beiden Versuchen (V0 und V1) die Positionen 2.2 und 2.3 nicht besetzt. In allen anderen nachfolgenden Versuchen sind alle dargestellten Messpositionen mit bidirektionalen Sonden belegt. Leider konnten in manchen Fällen Störungen der Messtechnik trotz großer Bemühungen nicht verhindert werden weshalb eine Auswertung nicht immer möglich war.

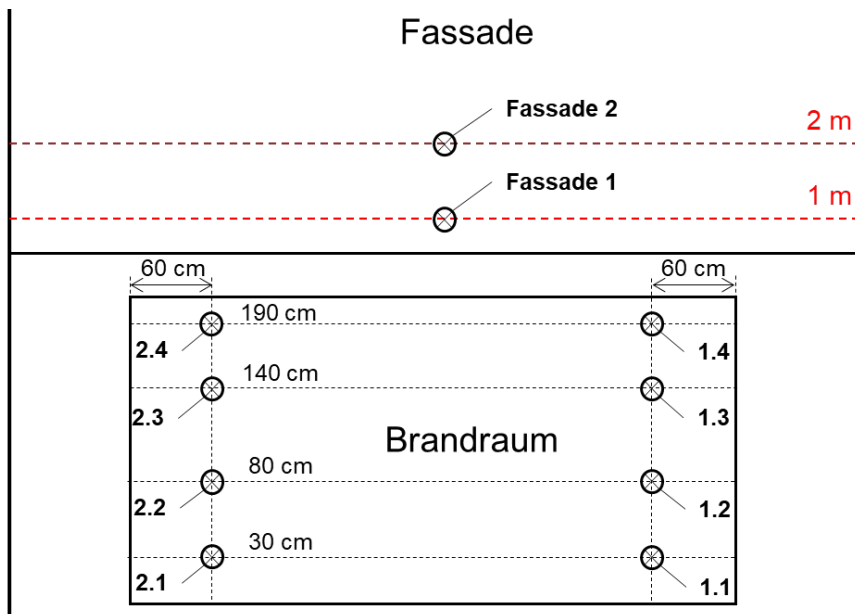


Abbildung 325: Messpositionen der bidirektionalen Sonden in der Öffnung der Brandraum und an der Fassade

Messtechnik zur Bestimmung des Löschmittelbedarfes

Zur Bestimmung des Löschwasserverbrauches wurde ein Präzisions-Turbinen-Durchflussmesser für dünnflüssige Medien vom Typ DR12 S10 80 von der Firma PKP Prozessmesstechnik GmbH verwendet, der aufgrund von B-Sturzkupplungen in die Schlauchleitungen der Werkfeuerwehr Garching integriert werden konnte.

AP 4.1: Recherche zur Einsatztaktik bei der Brandbekämpfung

An dieser Stelle des Abschlussberichtes sollen für das AP 4.1 kurz die betrachteten Länder, Einrichtungen und Arten an Berichten beschrieben werden, die für die Recherche genutzt wurden. Die Ergebnisse der Recherche sind im gemeinsamen Abschlussbericht zu finden.

Die betrachteten Länder für die Recherche waren für Europa hauptsächlich die skandinavischen Länder Schweden und Norwegen sowie Österreich, Schweiz und Großbritannien. Vereinzelt konnte auch Literatur aus Frankreich, Russland und Polen gesichtet werden. In der Region Nordamerika konnten unterschiedliche Quellen aus den USA und aus Kanada eingesehen werden.

Als Literaturquellen sind Feuerwehrzeitschriften der jeweiligen Länder ausgewertet worden, wobei diese oftmals in der jeweiligen Landessprache verfasst waren. Dies behinderte an der ein oder anderen Stelle die Auswertung. Die Ergebnisse der Feuerwehrzeitschriften umfassten hauptsächlich die Beschreibung von Einsätzen, mögliche Probleme bei der Brandbekämpfung von Holzgebäuden sowie Schlussfolgerungen und Empfehlungen für ein mögliches taktisches Vorgehen bei diesen Einsätzen.

In manchen Ländern wurden zum Thema Brandbekämpfung in Holzgebäuden und anderen ähnlichen Themenbereichen bereits Forschungsprojekte durchgeführt, aus denen Berichte hervorgingen. Die Auswertung der Forschungsberichte stellte sich als sehr informativ heraus, da diese die Situation in den jeweiligen Ländern, z.B. durch Analysen der Brände in verschiedenen Gebäuden und aufstellen mehrerer Statistiken 102,104 umfangreich beleuchteten. Anhand dieser Studien konnte der Mehrwert des Wissens über die Baumaterialien und Konstruktionen beim Einsatzleiter hervorgehoben werden. Auch wurden in Ländern wie den USA, Schweden oder Norwegen Forschungen für ein besseres Verständnis von möglichen Änderungen der Brandphänomene durch den verstärkten Einsatz von brennbaren Baumaterialien und den Einsatz von möglichen Löschmitteln sowie Sondereinsatzmitteln untersucht. Besonders Schweden ist hier hervorzuheben, da dort bereits an Ausbildungskonzepten für den Einsatz

von Löschlanzen oder Schneidlöschsystemen in Kombination mit den Daten von Wärmebildkameras bei den Einsatzkräften erfolgt [106].

Die Literaturrecherche gibt ein Bild des Einflusses des Holzbaus auf die Einsatztaktiken des abwehrenden Brandschutzes wieder. Es ist anzumerken, dass die jeweiligen Länder den Fokus auf die Probleme der im Land schwerpunktmäßig vorhandenen Holzbauweise legen. Die Auslegung des abwehrenden Brandschutzes und der Taktik zur Brandbekämpfung ist somit an Rahmenbedingungen im jeweiligen Land bzw. an die Holzbauweise geknüpft. Dementsprechend ist eine Übertragung der taktischen Empfehlungen auf ein anderes Land nur sinnvoll, wenn ähnliche Anteile der Bauweisen der Holzgebäude in der Region vorliegen. Denn wie oftmals in den Empfehlungen erwähnt wird, richtet sich die Taktik der Brandbekämpfung an der jeweilig vorhandenen Bauweise aus!

AP 4.2: Meinungsbild der Feuerwehren zur Entwicklung des Holzbaus in Deutschland

Die Ergebnisse der Umfrage können im Abschlussbericht nachgelesen werden, an dieser Stelle sollen kurz der Aufbau und die Struktur sowie das verfolgte Ziel des Fragebogens erläutert werden.

Ziele des Fragebogens

Der Fragebogen dient in erster Linie dazu, das Meinungsbild der Feuerwehren in Deutschland zu dem Thema mehrgeschossiger Holzbau zu ermitteln. Dabei soll ein Augenmerk auf mögliche Vorbehalte oder Kritikpunkte sowie Wünsche und Bewertungen der Feuerwehren im vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz von Holzgebäuden geworfen werden. Neben diesen Zielen soll der Fragebogen auch die Erfahrungen von Feuerwehren in der Brandbekämpfung in mehrgeschossigen Holzgebäuden qualitativ identifizieren. Auch eine Bewertung der eigenen Feuerwehr bezüglich Eignung der derzeitigen Ausrüstung und Ausbildung für eine erfolgreiche Brandbekämpfung in einem mehrgeschossigen Holzbau ist Teil des Fragebogens.

Aufbau und Gestaltung des Fragebogens

Die Struktur des Fragebogens richtet sich überwiegend nach den Vorgaben von S. Kirchhoff et. al. 120. Demnach wurde sich bei seiner Erstellung hauptsächlich auf geschlossene oder halboffene Fragen beschränkt. Somit hat die befragte Person in den meisten Fällen Antwortmöglichkeiten vorgegeben, was die Motivation zur Beantwortung der Frage und das dafür erforderliche Verstehen des Inhaltes steigert. Um dennoch den Beteiligten die Chance zu geben ihre eigenen Gedanken und Meinungen zu äußern, besonders wenn die Auswahlmöglichkeiten die Meinung des Befragten nicht widerspiegelt, sind viele der geschlossenen Fragen mit einem freien Textfeld zu einer halboffenen Frage erweitert worden. Bei einigen Fragen wurden auch Mehrfachnennungen von Antworten zugelassen. Neben dem Fragentypus stellt der Aufwand zur Beantwortung einer Frage einen weiteren zu beachtenden Punkt dar, um die Motivation bei den Teilnehmern der Umfrage bis zum Ende beizubehalten. Aus diesem Grund wurde eine obere Grenze von 30 Fragen definiert. Zusätzlich sind Teile des Fragebogens mit qualitativen Antworten oder Schätzungen versehen, da der Aufwand für eine quantitative Abfrage bei manchen Feuerwehren als unverhältnismäßig erschien. Als dritte Maßnahme sind in einigen Abschnitten der Umfrage Filterfragen vorangestellt, die es ermöglichen Fragen auszublenden, die je nach Antwort der Filterfrage für die befragte Person nicht mehr relevant sind. Mittels dieser Maßnahmen sollten die Chancen der vollständigen Abarbeitung des Fragebogens durch die Teilnehmer erhöht werden.

Die Struktur des Fragebogens beinhaltet Titelseite, Informations- bzw. Motivationsseite, eine Datenschutzerklärung nach dem Bundesdatenschutzgesetz (BDSG) 121 und der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) 122 für die Verarbeitung von personenbezogenen Daten, die jeder Teilnehmer bestätigen musste, bevor er zur eigentlichen Befragung im Hauptteil gelangte. Im Hauptteil wurden mehrere Fragen zu verschiedenen Bauweisen des Holzbaus und deren Eigenschaften differenziert. Der Holzbau und die verschiedenen modernen Bauweisen haben ihre Vor- und Nachteile. Aus der Sicht des Abwehrenden Brandschutzes sind die Fragestellungen „Besitzt die Konstruktion des Gebäudes Hohlräume?“ und „Wurden brennbare Dämmmaterialien verwendet?“ von zentraler Bedeutung. Dementsprechend sind einige Fragestellungen und Antworten nach diesen Eigenschaften differenziert zu bewerten. Ansonsten gliederte sich der Hauptteil der Befragung in die folgenden Teilabschnitte:

- Allgemeine Angaben zur eigenen Feuerwehr
- Erfahrungen der eigenen Feuerwehr mit Einsätzen zur Brandbekämpfung in mehrgeschossigen Holzgebäuden
- Bewertung von vorbeugenden Brandschutzmaßnahmen in mehrgeschossigen Holzgebäuden

- Abschätzung von Folgen und Gefahren der Einsatzstelle durch die verstärkte Nutzung von Holz als Baumaterial
- Bewertung der eigenen Feuerwehr bezüglich Ausbildung und Einsatzmitteln
- Meinungen der Feuerwehren zum mehrgeschossigen Holzbau

Das Ende der Umfrage beinhaltet eine obligatorische offene Frage, bei der die Befragten die Chance erhalten Hinweise zum Thema oder zum Fragebogen selbst geben zu können. Auf der letzten Seite der Umfrage werden Kontaktdaten der Ansprechperson für weitere Fragen zur Umfrage, dem Datenschutz und dem Forschungsprojekt TIMpuls benannt.

4.4.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die wesentlichen Ergebnisse dieses Teilvorhabens sind die Darstellung der Empfehlungen anderer Länder für die Brandbekämpfung in mehrgeschossigen Holzgebäuden und das ermittelte Meinungsbild der Berufsfeuerwehren Deutschlands zu der Entwicklung des Holzbaus. Die Auswertungen der Messdaten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse aus den Großversuchen in Garching wurden seitens des IBK aufbereitet und mit den Projektpartnern und deren Daten zusammengefügt. Alle Ergebnisse sind ausführlich im gemeinsamen Abschlussbericht dargestellt. Die Erkenntnisse aus den Großversuchen und den Arbeitspakt 4.1 sowie 4.2 münden entsprechend im AP 4.4 in Empfehlungen zu geeigneten Maßnahmen, um den abwehrenden Brandschutz auf die Brandbekämpfung in Holzgebäuden besser vorzubereiten. Die Empfehlungen sind auch im entsprechenden Kapitel des gemeinsamen Abschlussberichtes zusammengetragen.

4.5 Anhang: Versuchsbericht Nr. 01-08-19 „Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung (ETK) und parametrischer Brandbeanspruchung“



Technische Universität München

Technische Universität München | Arcisstraße 21 | 80333 München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion



Institut für Baustoffe
und Konstruktion
MPA BAU
**Lehrstuhl für Holzbau
und Baukonstruktion**

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

Arcisstraße 21
80333 München
Germany

Tel +49.89.289.22416
Fax +49.89.289.23014

bauko@bv.tum.de
www.hb.bv.tum.de

Versuchsbericht

Nr. 01-08-19

Gegenstand	Abbrandverhalten von Holz unter Normbrandbeanspruchung (ETK) und parametrischer Brandbeanspruchung
Auftraggeber	Technische Universität München
Bearbeiter	Thomas Engel M.Sc. Franziska Heumann B.Ed.
Datum	13. März 2020

Dieser Untersuchungsbericht darf nur ungekürzt verwendet werden. Eine gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion der TU München.

1. Allgemeines

Für die brandschutztechnische Beurteilung von Holzbauteilen ist die, durch das jeweilige Einwirkungsszenario hervorgerufene, Abbrandtiefe und Temperaturverteilung im verbleibenden Bauteilquerschnitt maßgebend. Abbrandraten unter Normbrandbeanspruchung (ETK) sind für verschiedene Holzarten und Konstruktionsformen in der DIN EN 1995-1-2 [1] aufgeführt. Insbesondere in Bezug auf die Holzarten ist diese Liste jedoch noch nicht vollständig. Erkenntnisse zu Abbrandtiefe und Temperaturverteilung bei parametrischen Brandbeanspruchungen liegen nur im begrenzten Umfang vor. Infolge des unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus in der Aufheiz- und Abkühlphase liegt zusätzlich keine zeitliche Konstanz der Abbrandrate mehr vor. Im Rahmen orientierender Brandversuche sollen daher weiterführende Informationen und Erfahrungen hinsichtlich Abbrandraten unter Normbrandbeanspruchung, als auch Abbrandtiefe und Temperaturverteilung bei Naturbrandszenarien bei einseitiger und mehrseitiger Brandbelastung gewonnen werden. Die unterschiedlichen Brandversuche erfolgen im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 [2] unter Berücksichtigung von Messtechnik nach DIN EN 1363-1 [3]. In diesem Prüfbericht werden der Aufbau der Prüfkörper, die Prüfbedingungen und die Ergebnisse der Versuche beschrieben.

2. Prüfkörper und Materialkennwerte

Insgesamt wurden 42 Versuchskörper aus 9 verschiedenen Materialien geprüft (siehe Tabelle 1).

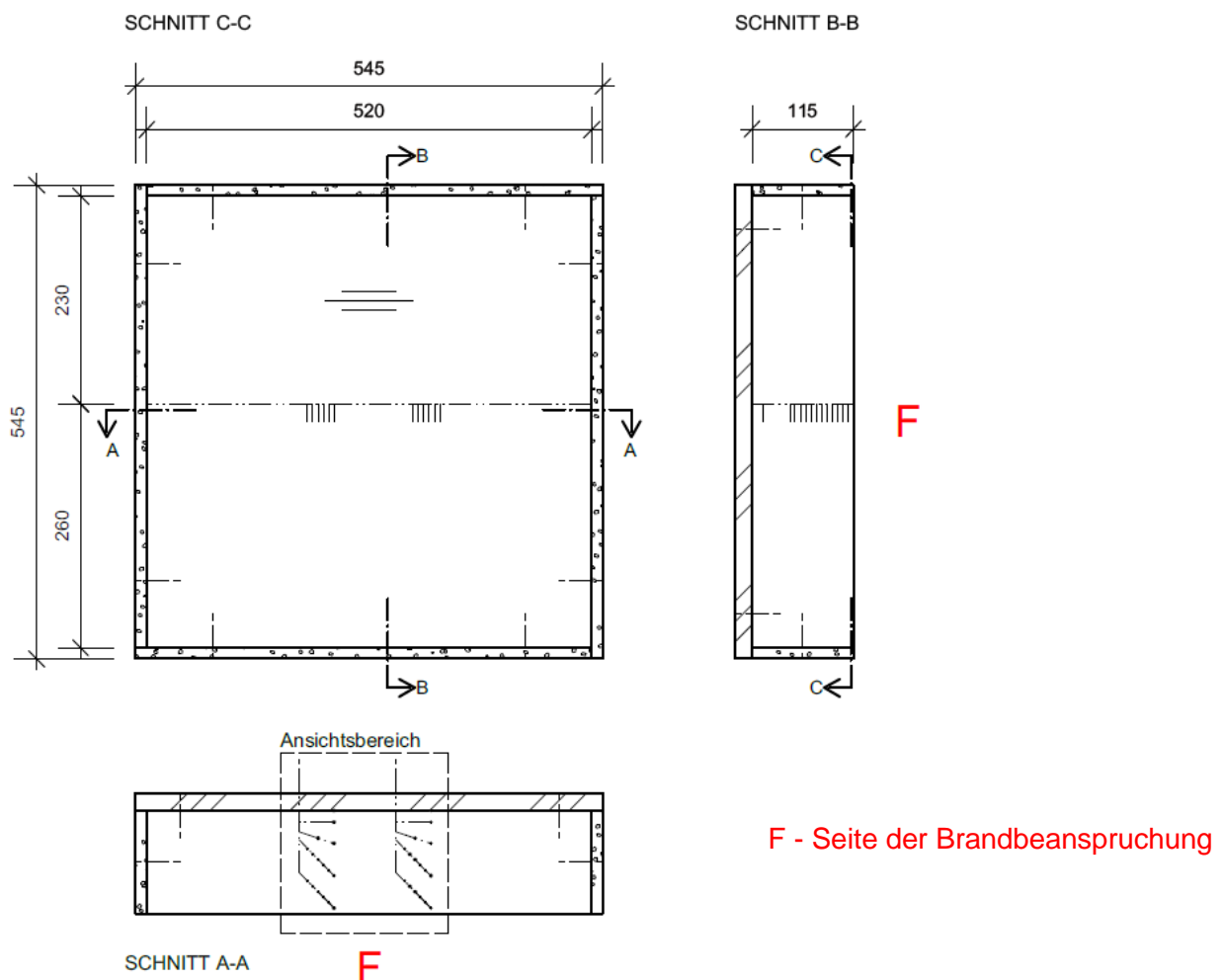


Abbildung 1: Konstruktiver Aufbau der eindimensional beanspruchten Prüfkörper

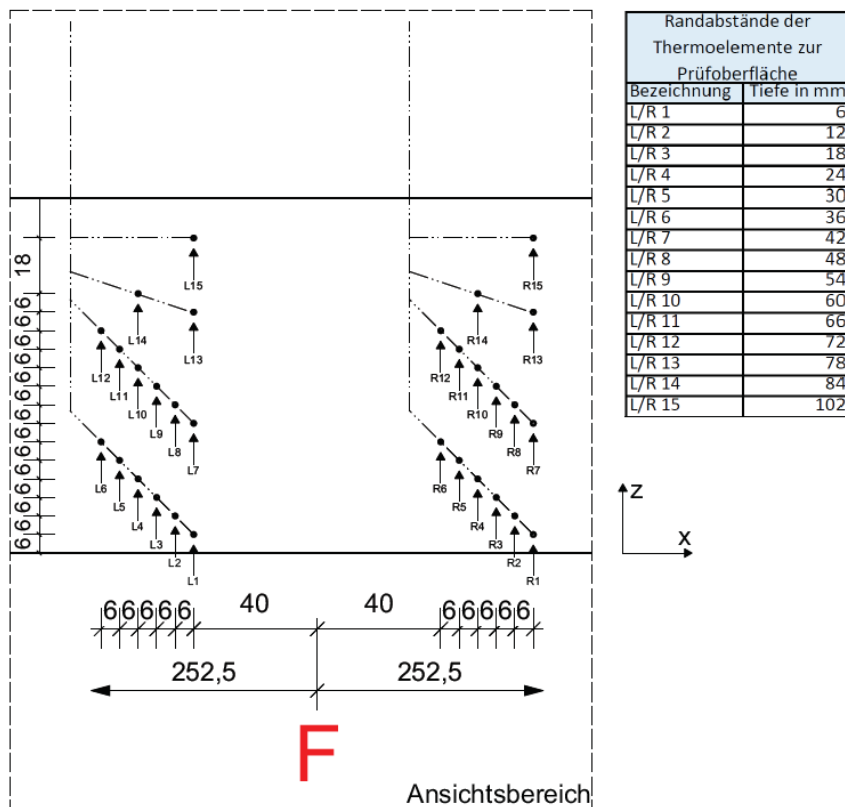
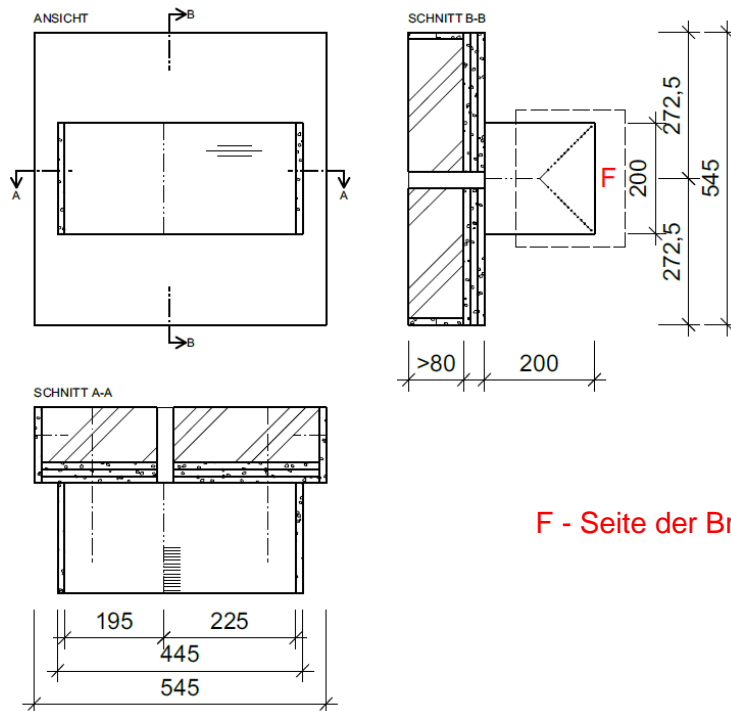


Abbildung 2: Position der Thermoelemente im eindimensional beanspruchten Versuchskörper

Die eindimensional beanspruchten Prüfkörper haben die Abmessungen $L \times B = 545 \text{ mm} \times 545 \text{ mm}$. Dabei beträgt die tatsächlich beanspruchte Fläche $450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$. Die Dicke der Versuchskörper richtet sich nach dem jeweiligen Material, bzw. den verfügbaren Materialstärken.

Die Proben setzen sich zusammen aus 2 Teilen, wobei die ummantelten Drahtthermoelemente vom Typ K in den unteren Teil des Prüfkörpers eingebracht wurden, sodass die Messstellen mittig in der Versuchsfläche liegen (Maße siehe Abbildung 2). Es wurden in jedem Versuchskörper zwei Messbäume angeordnet. Um eine präzise Platzierung der Thermoelemente parallel zur Isotherme zu gewährleisten, wurden die Bohrungen mithilfe einer Bohrschablone an der Ständerbohrmaschine gesetzt. Die Bohrungen haben einen Durchmesser von 2 mm und eine Tiefe von 31 mm, wobei eine gefräste Führungsnut für die Thermoelemente mit einer Tiefe von 6 mm abgezogen wird. Die Thermodrähte laufen also 25 mm entlang der Isotherme, bevor sie in die Führungsnuten nach Außen geführt werden. Diese Fräsgänge wurden nach dem Verlegen der Thermoelemente mit einem nicht brennbaren Kaolin-Klebstoff auf Basis von Porzellanerde verfügt. Die Verklebung der Versuchskörper erfolgte unter Verwendung eines Phenol-Resorcin-Formaldehydklebers (Bez. Aerodux 185). An den Schmalseiten der Prüfkörper wurden Gipsfaserplatten mit einer Dicke von 15 mm umlaufend angebracht, um seitliche Strömungswege und Durchbrände zu vermeiden.



F - Seite der Brandbeanspruchung

Abbildung 3: Konstruktiver Aufbau der dreiseitig beanspruchten Prüfkörper

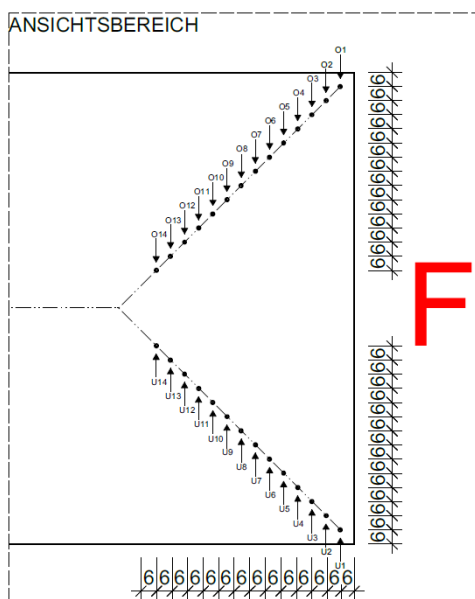


Abbildung 4: Position der Thermoelemente im dreiseitig beanspruchten Versuchskörper

Da die Probekörper für eine dreiseitige Brandbeanspruchung in den Brandraum des Prüfens hineinragen, wurden die mit Thermoelementen versehenen Proben auf einer Trägerplatte befestigt (siehe Abbildung 3). Die Maße dieser Trägerkonstruktion entspricht der Geometrie der Versuchskörper zur Untersuchung des eindimensionalen Abbrandes. Die Abmessungen der mehrdimensional beanspruchten Versuchskörper betragen $L \times B \times T = 420 \text{ mm} \times 200 \times 200 \text{ mm}$. Auch bei diesen Probekörpern erfolgt die Ermittlung der Temperatur im Versuchskörper mithilfe von Drahtthermoelementen des Typs K. Die Messfühler werden in 2 mm Bohrungen eingebracht, welche parallel zur Isotherme verlaufen. Die Messstellen liegen dabei in der Mitte der Versuchskörperlänge. Auch für diese Art der Versuchskörper wurden zwei Orte mit jeweiligen Messpunkten in unterschiedlicher Tiefe festgelegt. Diese laufen im 45° Winkel diagonal von den äußeren Ecken in

Richtung Querschnittsmitte. Die genauen Positionen der Thermoelemente werden in Abbildung 4 veranschaulicht. Die Thermoelemente wurden nach dem Einbringen in die Hirnholzflächen durch gefräste Nuten aus dem Versuchskörper geführt. Die Verspachtelung und Hirnholz-Verklebung erfolgte bzgl. der Ausführung und der verwendeten Materialien analog zu den eindimensional beanspruchten Versuchskörpern. Die Befestigung der Versuchskörper auf der Trägerkonstruktion erfolgte durch Verschraubung, ausgehend von der brandabgewandten Seite der Rückwand. Die Hirnholzflächen wurden während des Brandversuches durch Keramikwolle geschützt.

Tabelle 1: Materialkennwerte der verwendeten Materialien

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Holz	Typ / Holzart	Bemessungsbrand			Beanspruchungsrichtung		Bauteildicke [mm]	Prüfkörper Holzfeuchte [%]	Material Rodichte [kg/m ³]
				gering Naturbrand	mittel (ETK)	hoch Naturbrand	1D	2D			
1	NH_VH_Fi_ETK_1D	Nadelholz	Vollholz Fichte		x		x		114	12,0	484,7
2	NH_VH_Fi_NBH_1D					x	x		114		
3	NH_VH_Fi_ETK_2D				x			x	200 x 200		
4	NH_VH_Fi_NBH_2D					x		x	200 x 200		
5	NH_BSH_Fi_ETK_1D	Nadelholz	BSH Fichte		x		x		118	11,8	507,0
6	NH_BSH_Fi_NBH_1D					x	x		118		
7	NH_BSH_Fi_ETK_2D				x			x	200 x 200		
8	NH_BSH_Fi_NBH_2D					x		x	200 x 200		
9	NH_BSH_Fi_NBG_1D			x			x		118	11,8	507,0
10	NH_BSP_Fi_ETK_1D	Nadelholz	BSP Fichte		x		x		100	10,3	479,2
11	NH_BSP_Fi_NBH_1D					x	x		100		
12	NH_BSP_Fi_ETK_1D_2				x		x		100		
13	NH_BSP_Fi_NBH_1D_2					x	x		100		
14	NH_FSH_Fi_ETK_1D	Nadelholz	FSH LVLX Fichte / Kiefer Steico		x		x		129	10,0	606,9
15	NH_FSH_Fi_NBH_1D					x	x		129		
16	NH_FSH_Fi_ETK_2D				x			x	200 x 200		
17	NH_FSH_Fi_NBH_2D					x		x	200 x 200		
18	LH_VH_Bu_ETK_1D	Laubholz	Vollholz Buche		x		x		115	16,9	675,6
19	LH_VH_Bu_NBH_1D					x	x		115		
20	LH_VH_Bu_ETK_2D				x			x	200 x 200		
21	LH_VH_Bu_NBH_2D					x		x	200 x 200		
22	LH_VH_Bu_NBG_1D			x			x		115		
23	LH_VH_Ei_ETK_1D	Laubholz	Vollholz Eiche		x		x		117	16,8	763,0
24	LH_VH_Ei_NBH_1D					x	x		117		
25	LH_VH_Ei_ETK_2D				x			x	200 x 200		
26	LH_VH_Ei_NBH_2D					x		x	200 x 200		
27	LH_VH_Ei_NBG_1D			x			x		117		
28	LH_BSH_Es_ETK_1D	Laubholz	BSH Esche		x		x		104	12,7	559,7
29	LH_BSH_Es_NBH_1D					x	x		104		
30	LH_BSH_Es_ETK_2D				x			x	200 x 200		
31	LH_BSH_Es_NBH_2D					x		x	200 x 200		
32	LH_BSH_Es_NBG_1D			x			x		104		
33	LH_BSH_Bu_ETK_1D	Laubholz	BSH Buche		x		x		104	12,1	766,8
34	LH_BSH_Bu_NBH_1D					x	x		104		
35	LH_BSH_Bu_ETK_2D				x			x	200 x 200		
36	LH_BSH_Bu_NBH_2D					x		x	200 x 200		
37	LH_FSH_Bu_ETK_1D	Laubholz	FSH BauBuche Pollmeier		x		x		122	8,3	801,8
38	LH_FSH_Bu_NBH_1D					x	x		122		
39	LH_FSH_Bu_ETK_2D				x			x	200 x 242		
40	LH_FSH_Bu_NBH_2D					x		x	200 x 200		
41	NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta1	Nadelholz	BSP Fichte & AKUSTA		x		x		100 + 18	10,3	479,2
42	NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta2				x		x		100 + 18		

Holz	Typ	Holzart	Beanspruchung	Beanspruchungsrichtung
NH	Nadelholz	VH Vollholz	ETK Einheitstemperaturzeitkurve	1D Einseitig
LH	Laubholz	BSH Brettschichtholz FSH Furnierschichtholz BSP Brettsperrholz	NBH Naturbrand hoch NBG Naturbrand gering	2D Mehrseitig

3. Versuchsdurchführung

Die Prüfkörper wurden in den Werkstätten der Technischen Universität München gefertigt. Die Brandversuche fanden unter Aufsicht von Mitarbeitern der TUM an der MFPA Leipzig statt. Die Prüfkörper wurden im Brandofen mit den in Abbildung 3 dargestellten drei Brandkurven beansprucht.

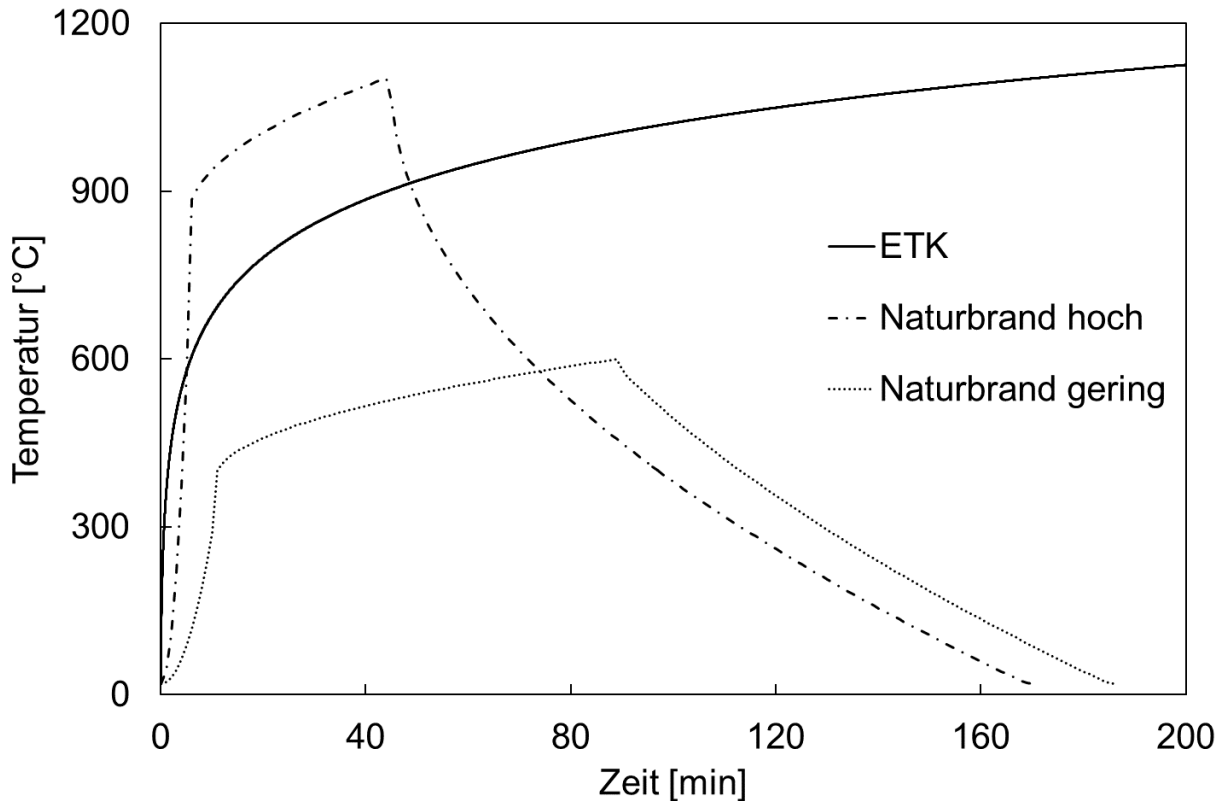


Abbildung 3: Soll-Brandofen-Temperaturverläufe der Brandversuche

Pro Versuch wurden je zwei Prüfkörper in den Brandofen gegenüberliegend eingebaut. Zunächst wurden immer ein 1D Versuchskörper in der einen Ofenöffnung und ein 2D Versuchskörper in der zweiten Öffnung eingebaut (siehe Abbildung 5). Lediglich bei den Versuchen V19, V20 und V21 wurden je zwei eindimensional beanspruchte Versuchskörper untersucht. Der Einbau der Proben erfolgte hierbei für beide eindimensionalen Prüfkörper analog. Zur Messung der Temperaturen im Brandofen wurde je ein Plate- (PL) sowie ein Mantel-Thermometer (MT) gemäß DIN EN 1363-1 [3] bzw. DIN 4102-8 [2] im Abstand von 70 mm vom Prüfkörper installiert (siehe Abbildung 5), wobei der Mittelwert der Plate-Thermoelemente zur Steuerung der Ofentemperatur verwendet wurde.

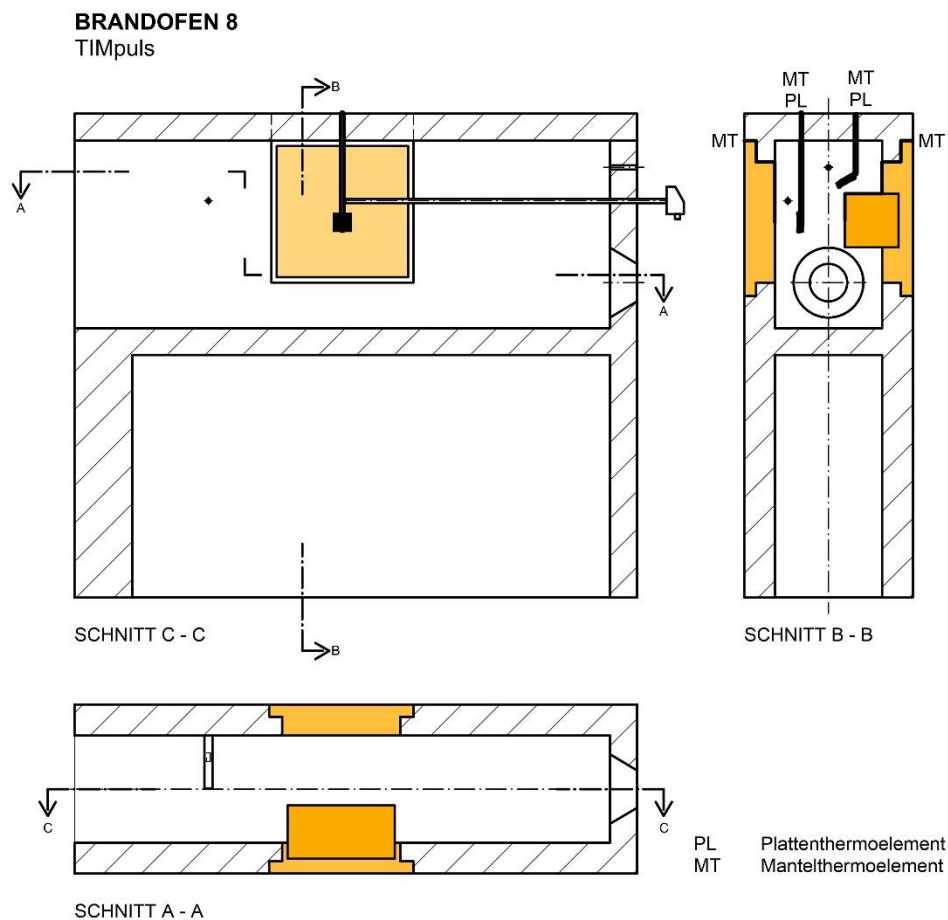


Abbildung 5: Brandfengeometrie und Position der Thermometer

Alle Brandraumtemperaturen wurden in einem Zeitintervall von 5 Sekunden gemessen und registriert. Zur Ermittlung der Abbrandrate wurden in den Prüfkörpern isolierte Drahtthermoelemente vom Typ K (2 x 0,5 mm) gemäß DIN EN 1363-1 [3] angeordnet. Die Anordnung der Messstellen (MST) kann Abschnitt 2 entnommen werden. Zusätzlich wurde ein Thermoelement auf der beanspruchten (0 mm Tiefe) und drei Stück auf der brandabgewandten Oberfläche (Dicke des jeweiligen Versuchskörpers) des Prüfkörpers angebracht. Auf der brandbeanspruchten Oberfläche wurde ein Mantelthermoelement vom Typ K mit einer Dicke von 1 mm verwendet, wohingegen auf der nichtbeanspruchten Seite drei Thermodrähte Typ K mit Kupferscheibe und mineralischen Abdeckplättchen zum Einsatz kam.

Nach Ausbau der Prüfkörper wurde zunächst die Masse bestimmt, bevor die Probekörper abgelöscht wurden. Anschließend wurde die verkohlte Schicht mechanisch entfernt.

Der Restquerschnitt wurde daraufhin mittels 3D Scantechnik erfasst, im Bereich der Temperaturmessung aufgetrennt und der verbliebene Querschnitt fotografisch dokumentiert.

Die Gaskonzentration im Brandraum von CO, O₂ und CO₂ erfolgte mittels eines MULTOR 610 von Maihak. Die Druckmessung im Brandraum erfolgte gemäß DIN EN 1363-1 [1], Abschnitt 4.5.2 mit einem Doschmessgerät.

4. Versuchsergebnisse und -beobachtungen

Tabelle 2: Gewichtsdiﬀerenz und Beobachtungen aus der Prüfung

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Versuch durchgeführt	Versuchs Nr.	Gewicht vor Versuch [kg]	Gewicht nach Versuch [kg]	Hinweis aus Prüfung
1	NH_VH_Fi_ETK_1D	01.08.2019 V15	V15	13,89	6,90	
2	NH_VH_Fi_NBH_1D	01.08.2019 V16	V15	13,37	5,85	
3	NH_VH_Fi_ETK_2D	01.08.2019 V15	V15	7,69	1,10	
4	NH_VH_Fi_NBH_2D	01.08.2019 V16	V16	7,74	0,60	
5	NH_BSH_Fi_ETK_1D	07.08.2019 V17	V17	14,57	8,25	Im Ofen rechts angeordnet
6	NH_BSH_Fi_NBH_1D	07.08.2019 V18	V18	14,41	7,60	Im Ofen links angeordnet
7	NH_BSH_Fi_ETK_2D	22.07.2019 V1	V1	8,34	1,30	
8	NH_BSH_Fi_NBH_2D	31.07.2019 V14	V14	8,49	1,80	
9	NH_BSH_Fi_NBG_1D	08.08.2019 V19	V19	15,27	9,35	Im Ofen rechts angeordnet. Bei 28. min Beginn Mitbrand
10	NH_BSP_Fi_ETK_1D	22.07.2019 V1	V1	12,20	4,05	L15 und R15 nicht besetzt
11	NH_BSP_Fi_NBH_1D	31.07.2019 V14	V14	12,26	4,15	L15 und R15 nicht besetzt, Durchbrand rechts unten. Kanal 214 = MT2 (Mantelthermo) in Ecke zur Messung Temp Erhöhung
12	NH_BSP_Fi_ETK_1D_2	08.08.2019 V20	V20	12,64	5,25	Im Ofen rechts angeordnet. kein L15 und R15
13	NH_BSP_Fi_NBH_1D_2	07.08.2019 V18	V18	12,43	3,55	Im Ofen rechts angeordnet. L15 und R15 nicht besetzt. Durchbrand bei ca. 100 min
14	NH_FSH_Fi_ETK_1D	25.07.2019 V5	V5	21,01	10,85	L3 bis 12:10 min vertauscht, ggf. weitere
15	NH_FSH_Fi_NBH_1D	24.07.2019 V4	V4	21,05	10,55	Abbruch nach ca. 130 min
16	NH_FSH_Fi_ETK_2D	24.07.2019 V3	V3	11,36 ?	3,25	
17	NH_FSH_Fi_NBH_2D	30.07.2019 V11	V11	11,27	2,65	Beschriftung Thermo fehlt und muss zugeordnet werden (siehe .txt), U4 bis 8. Min falsch gesteckt
18	LH_VH_Bu_ETK_1D	31.07.2019 V13	V13	21,39	9,00	214 = MT2 (Mantelthermo) in Ecke zur Messung Temp Erhöhung. Durchbrand ab 68 min.
19	LH_VH_Bu_NBH_1D	25.07.2019 V6	V6	21,21	9,80	Durchbrand rechts unten bei ca. 55-56 min (Foto 61 min) 85 min oben links (Foto 89 min)
20	LH_VH_Bu_ETK_2D	31.07.2019 V13	V13	12,73	1,90	
21	LH_VH_Bu_NBH_2D	26.07.2019 V8	V8	12,56	1,90	Gasmessung
22	LH_VH_Bu_NBG_1D	08.08.2019 V19	V19	21,29	12,10	Im Ofen links angeordnet. 27. min Beginn Mitbrand. Durchbrand im natürlichen Riss
23	LH_VH_Ei_ETK_1D	26.07.2019 V7	V7	25,60	16,40	R15 defekt. Abklebung unten rechts ab 62 min. 89 min Durchbrand rechts unten
24	LH_VH_Ei_NBH_1D	26.07.2019 V8	V8	26,24	16,65	R3 während Prüfung ausgefallen. Fehler bei R divers überprüfen. Gasmessung
25	LH_VH_Ei_ETK_2D	26.07.2019 V7	V7	15,23	5,45	O7, 8, 12, 14 ggf. defekt
26	LH_VH_Ei_NBH_2D	25.07.2019 V6	V6	14,65	5,60	
27	LH_VH_Ei_NBG_1D	09.08.2019 V21	V21	26,00	17,85	Im Ofen rechts angeordnet. Abbruch bei 150 min
28	LH_BSH_Es_ETK_1D	24.07.2019 V3	V3	18,29	7,55	L15 und R15 nicht besetzt
29	LH_BSH_Es_NBH_1D	30.07.2019 V12	V12	18,81	6,65	L15 und R15 nicht besetzt, Durchbrand rechts unten
30	LH_BSH_Es_ETK_2D	23.07.2019 V2	V2	12,32	2,35	Gasmessung CO und CO2 ggf. vertauscht
31	LH_BSH_Es_NBH_2D	24.07.2019 V4	V4	11,79	1,50	Abbruch nach ca. 130 min
32	LH_BSH_Es_NBG_1D	09.08.2019 V21	V21	18,72	11,05	Im Ofen links angeordnet. Abbruch 150 min
33	LH_BSH_Bu_ETK_1D	08.08.2019 V20	V20	19,41	8,00	Im Ofen links angeordnet. Kein L15 und R15
34	LH_BSH_Bu_NBH_1D	30.07.2019 V11	V11	19,08	7,30	L2 und L8 vertauscht. L2=L8, L15 + R15 nicht besetzt. Vor 90 min Durchbrand Prüfkörper (Bild 90 min). Ausbauchung Bild 110 min
35	LH_BSH_Bu_ETK_2D	25.07.2019 V5	V5	12,91	2,05	O11 während Versuch ausgefallen
36	LH_BSH_Bu_NBH_2D	30.07.2019 V12	V12	12,30	1,10	
37	LH_FSH_Bu_ETK_1D	29.07.2019 V9	V9	25,42	13,55	Schwitzen des FSH unten rechts (Foto 27.min)
38	LH_FSH_Bu_NBH_1D	29.07.2019 V10	V10	25,37	13,75	
39	LH_FSH_Bu_ETK_2D	29.07.2019 V9	V9	18,28	4,45	Probleme beim Entfernen des PK von der Grundplatte. Kohleverlust
40	LH_FSH_Bu_NBH_2D	29.07.2019 V10	V10	15,16	2,85	U8 fehlt, keine Messung
41	NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta1	23.07.2019 V2	V2	15,84	8,05	L15 und R15 = OF vor akuSta hinter 18 mm Leimholz, L16 und R16 hinter akuSta Steckplatz 59 u 60
42	NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta2	07.08.2019 V17	V17	16,00	8,70	Im Ofen links angeordnet. L16 (218) vor Akusta. L15 und R15 hinter Akusta. Durchbrand am Rand (Foto 89. min)

Legende Thermoelemente:

OT1 = Plattenthermoelement über 2D Körper

OT2 = Mantelthermoelement über 2D Körper

OT3 = Plattenthermoelement über 1D Körper

OT4 = Mantelthermoelement über 1D Körper

MT1 = Mantelthermoelement bei 1D Körper

MT2 = Mantelthermoelement bei 2D Körper

OF1 – OF[n] = Oberflächenthermoelement auf Prüfkörper brandabgewandte Seite

O1 – O[n] = TE in 2D-Körper oberer Teil im 6 mm Abstand zunehmend von brandzugewandter Seite

U1 – U[n] = TE in 2D-Körper unterer Teil im 6 mm Abstand zunehmend von brandzugewandter Seite

L1 – L[n] = TE in 1D-Körper (links) im 6 mm Abstand zunehmend von brandzugewandter Seite

R1 – R[n] = TE in 1D-Körper (rechts) im 6 mm Abstand zunehmend von brandzugewandter Seite

Literatur

- [1] DIN EN 1995-1-2:2010-12: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall;
- [2] DIN 4102-8: 2003-10: Brandverhalten von Bauprodukten und Bauarten am Kleinprüfstand;
- [3] DIN EN 1363-1: 2012-10: Feuerwiderstandsprüfungen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen;

Anhang-Verzeichnis

Anhang 1	Temperatur-Zeit-Diagramme der jeweiligen Versuche	[S. 10-51]
Anhang 2	Diagramme CO, O ₂ und CO ₂ Gaskonzentration im Brandraum	[S. 52-54]
Anhang 3	Fotodokumentation	[S. 54-100]

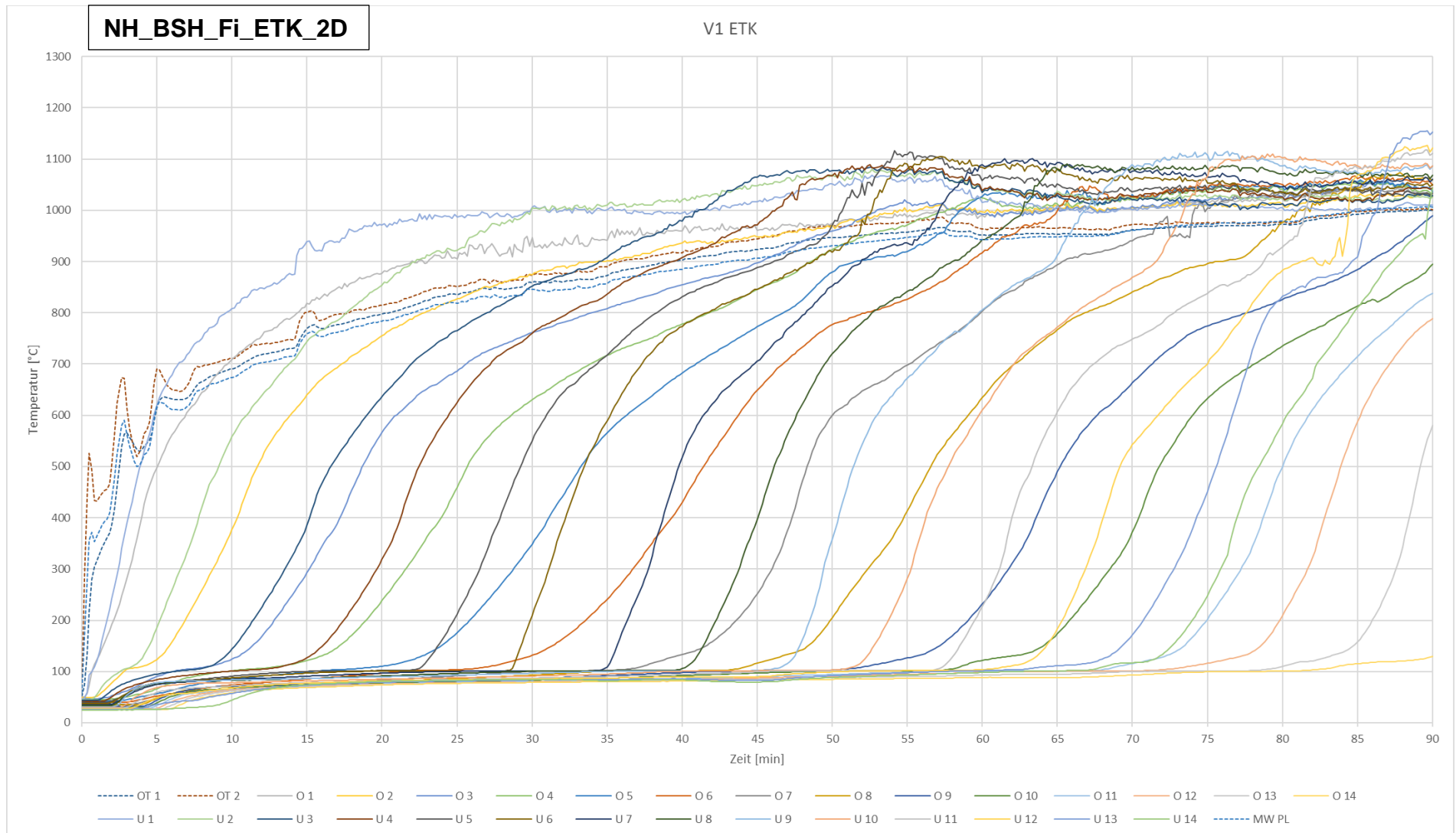


Abbildung 6: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 1 - NH_BSH_Fi_ETK_2D

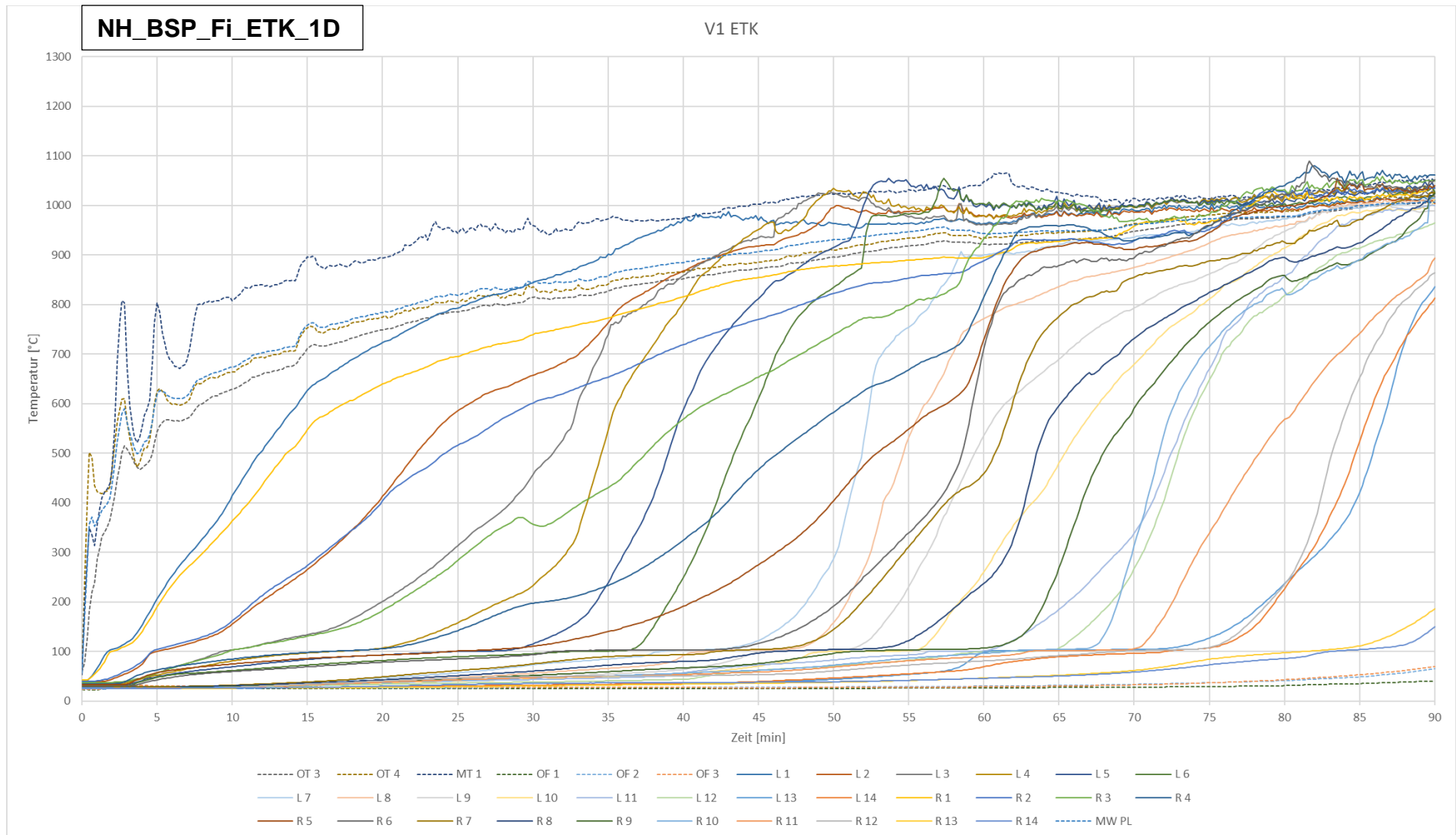


Abbildung 7: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 1 - NH_BSP_Fi_ETK_1D

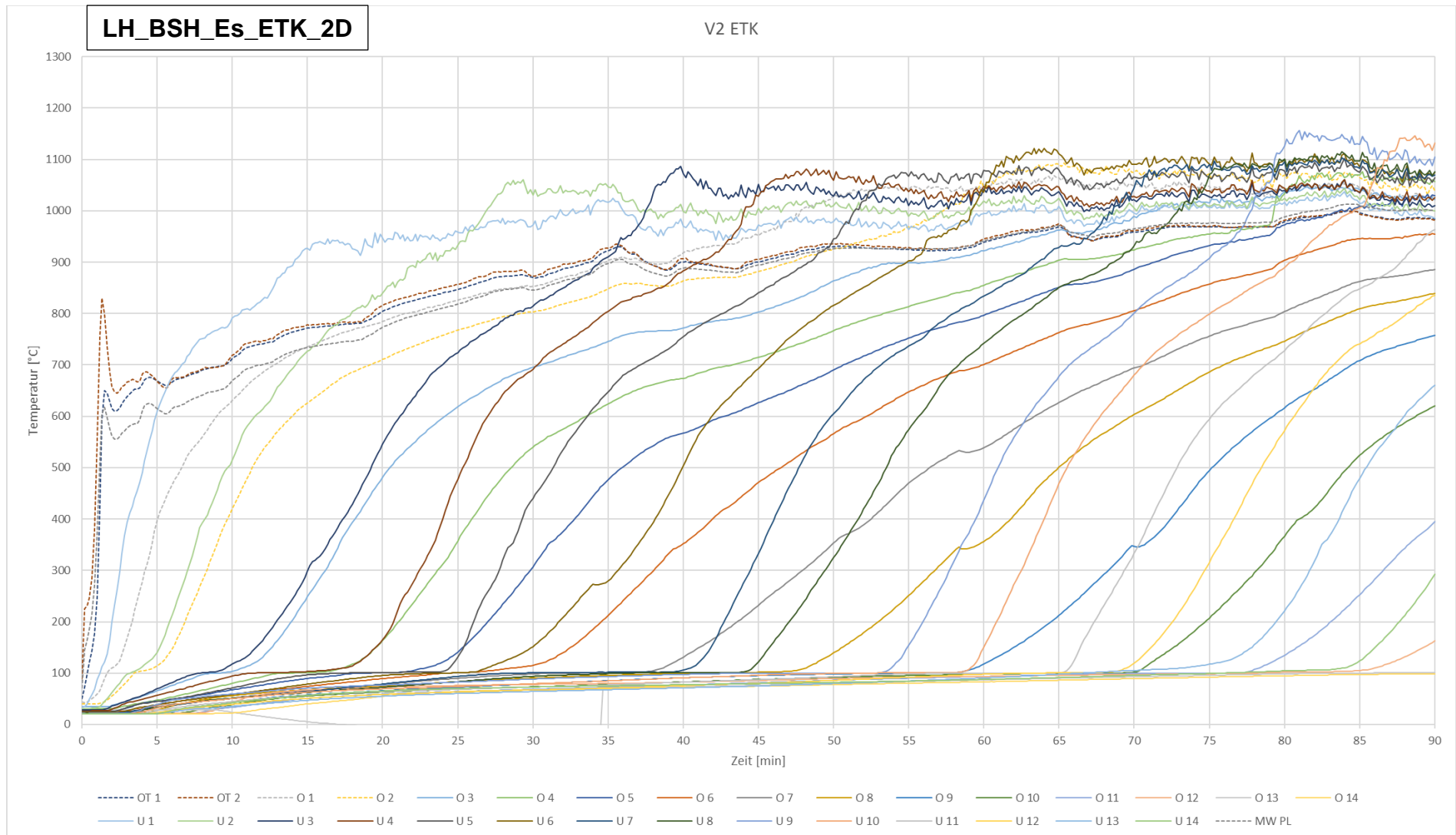


Abbildung 8: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 2 - LH_BSH_Es_ETK_2D

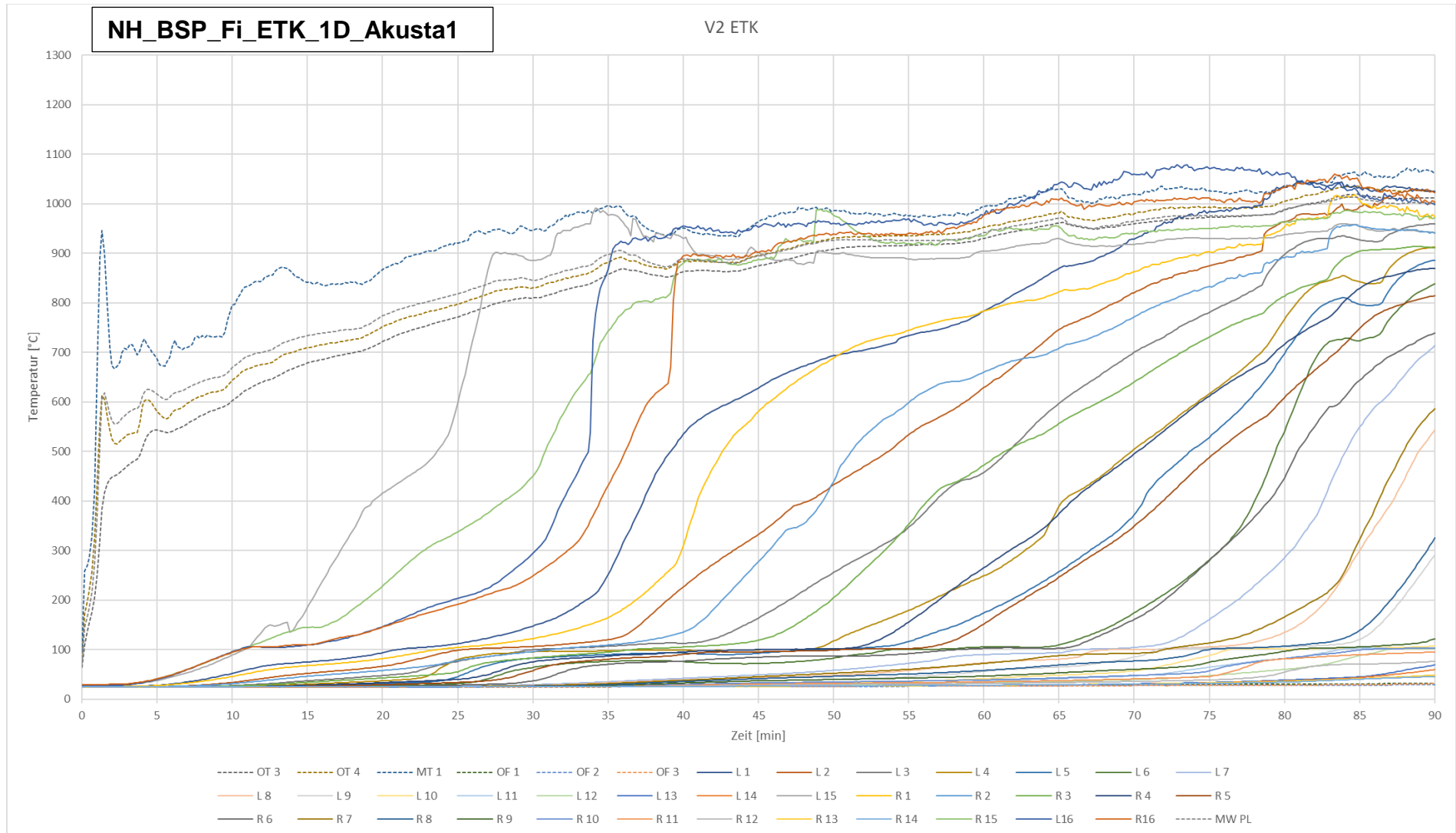


Abbildung 9: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 2 - NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta1

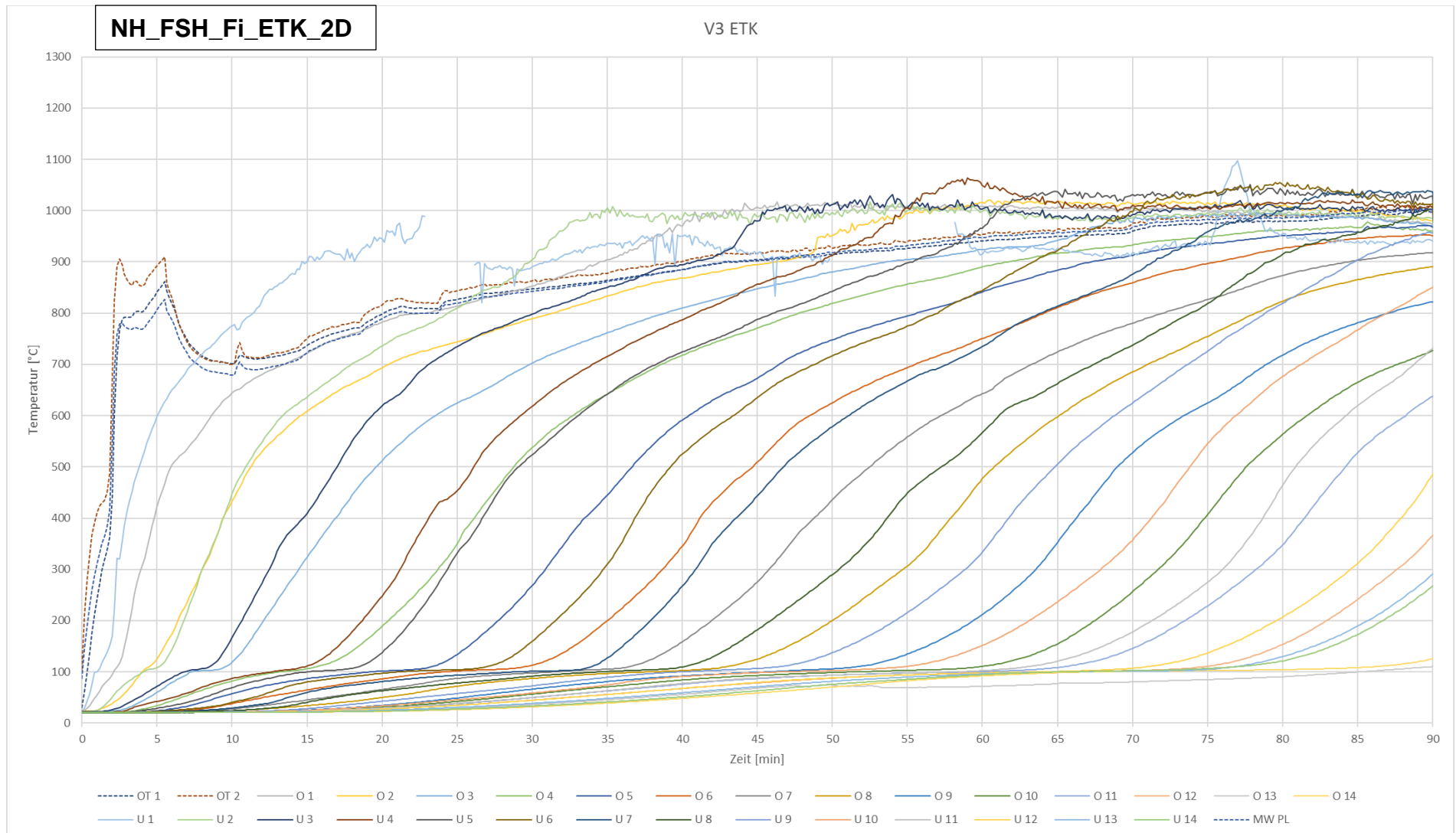


Abbildung 10: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 3 - NH_FSH_Fi_ETK_2D

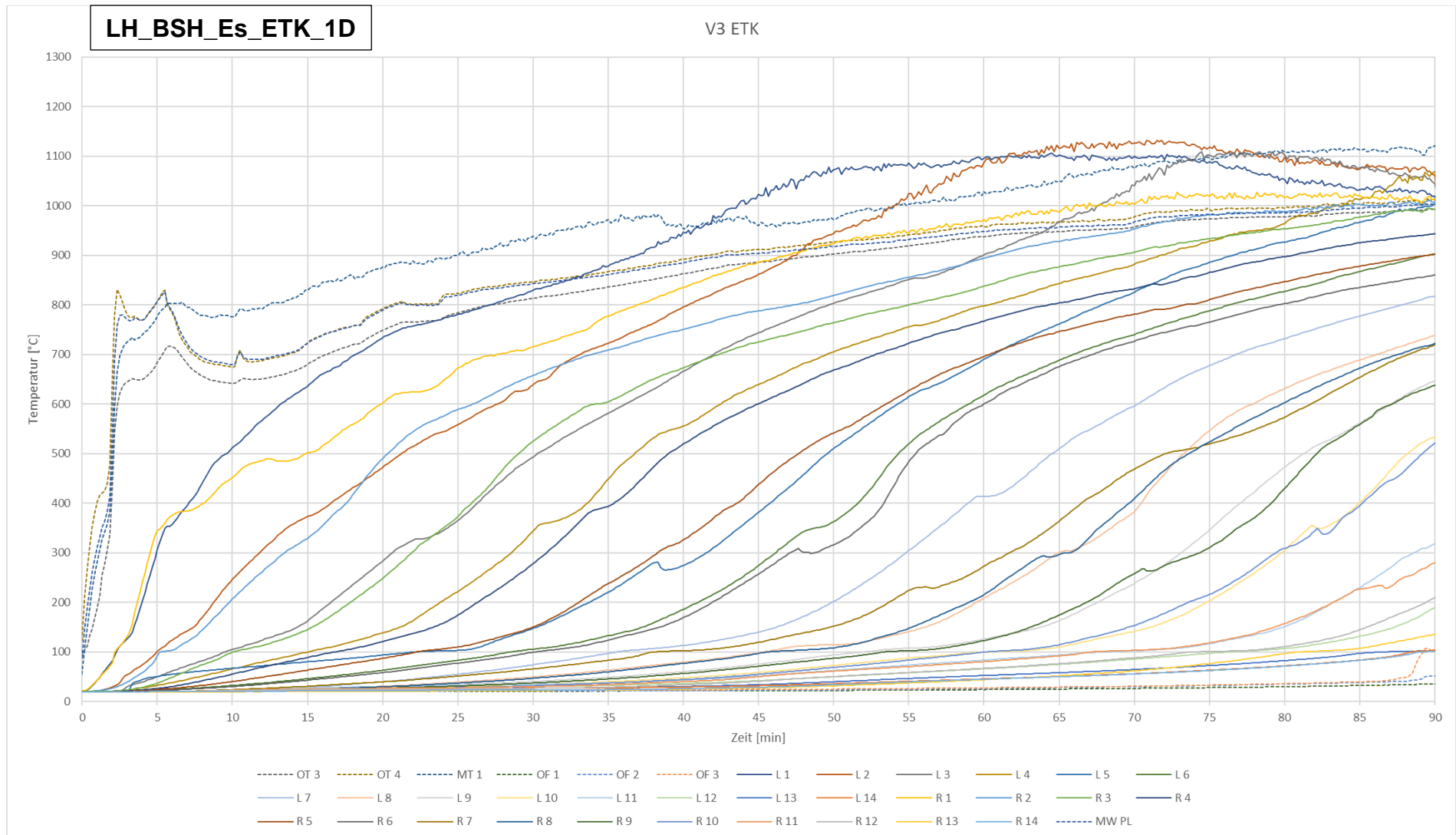


Abbildung 11: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 3 - LH_BSH_Es_ETK_1D

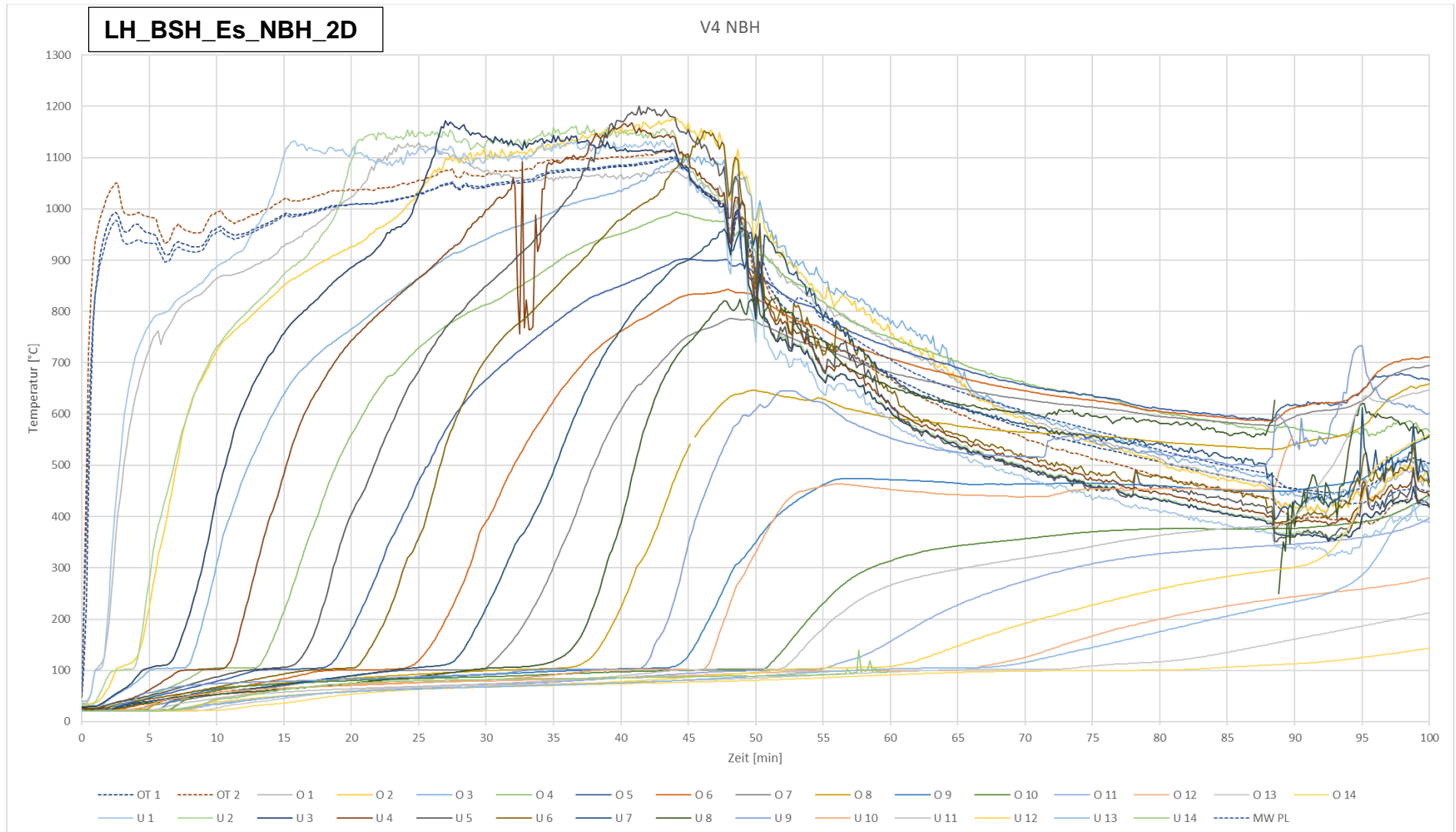


Abbildung 12: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 4 - LH_BSH_Es_NBH_2D

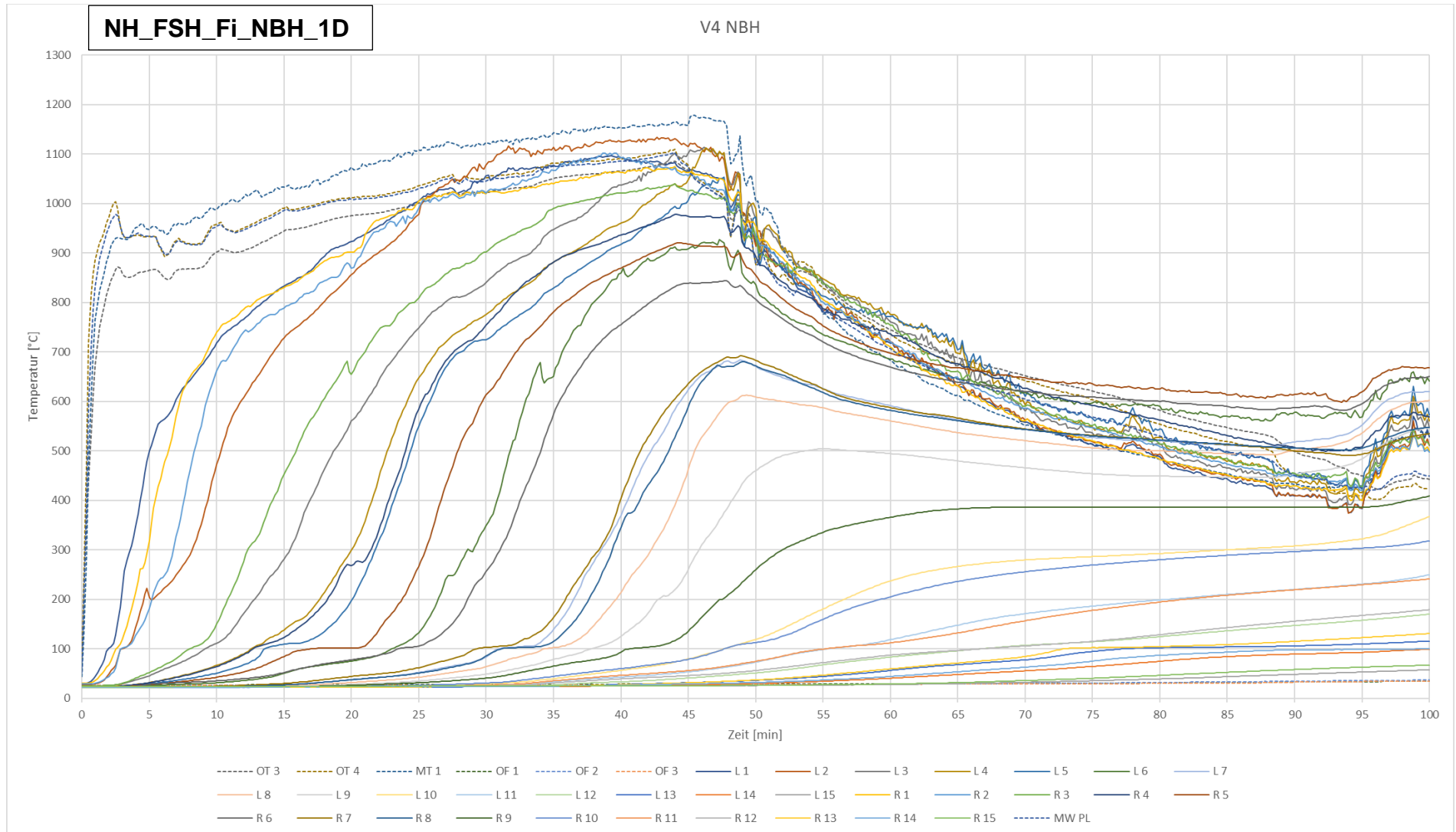


Abbildung 13: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 4 - NH_FSH_Fi_NBH_1D

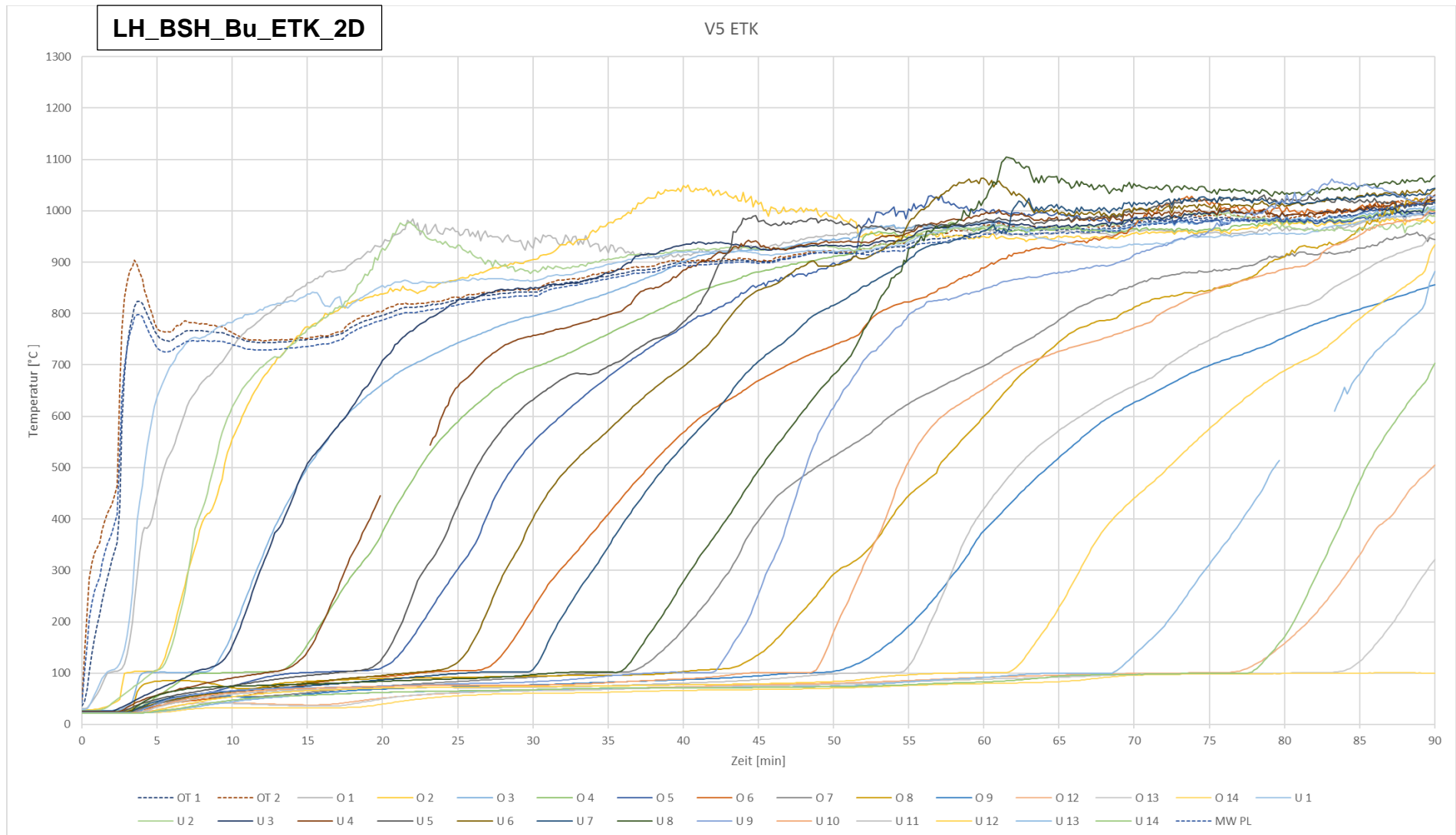


Abbildung 14: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 5 - LH_BSH_Bu_ETK_2D

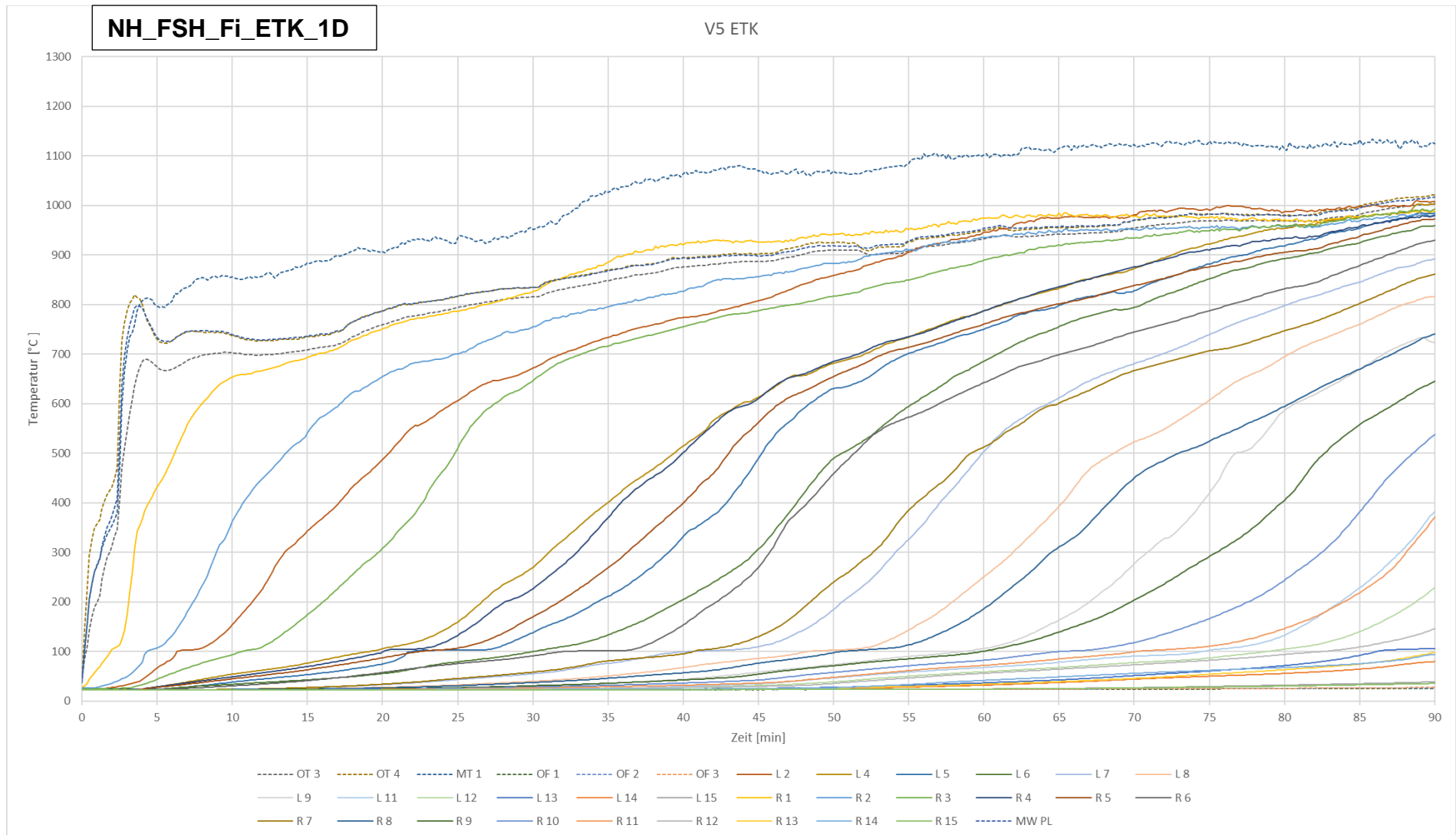


Abbildung 15: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 5 - NH_FSH_Fi_ETK_1D

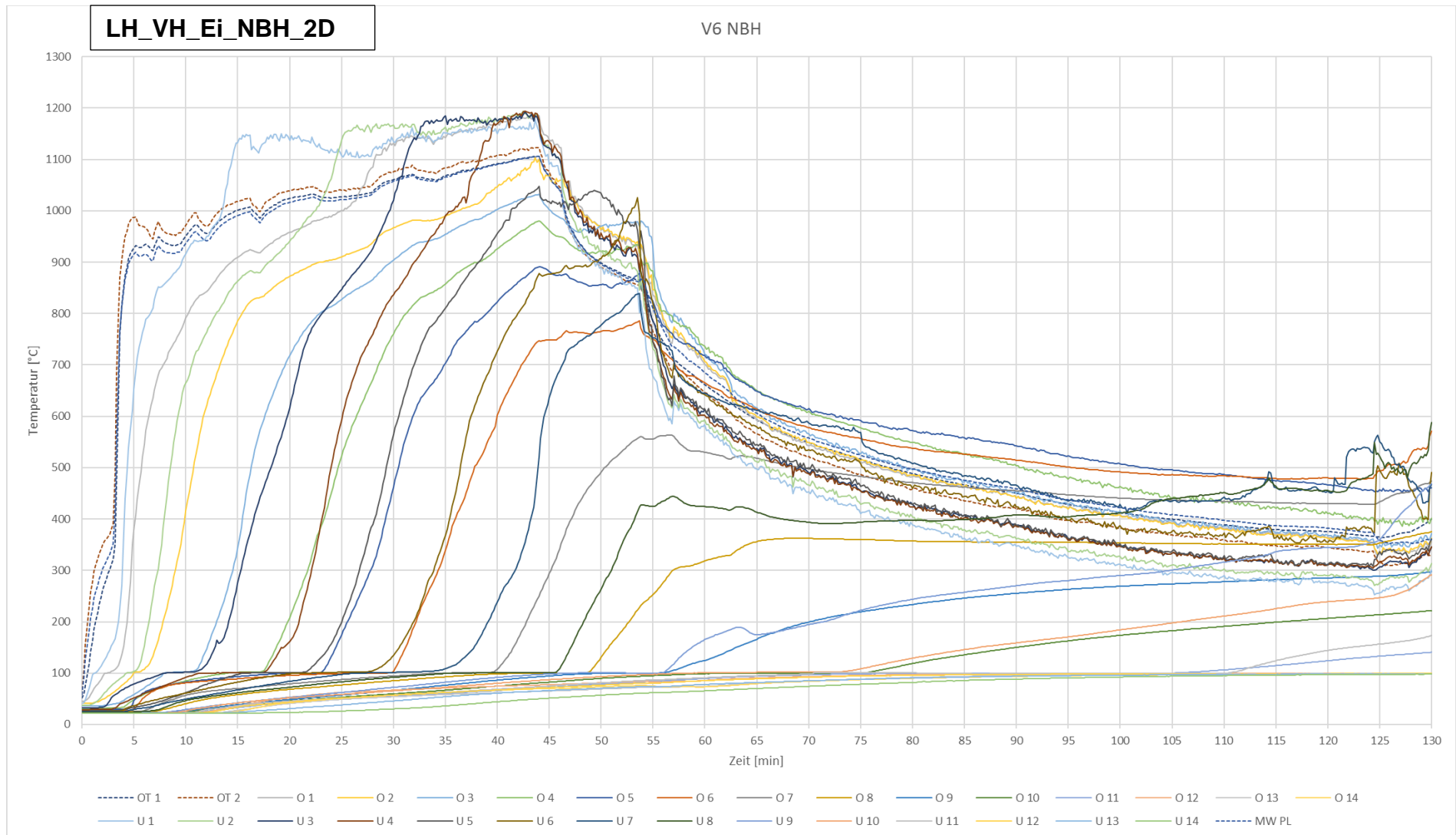


Abbildung 16: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 6 - LH_VH_Ei_NBH_2D

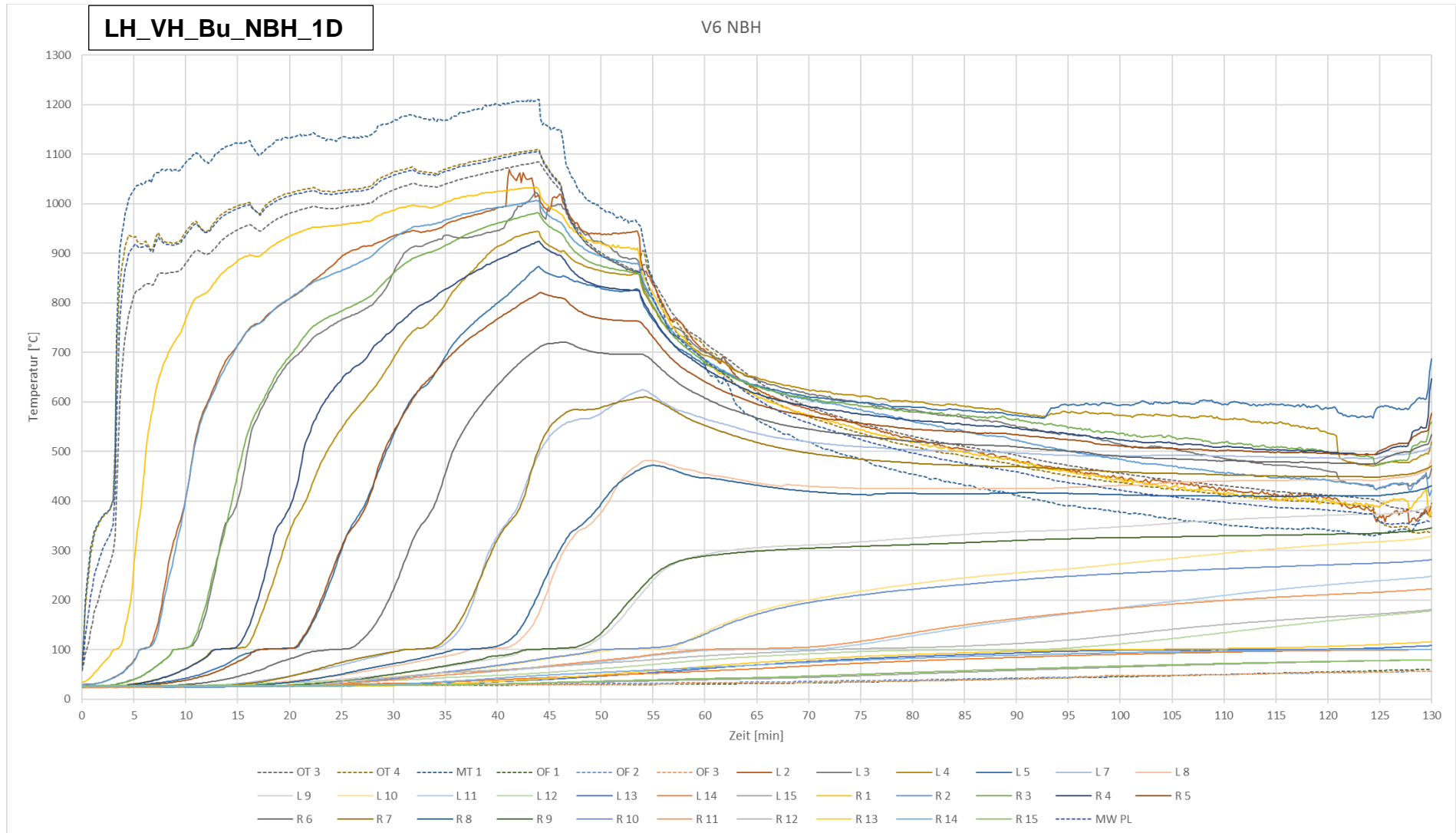


Abbildung 17: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 6 - LH_VH_Bu_NBH_1D

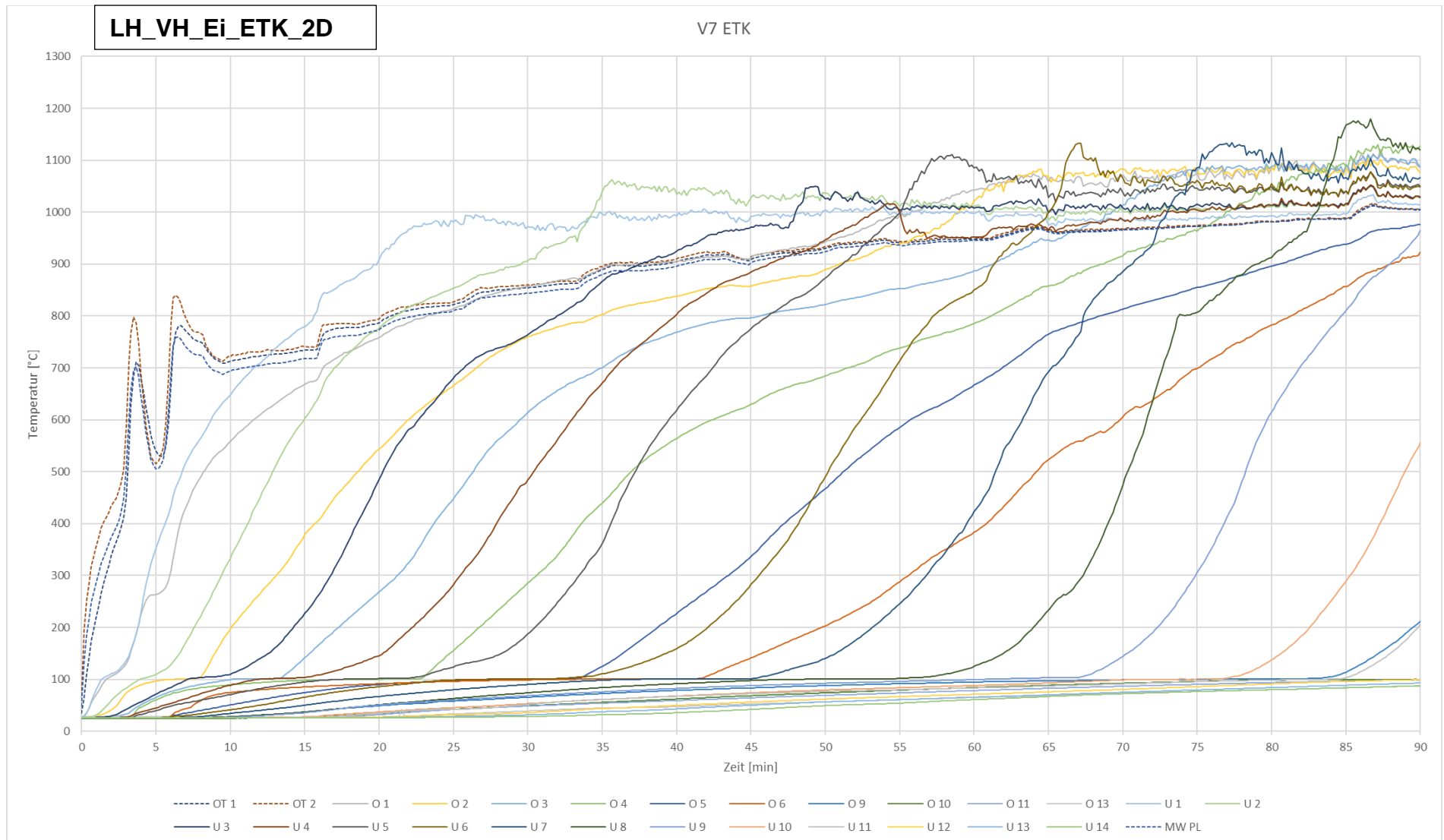


Abbildung 18: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 7 - LH_VH_Ei_ETK_2D

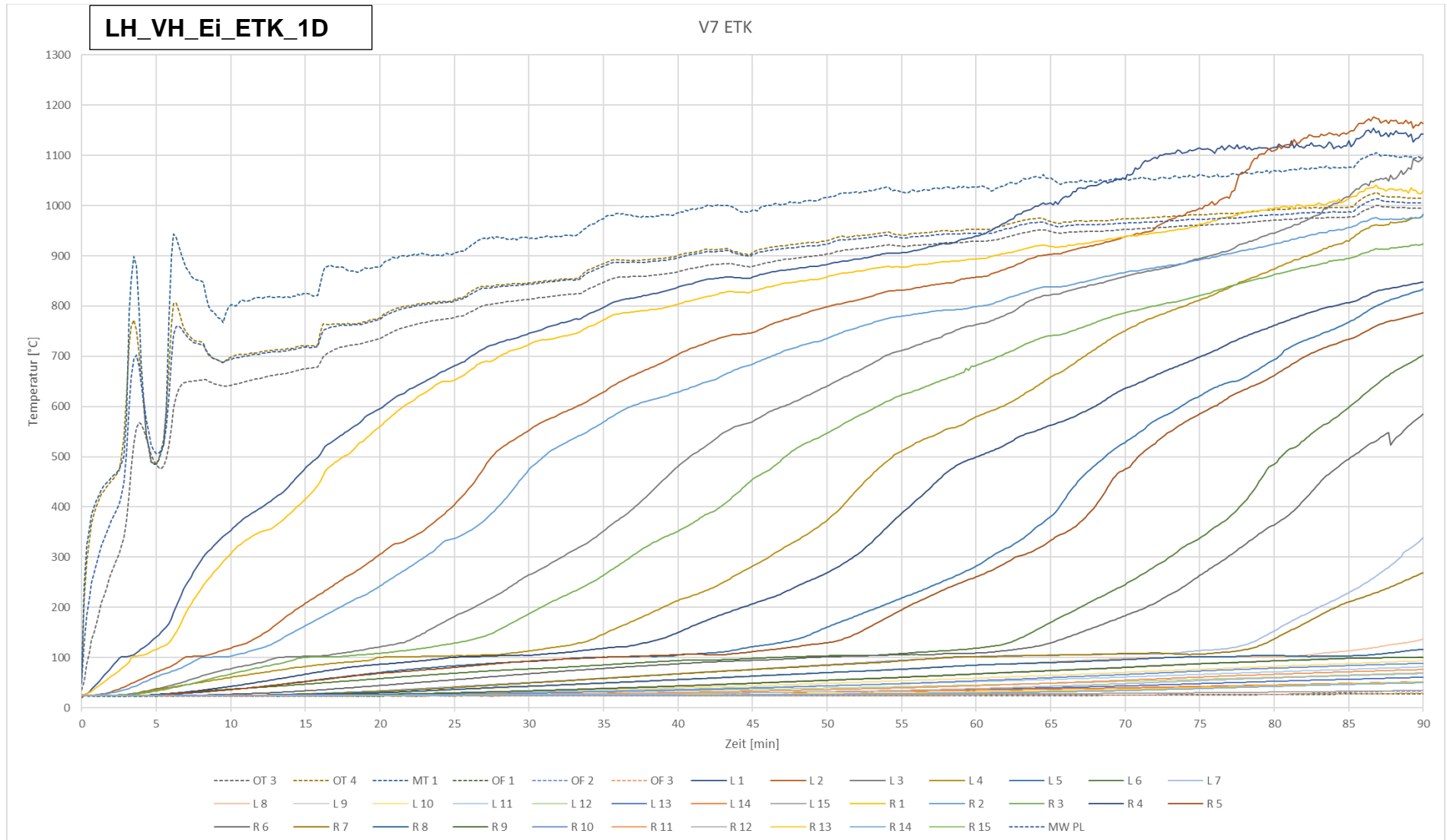


Abbildung 19: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 7 - LH_VH_Ei_ETK_1D

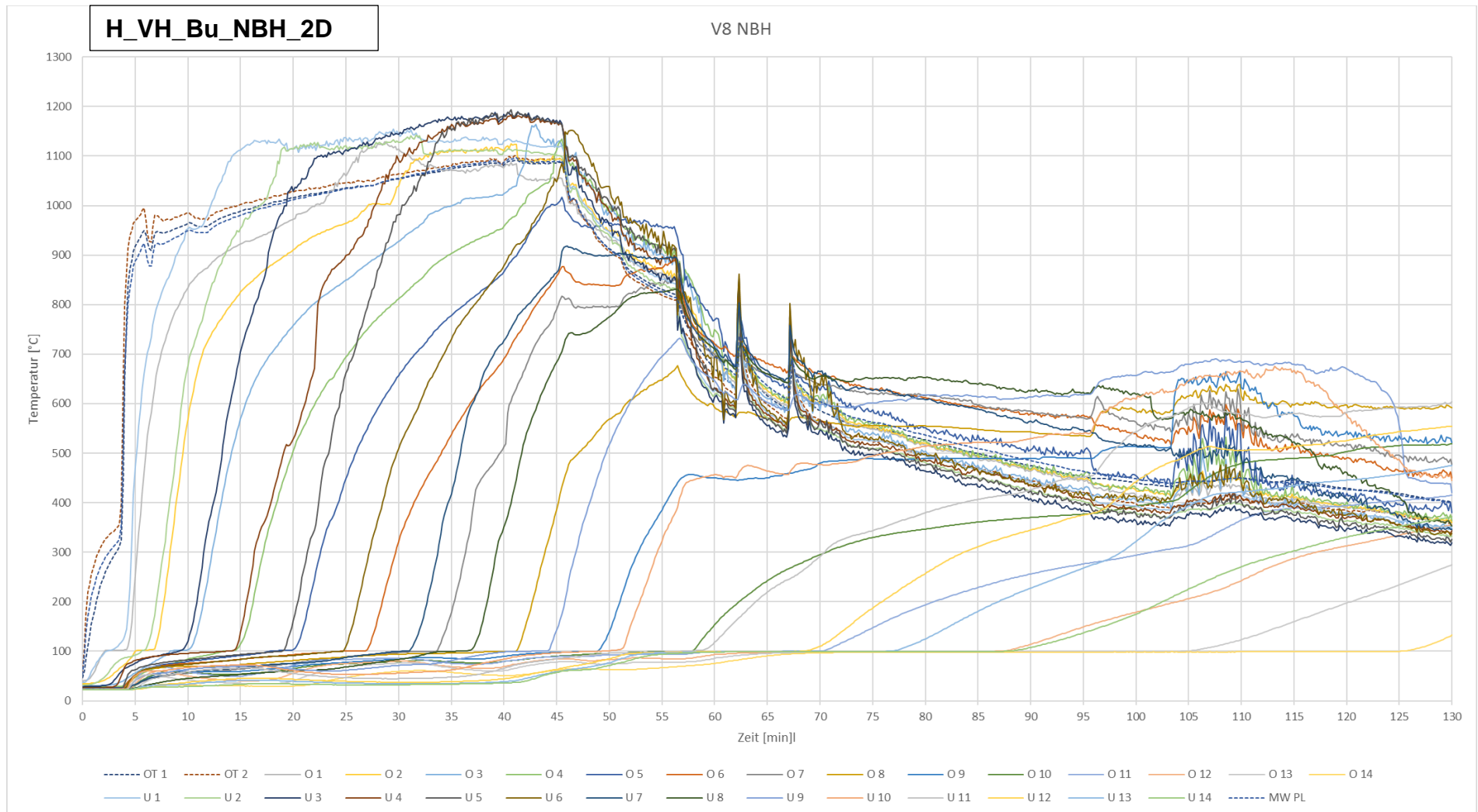


Abbildung 20: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 8 - H_VH_Bu_NBH_2D

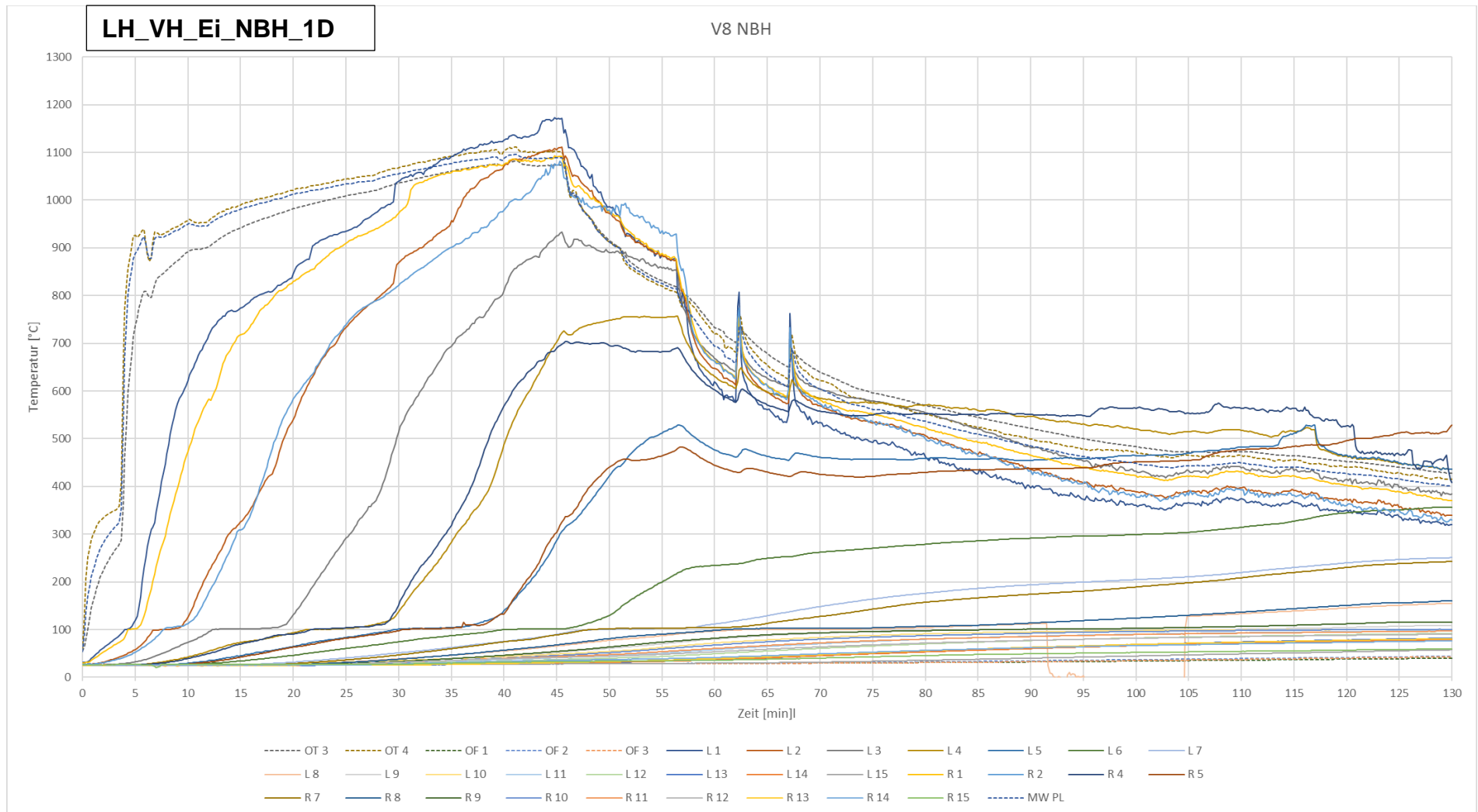


Abbildung 21: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 8 - LH_VH_Ei_NBH_1D

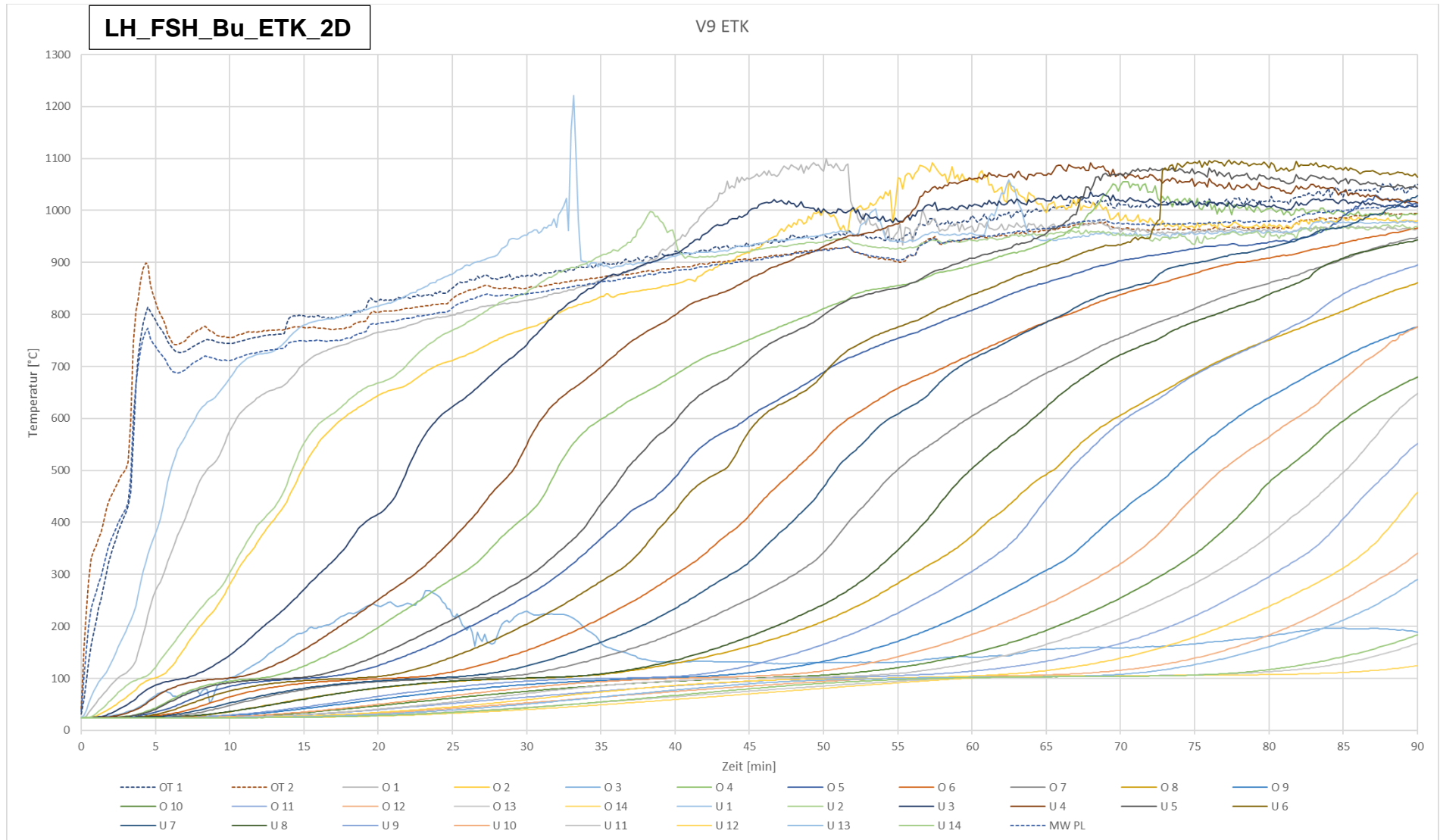


Abbildung 22: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 9 - LH_FSH_Bu_ETK_2D

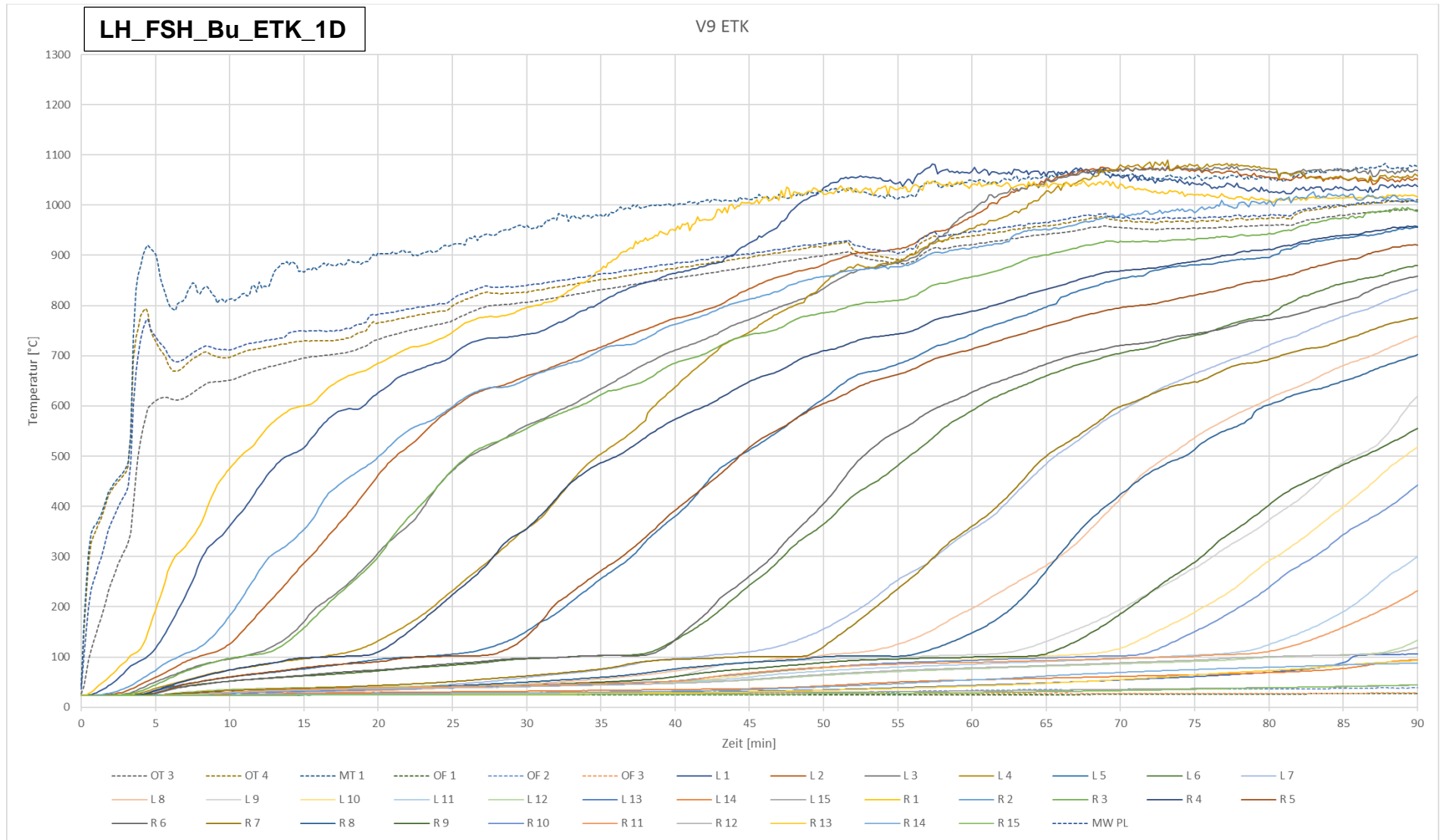


Abbildung 23: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 9 - LH_FSH_Bu_ETK_1D

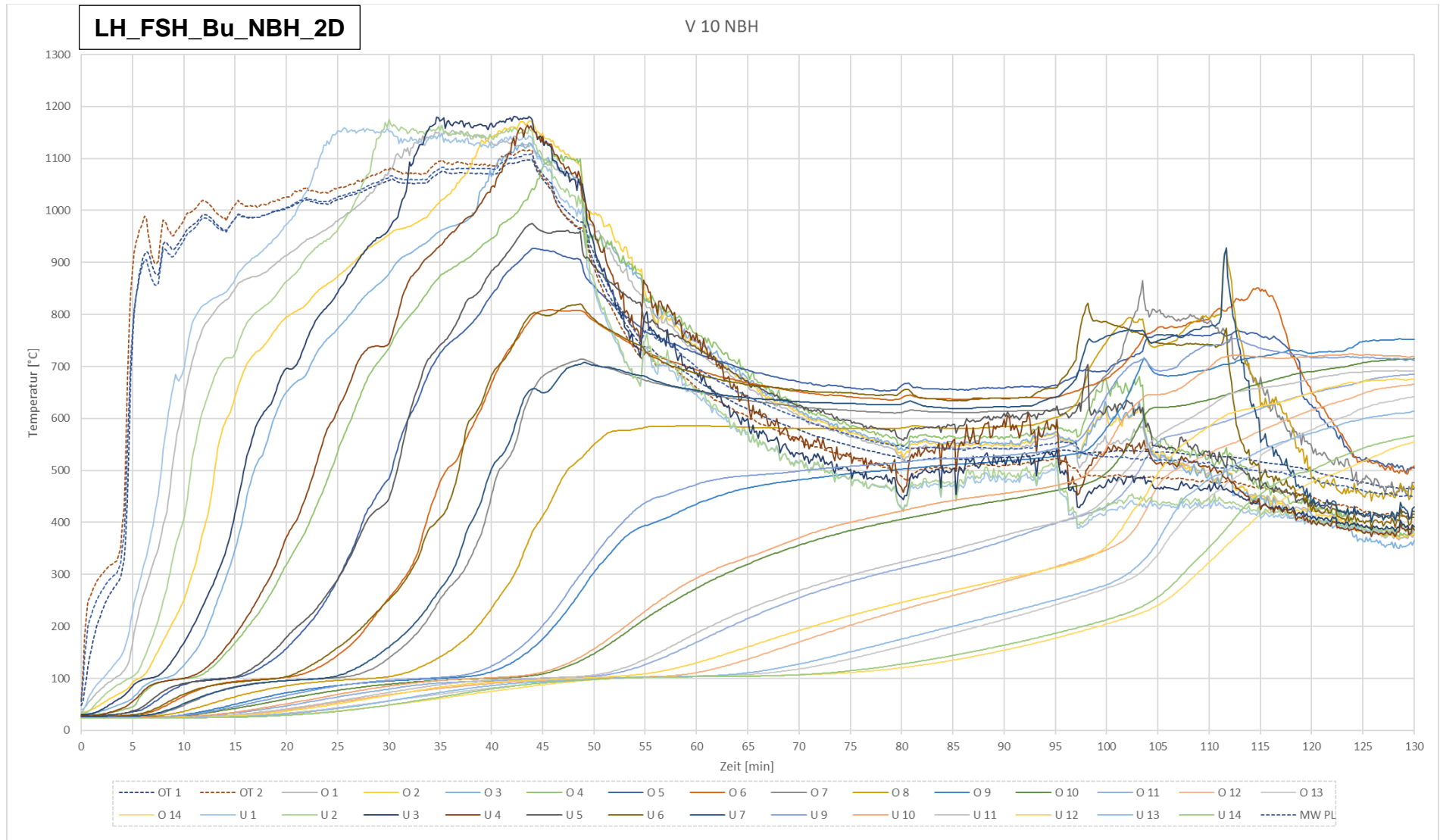


Abbildung 24: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 10 - LH_FSH_Bu_NBH_2D

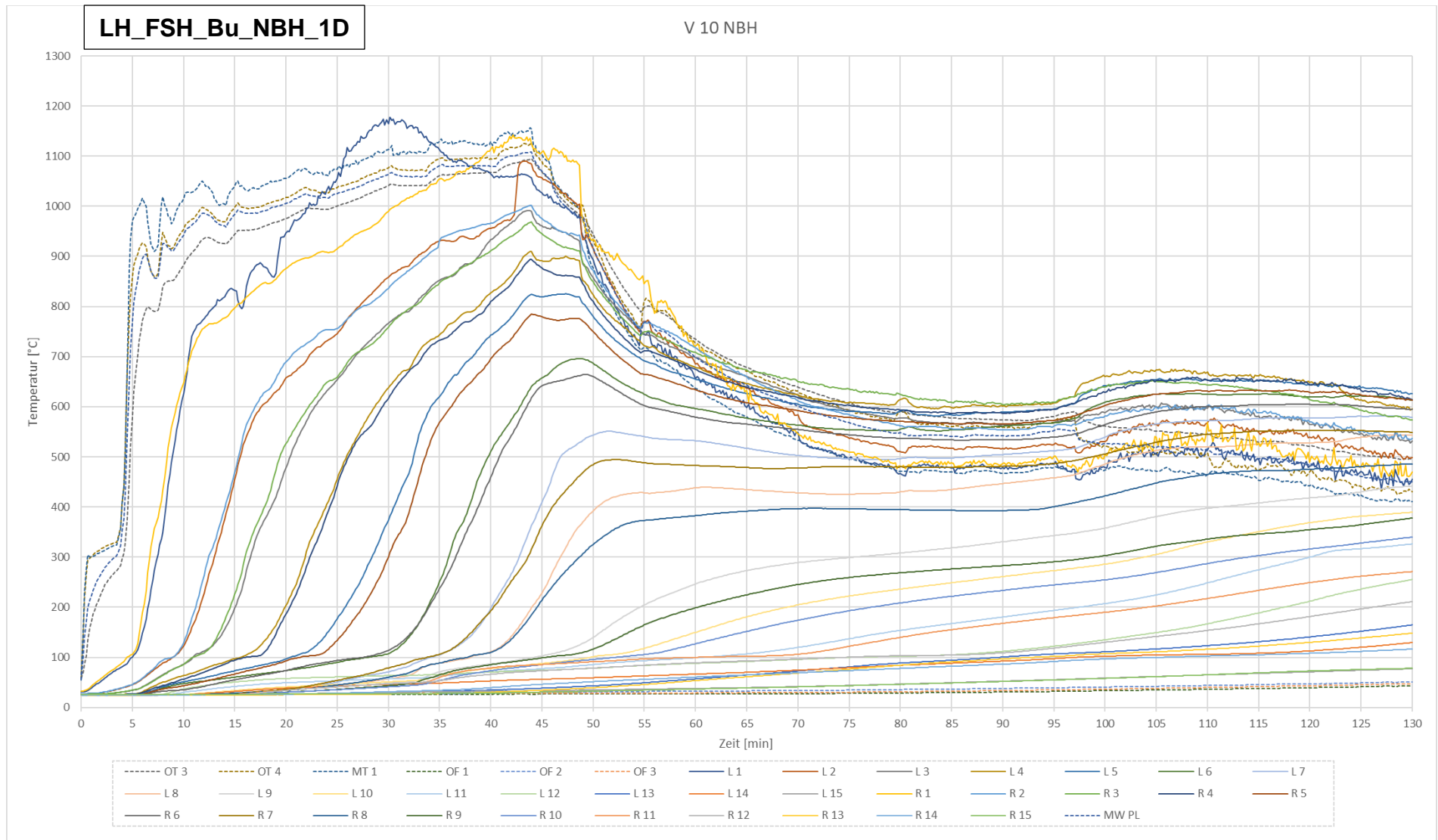


Abbildung 25: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 10 - LH_FSH_Bu_NBH_1D

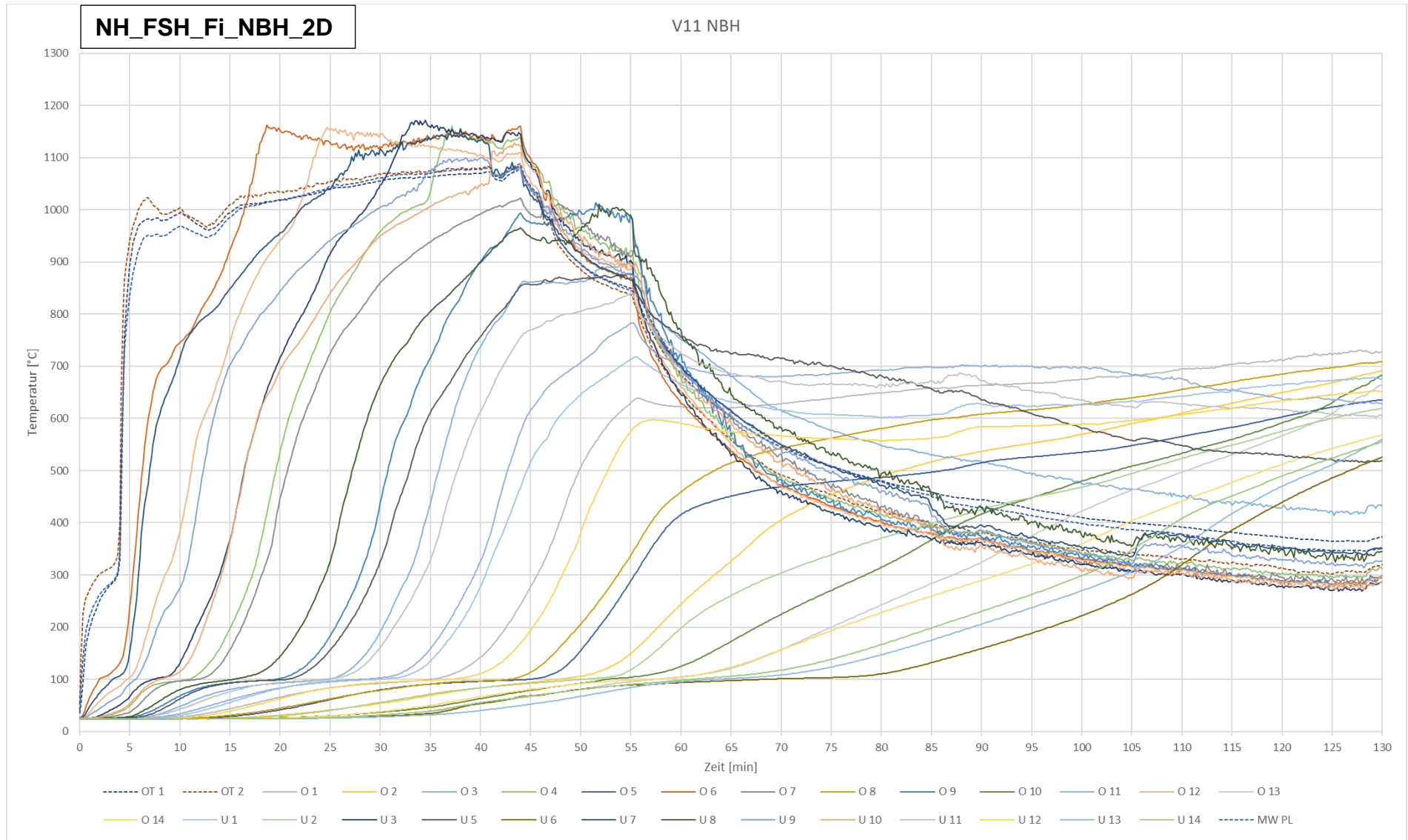


Abbildung 26: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 11 - NH_FSH_Fi_NBH_2D

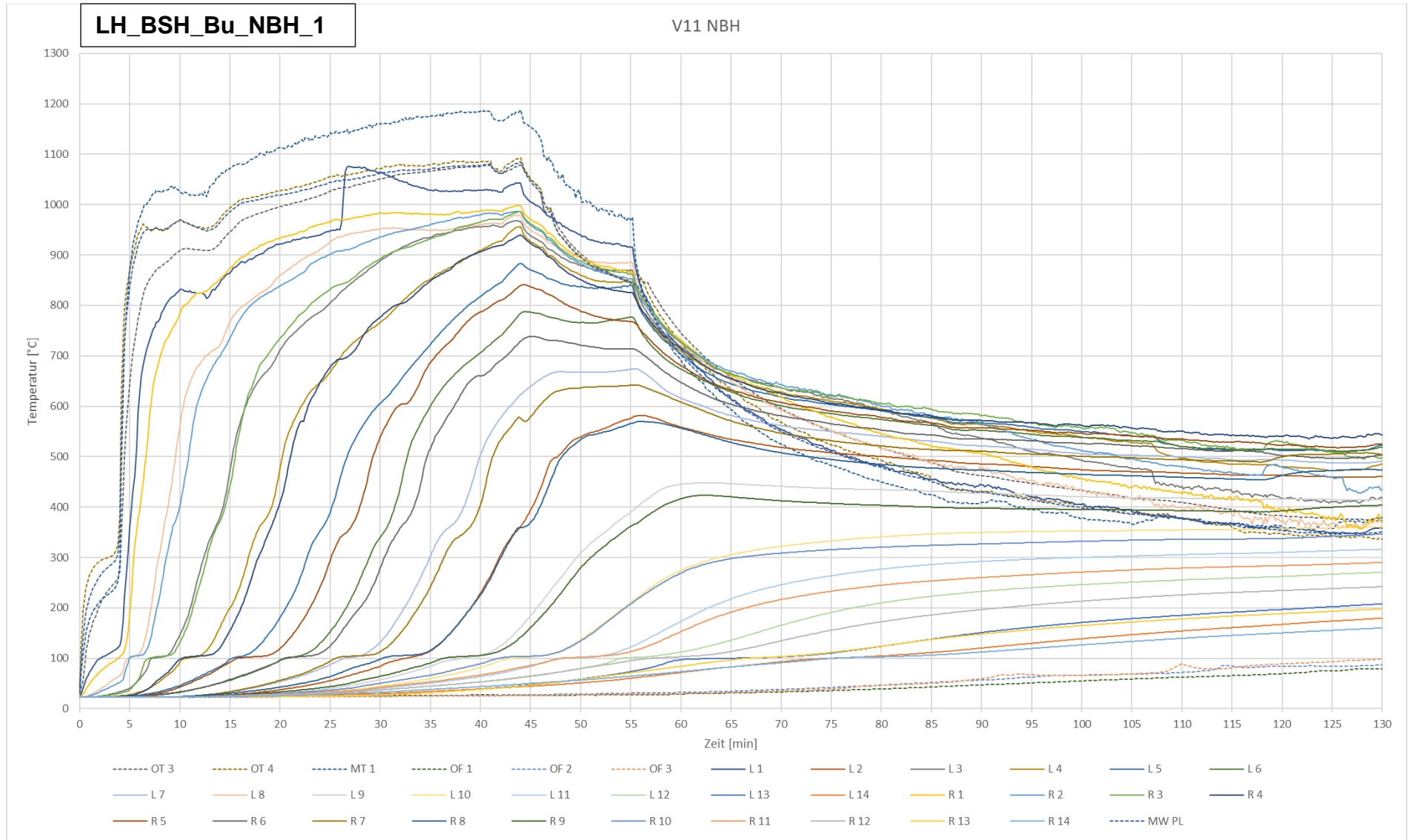


Abbildung 27: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 11 - LH_BSH_Bu_NBH_1D

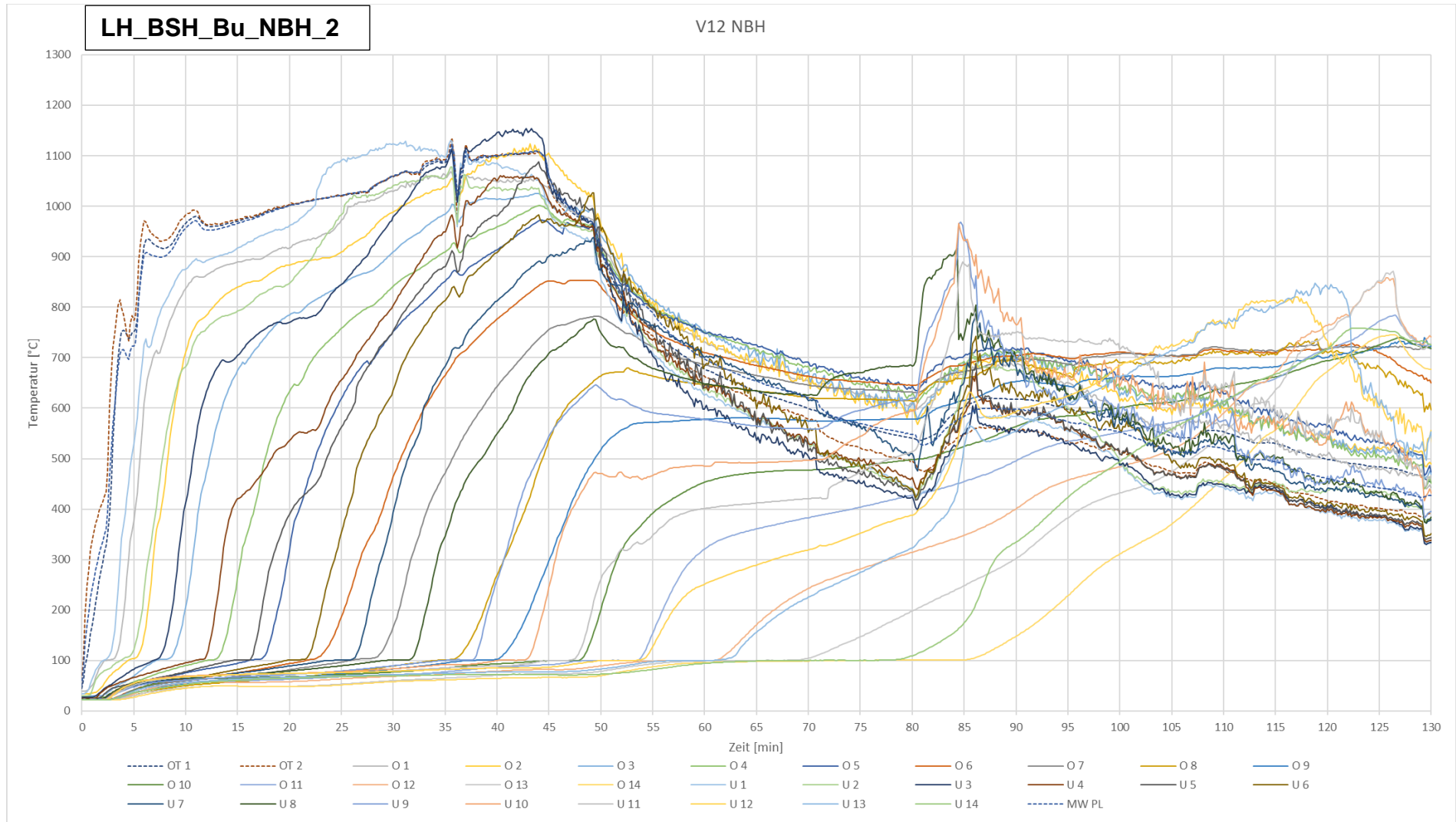


Abbildung 28: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 12 - LH_BSH_Bu_NBH_2D

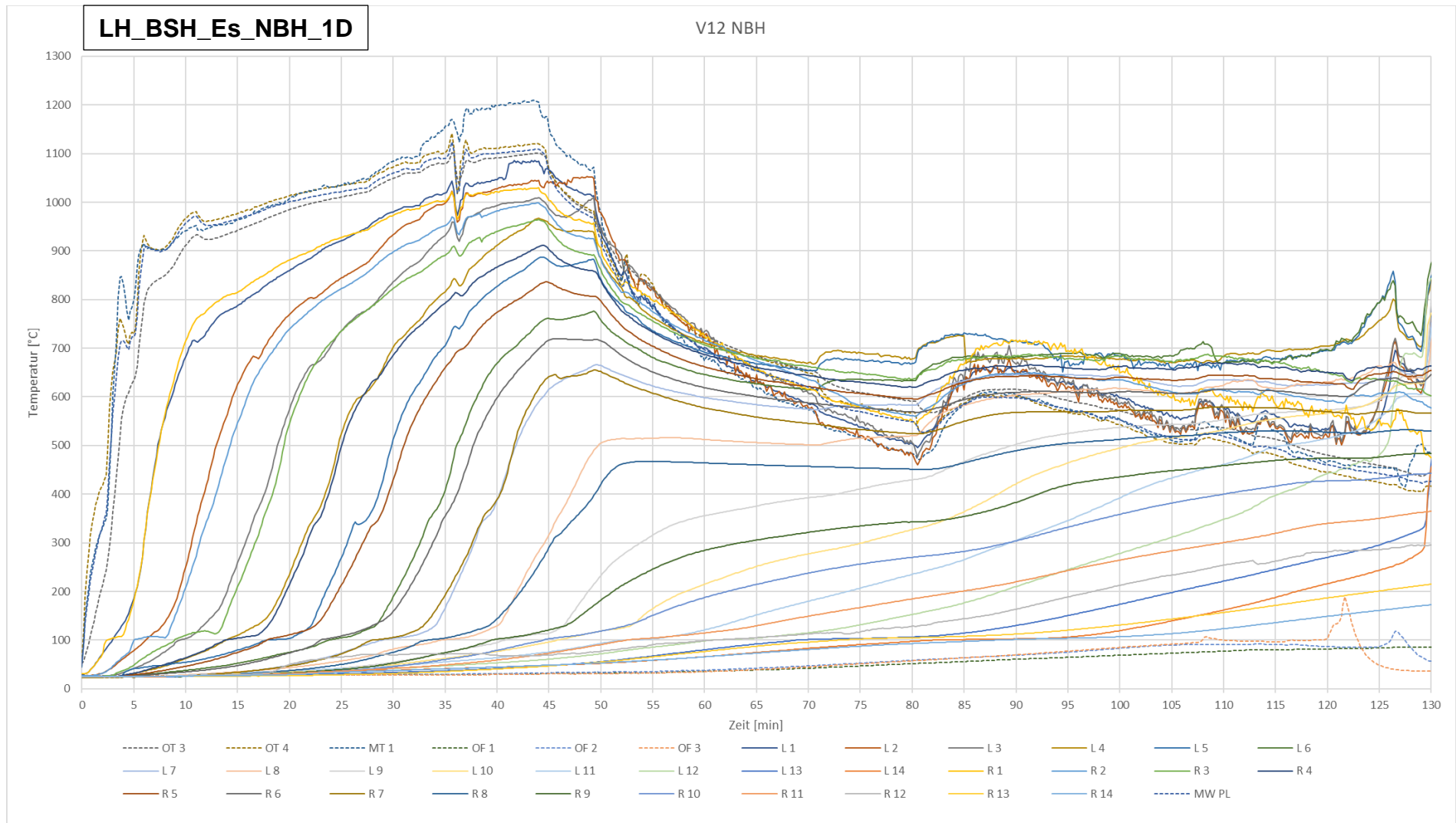


Abbildung 29: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 12 - LH_BSH_Es_NBH_1D

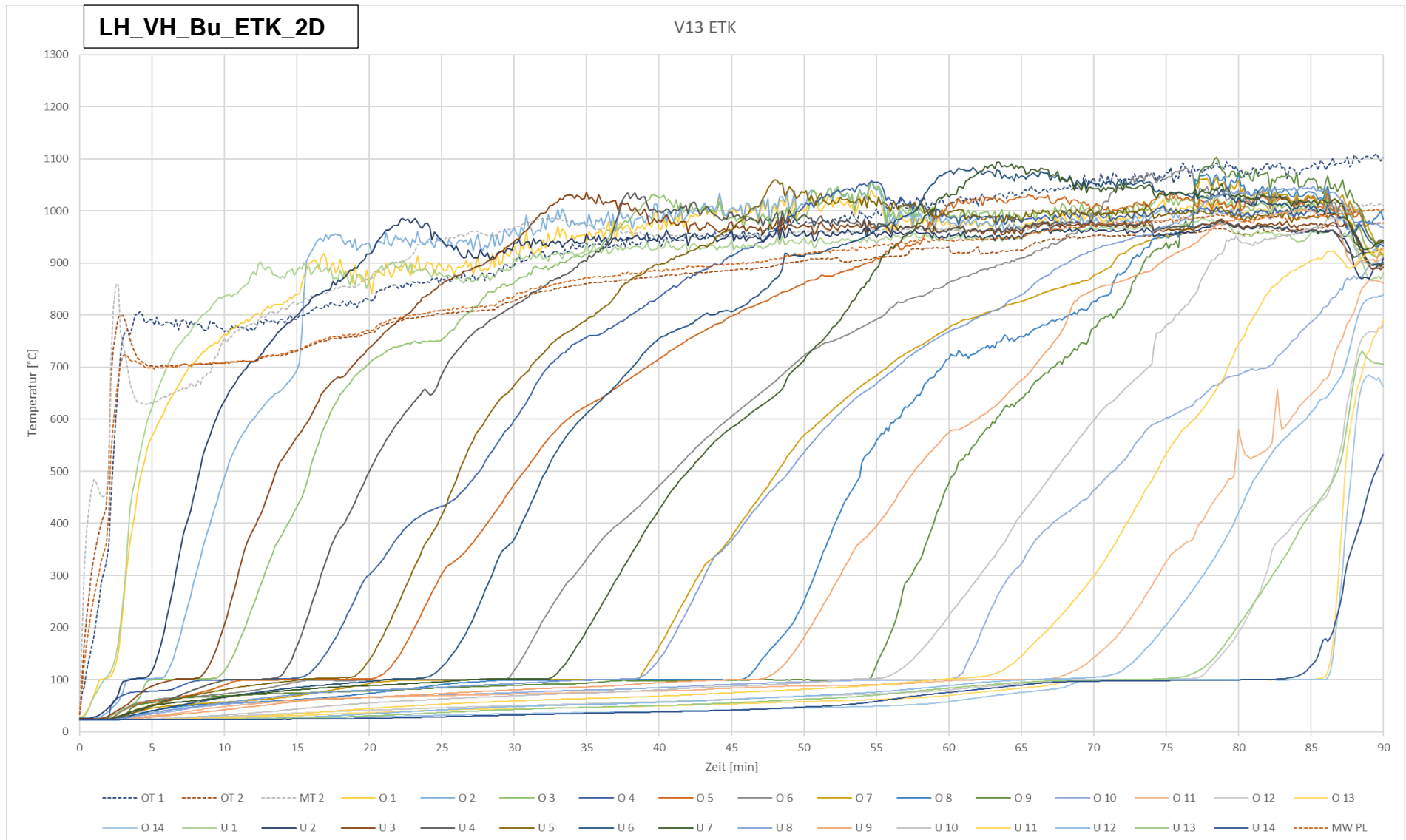


Abbildung 30: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 13 - LH_VH_Bu_ETK_2D

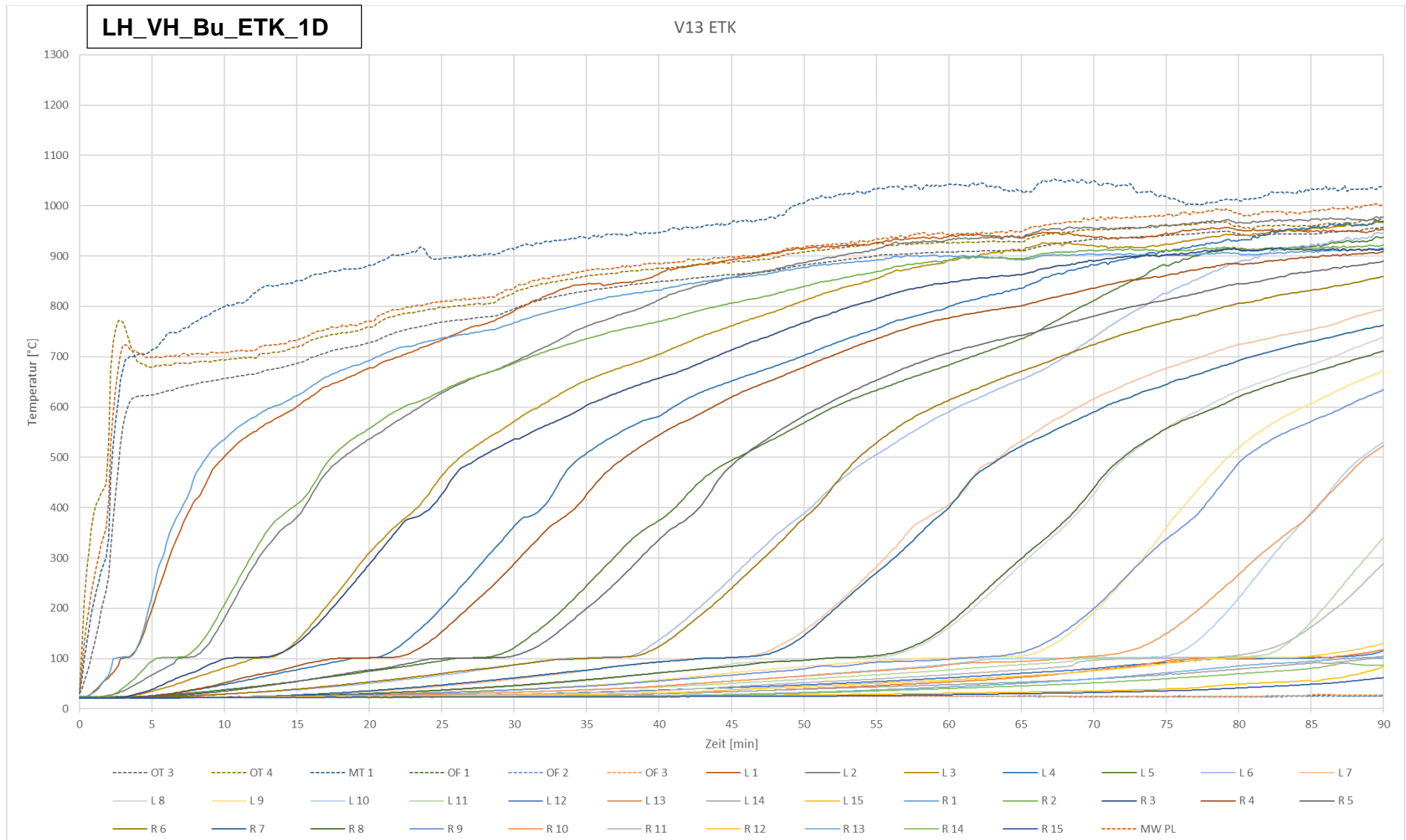


Abbildung 31: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 13 - LH_VH_Bu_ETK_1D

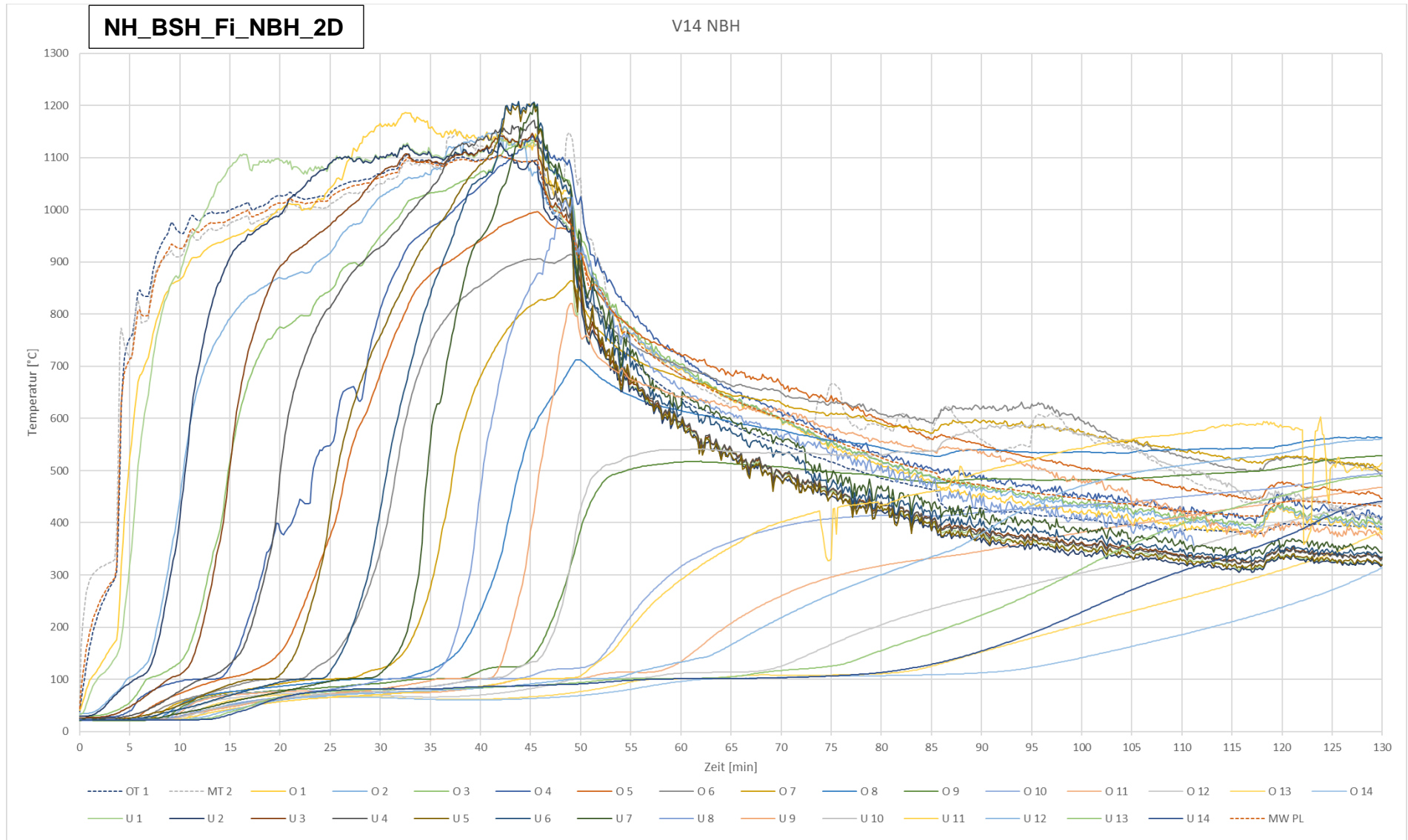


Abbildung 32: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 14 - NH_BSH_Fi_NBH_2D

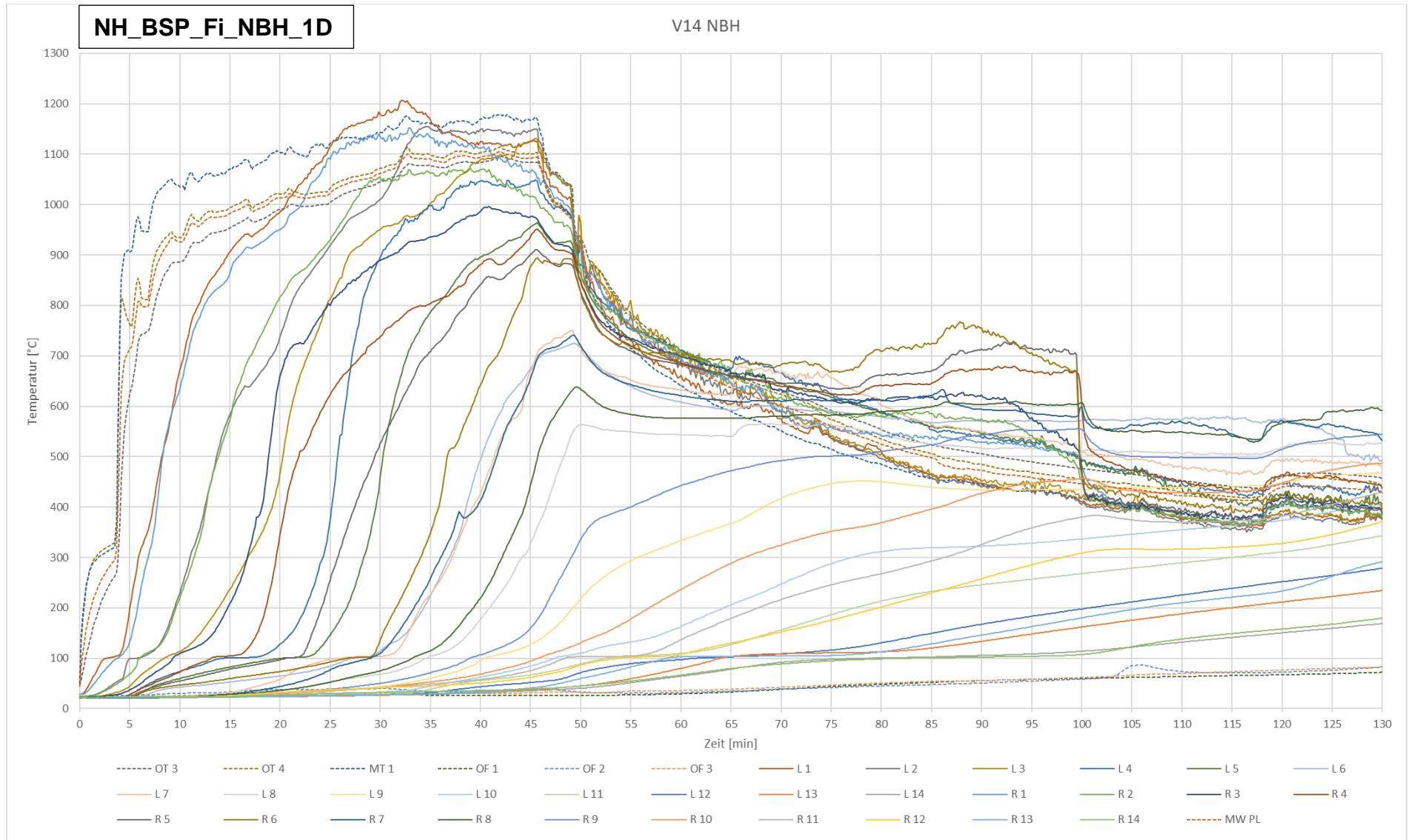


Abbildung 33: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 14 - NH_BSP_Fi_NBH_1D

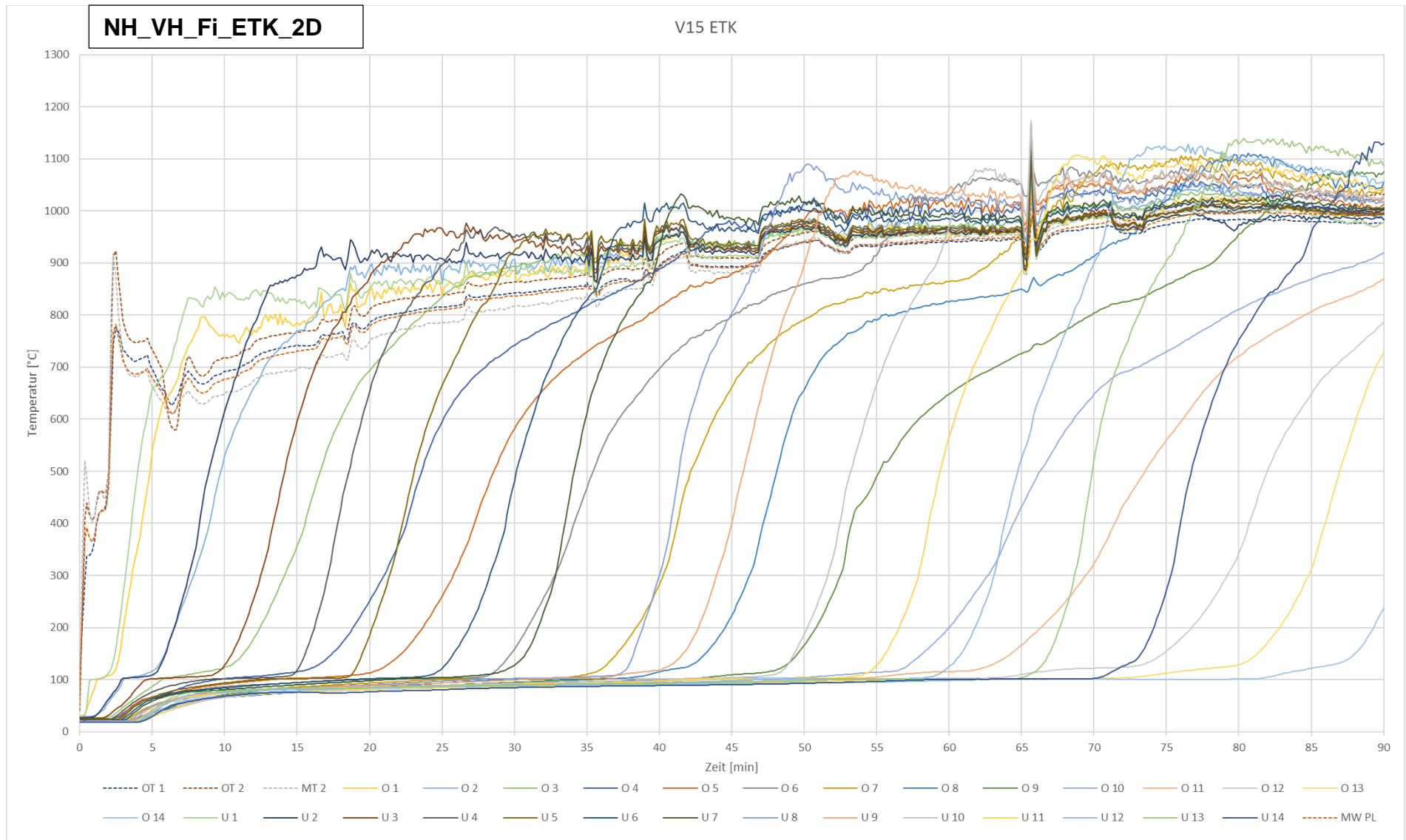


Abbildung 34: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 15 - NH_VH_Fi_ETK_1D

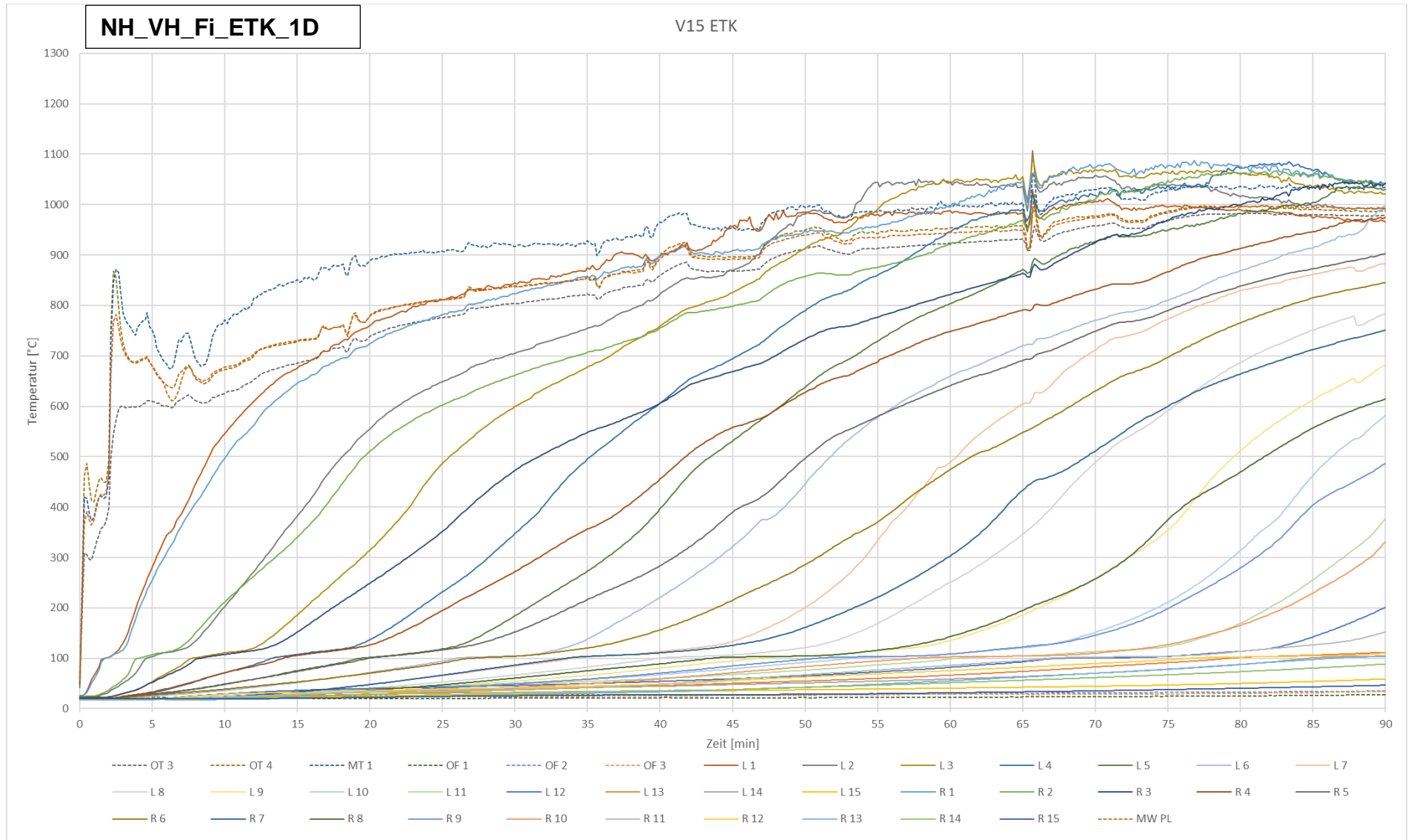


Abbildung 35: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 15 - NH_VH_Fi_ETK_1D

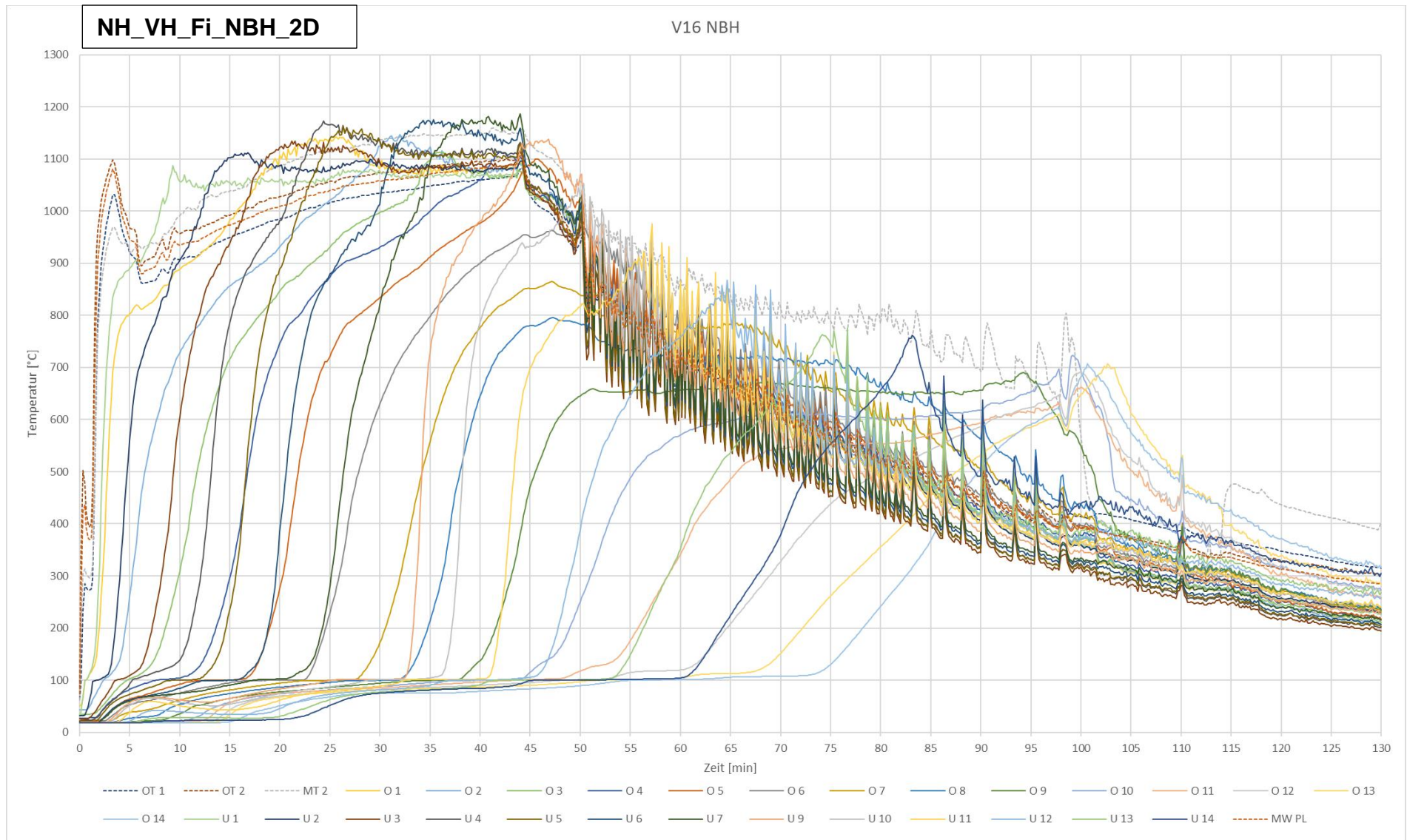


Abbildung 36: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 16 - NH_VH_Fi_NBH_2D

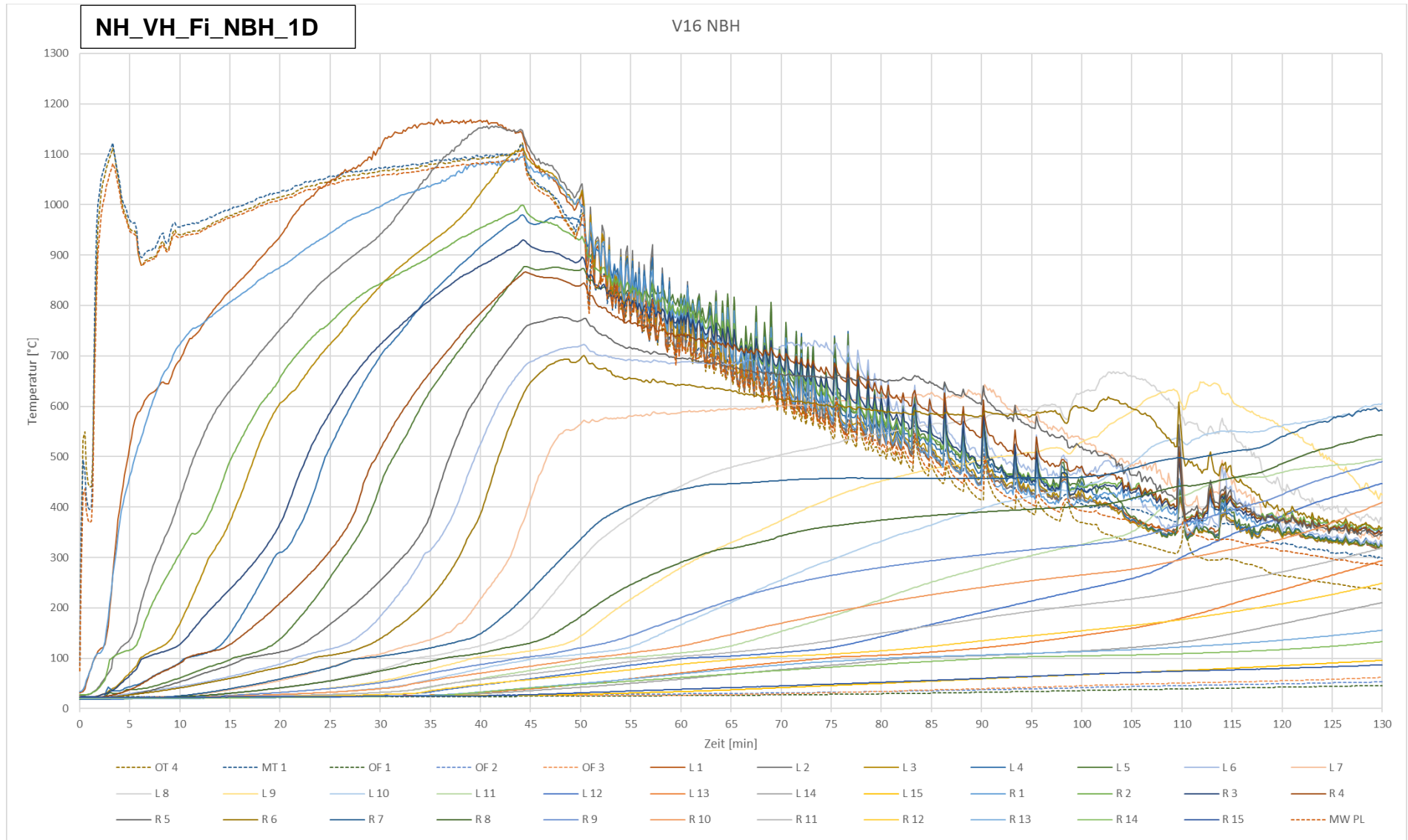


Abbildung 37: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 16 - NH_VH_Fi_NBH_1D

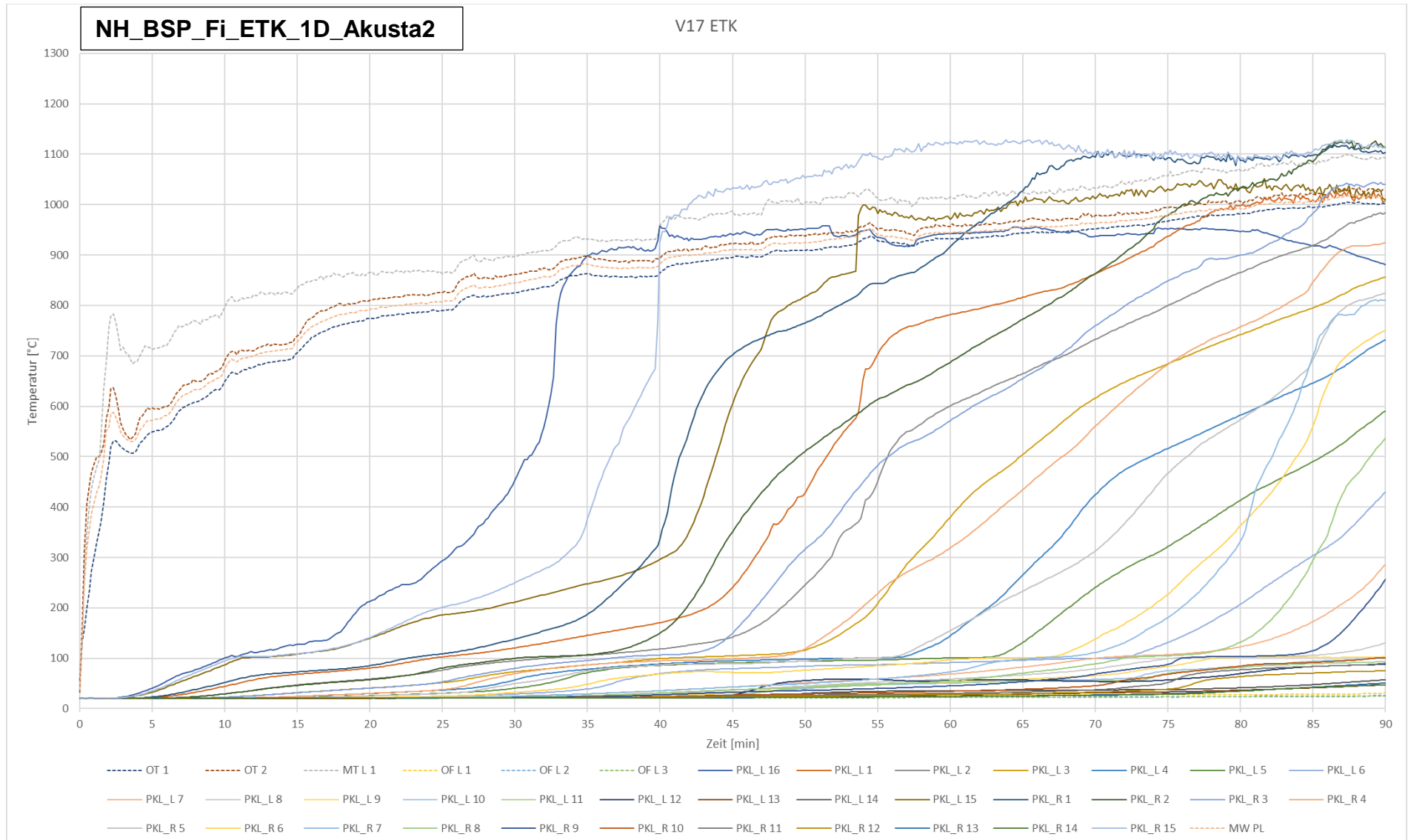


Abbildung 38: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 17 - NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta2

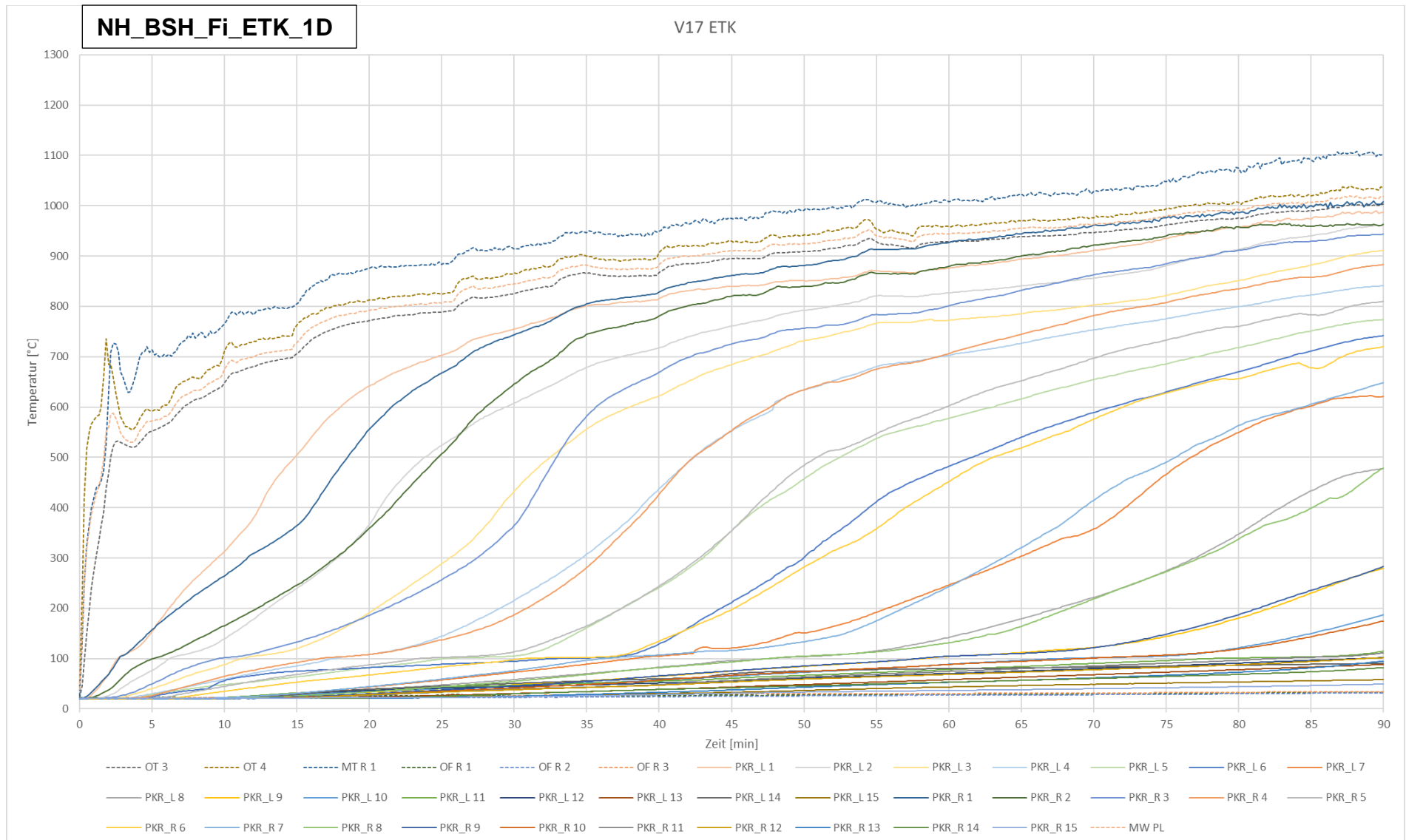


Abbildung 39: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 17 - NH_BSH_Fi_ETK_1D

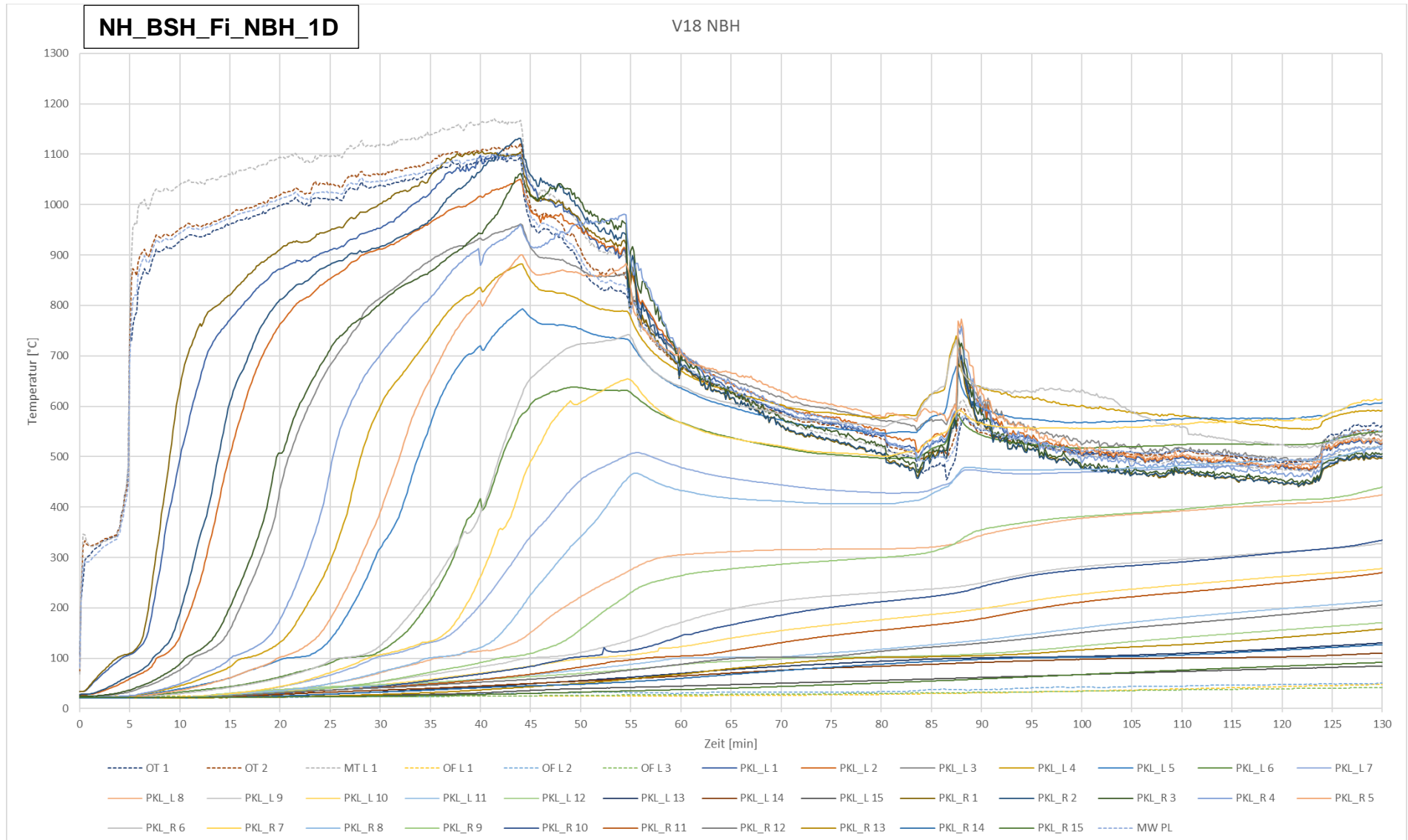


Abbildung 40: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 18 - NH_BSH_Fi_NBH_1D

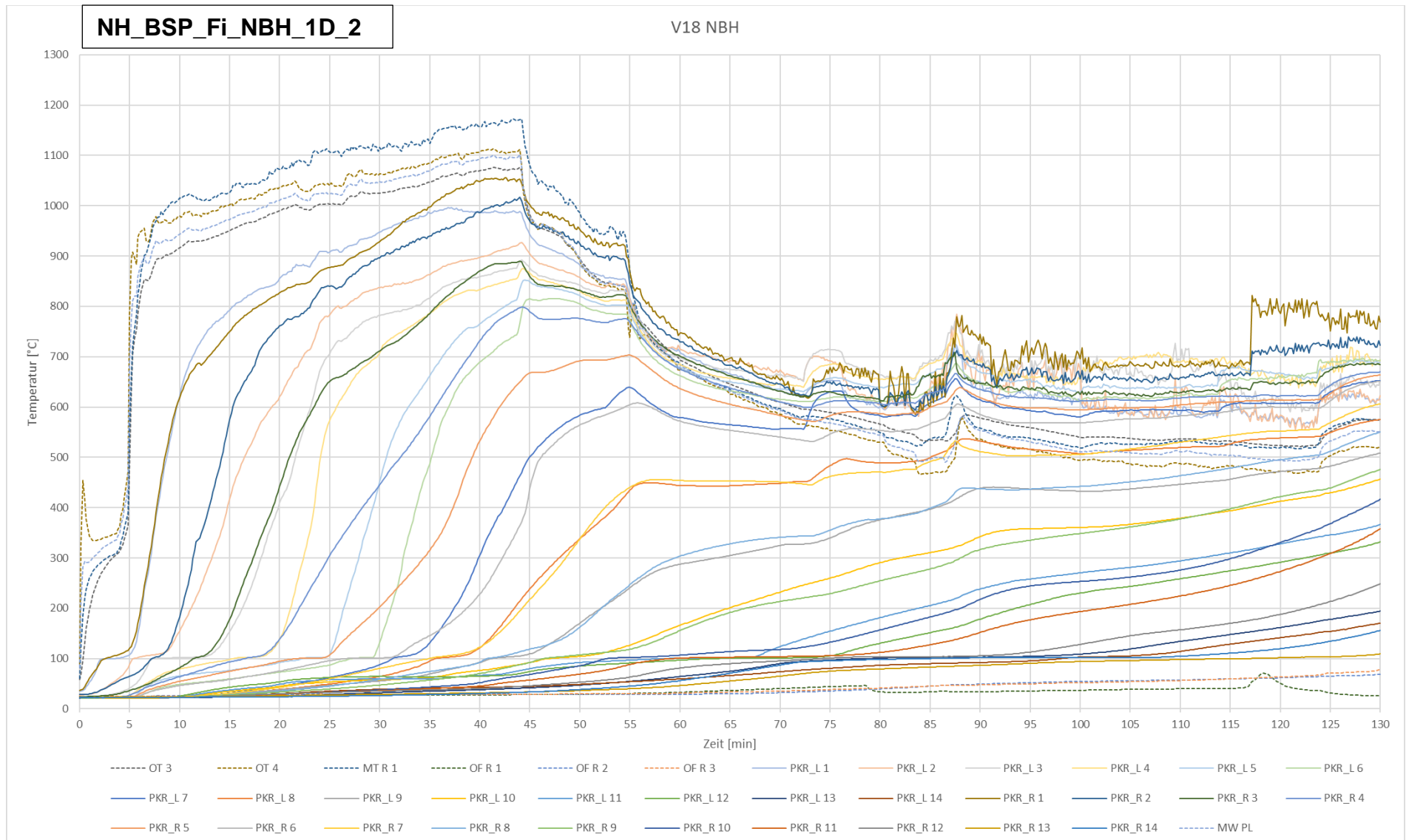


Abbildung 41: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 18 - NH_BSP_Fi_NBH_1D_2

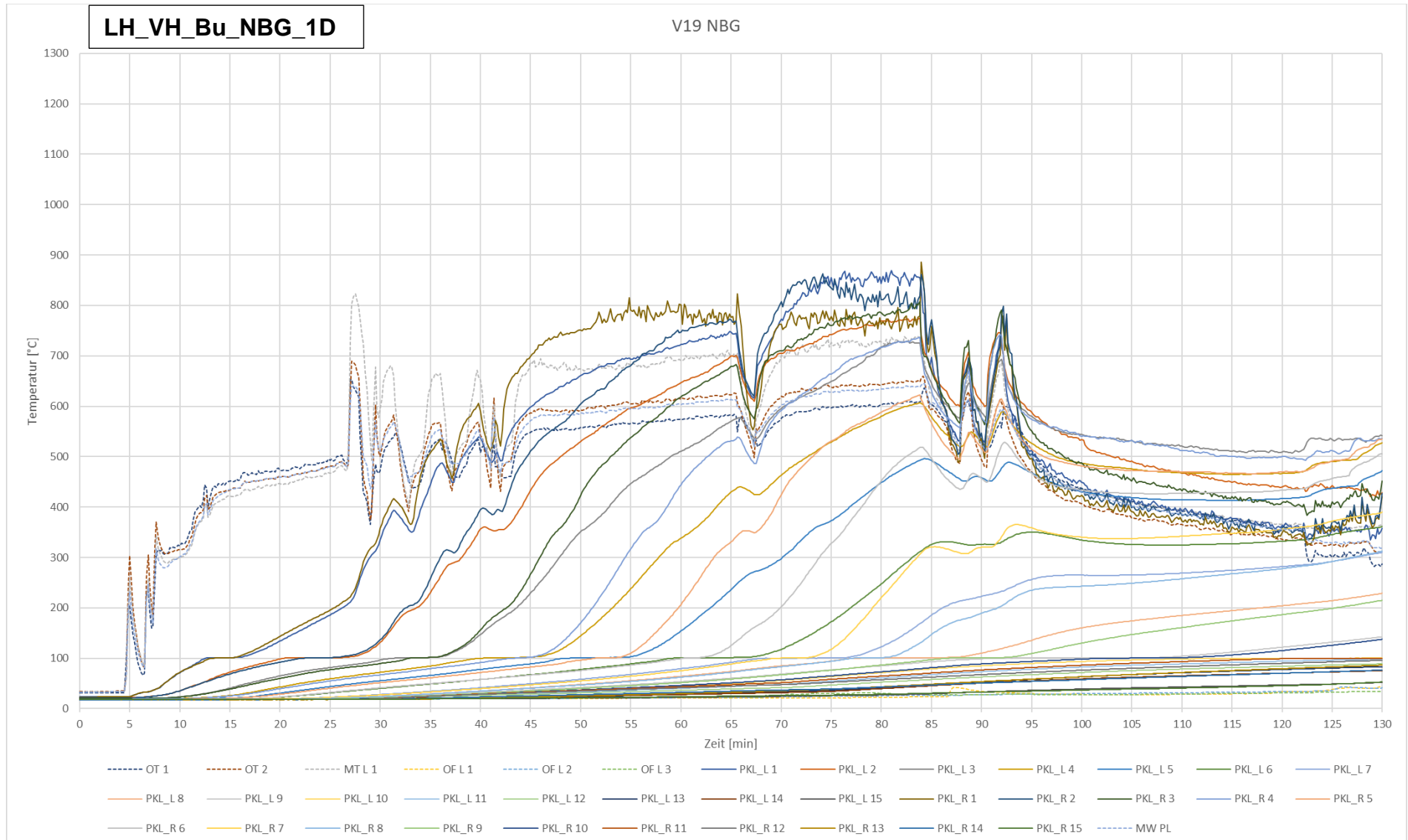


Abbildung 42: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 19 - LH_VH_Bu_NBG_1D

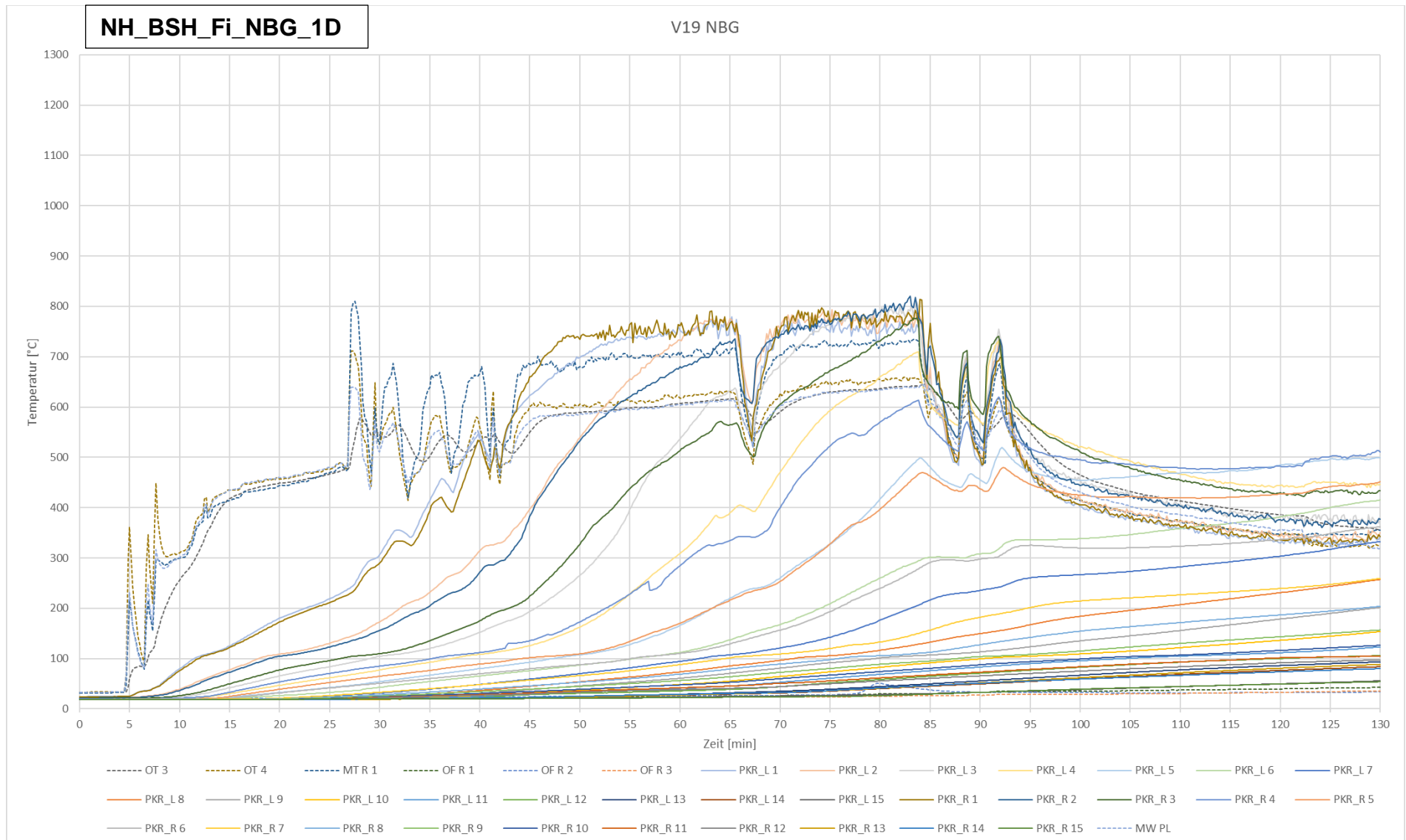


Abbildung 43: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 19 - NH_BSH_Fi_NBG_1D

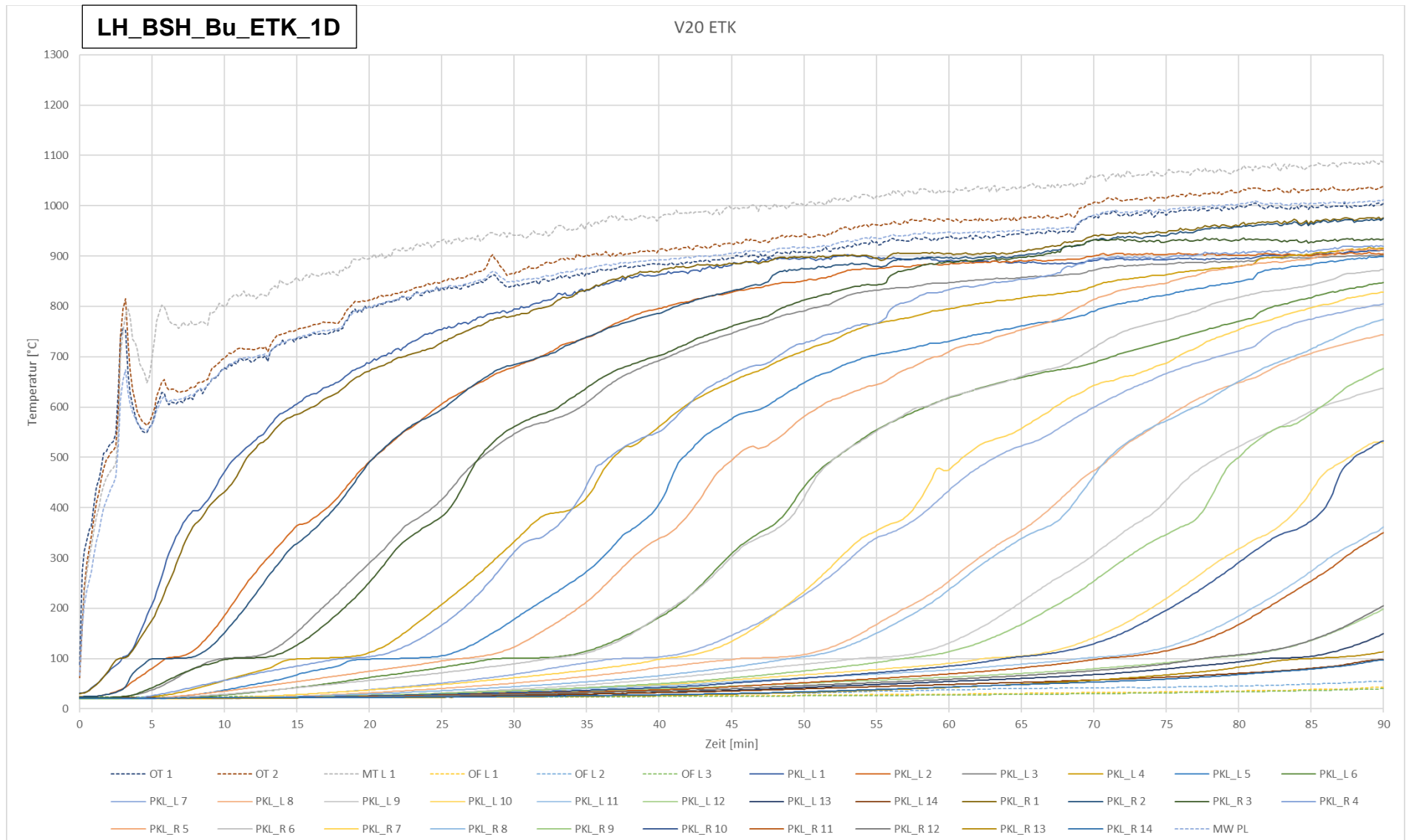


Abbildung 44: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 20 - LH_BSH_Bu_ETK_1D

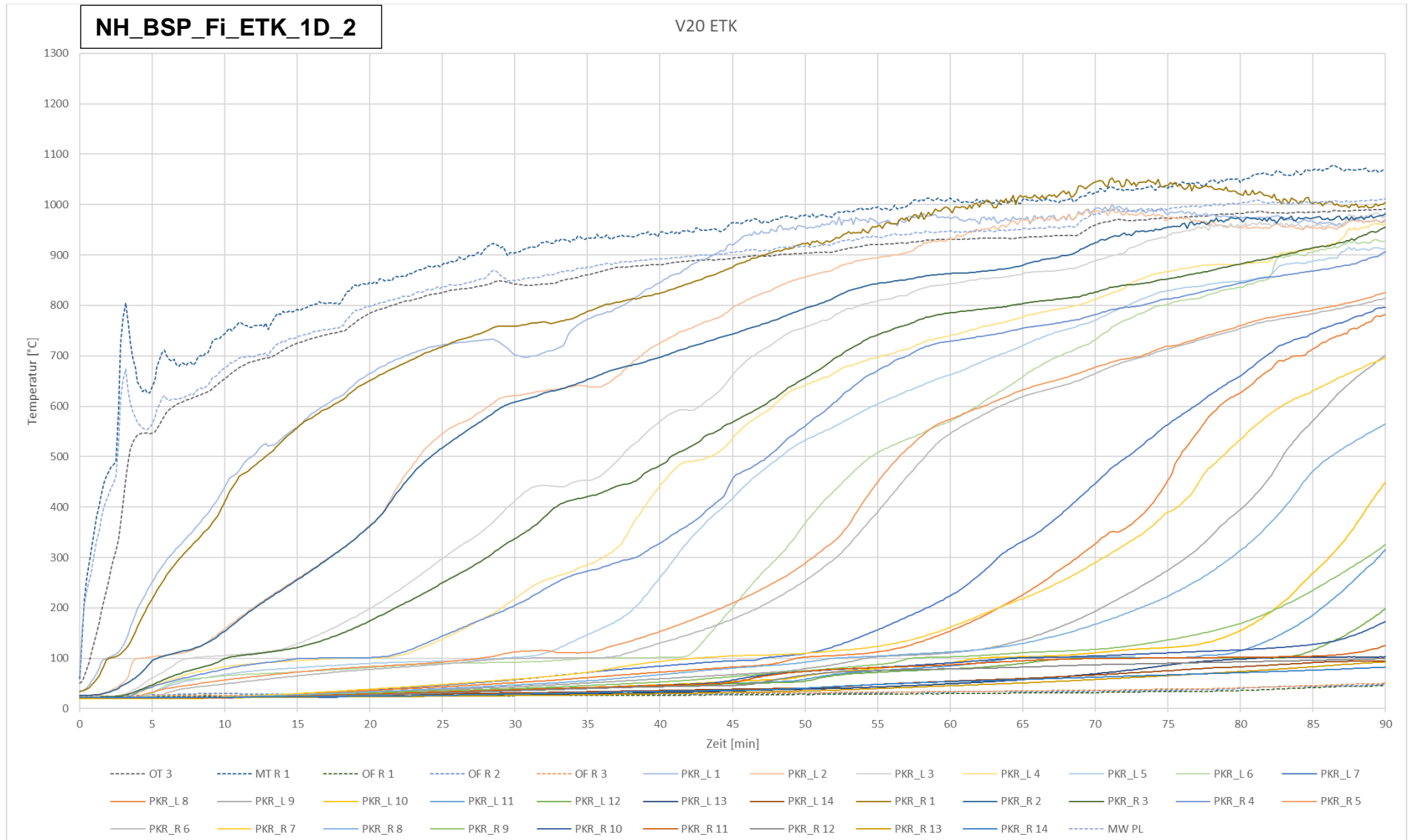


Abbildung 45: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 20 - NH_BSP_Fi_ETK_1D_2

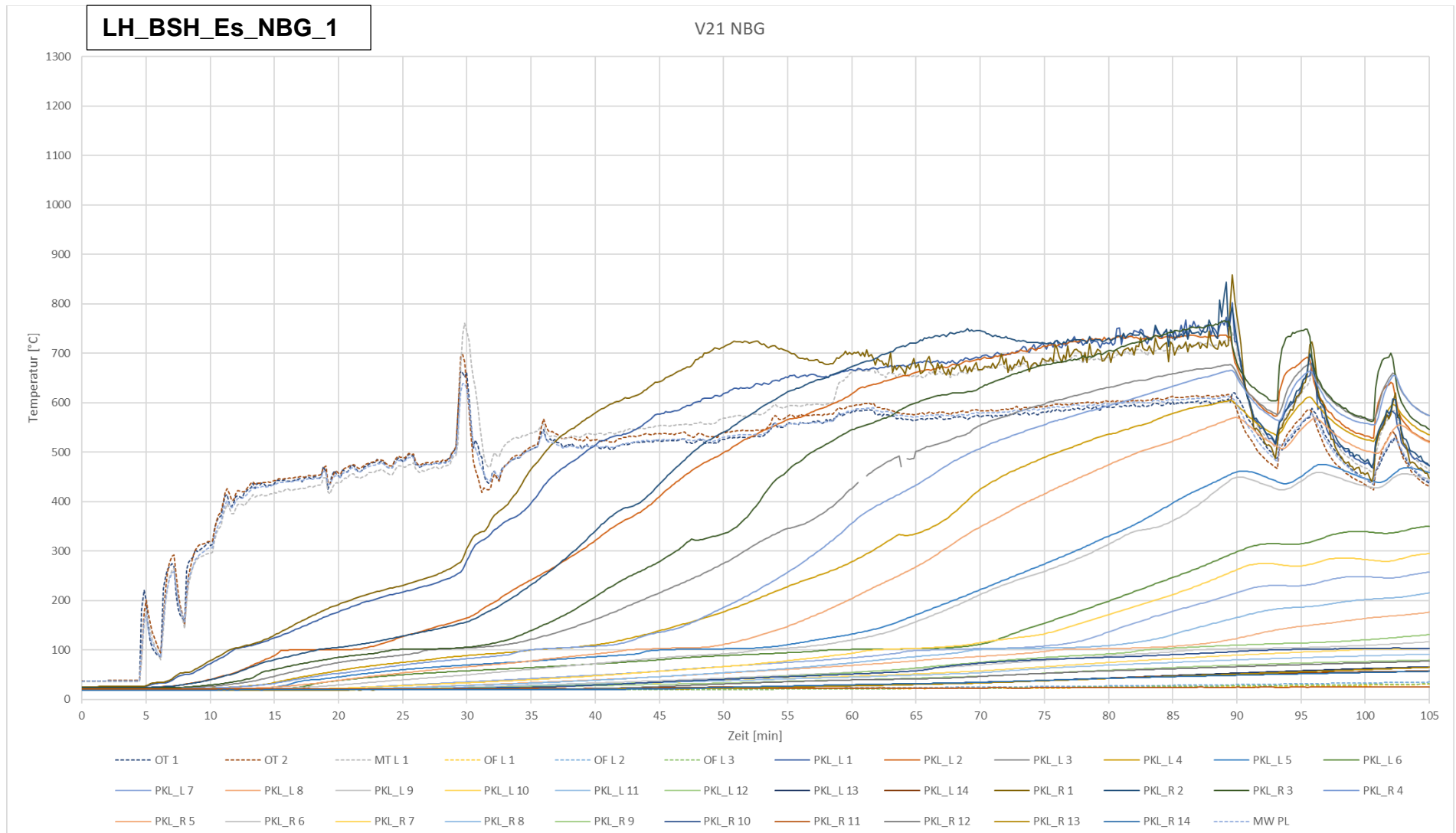


Abbildung 46: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 21 - LH_BSH_Es_NBG_1D

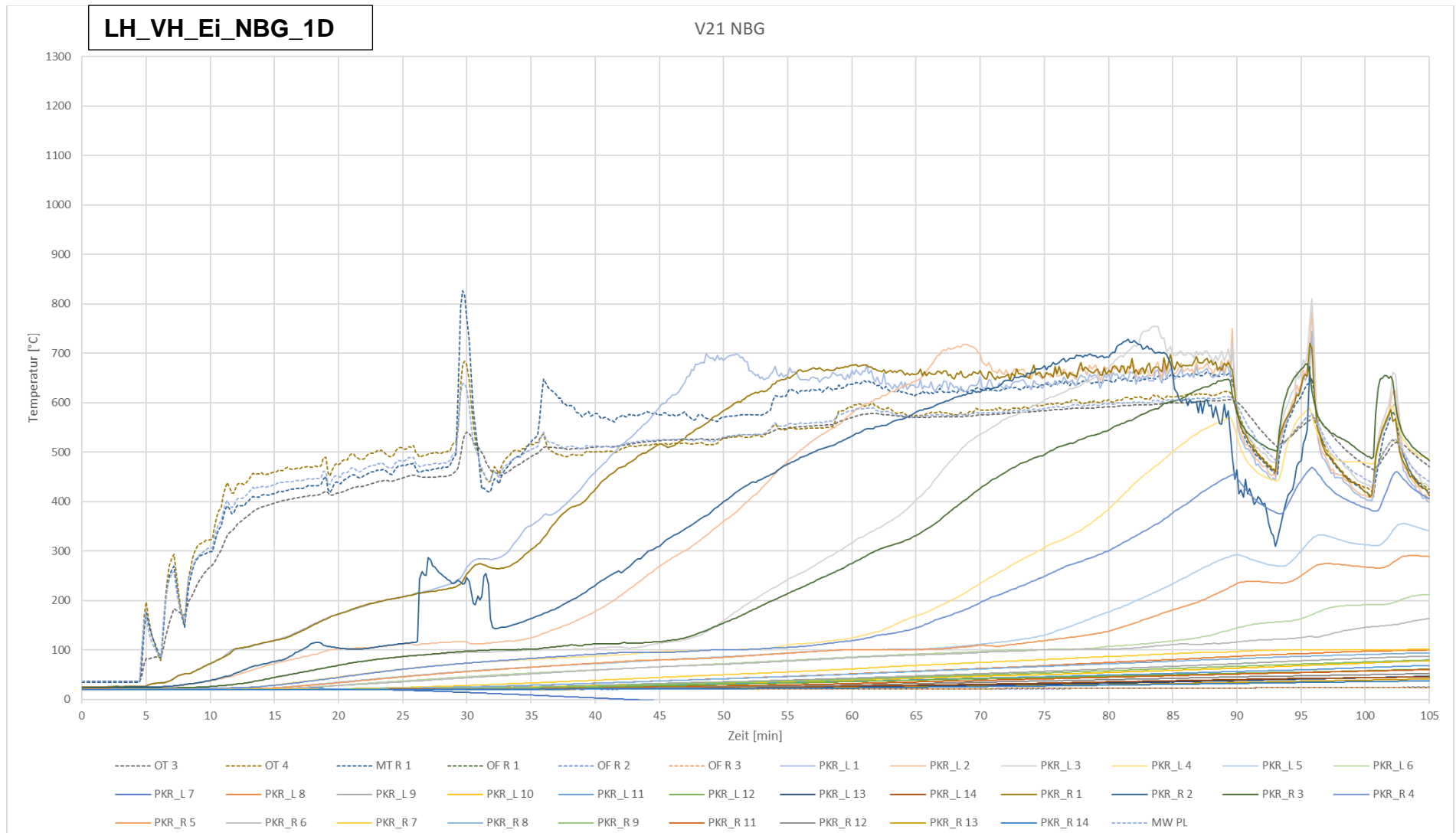


Abbildung 47: Temperaturmesswerte während der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase von Versuch 21 - LH_VH_Ei_NBG_1D

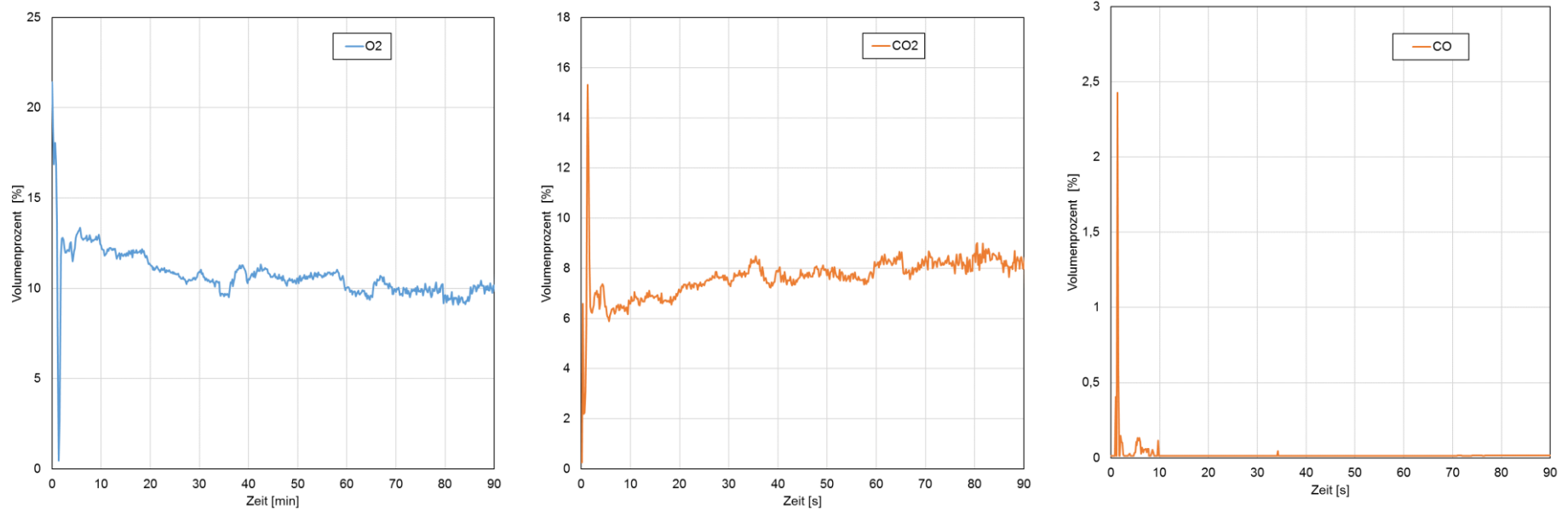


Abbildung 48: O₂, CO₂ und CO Gaskonzentration im Brandraum beim ETK-Versuch 2

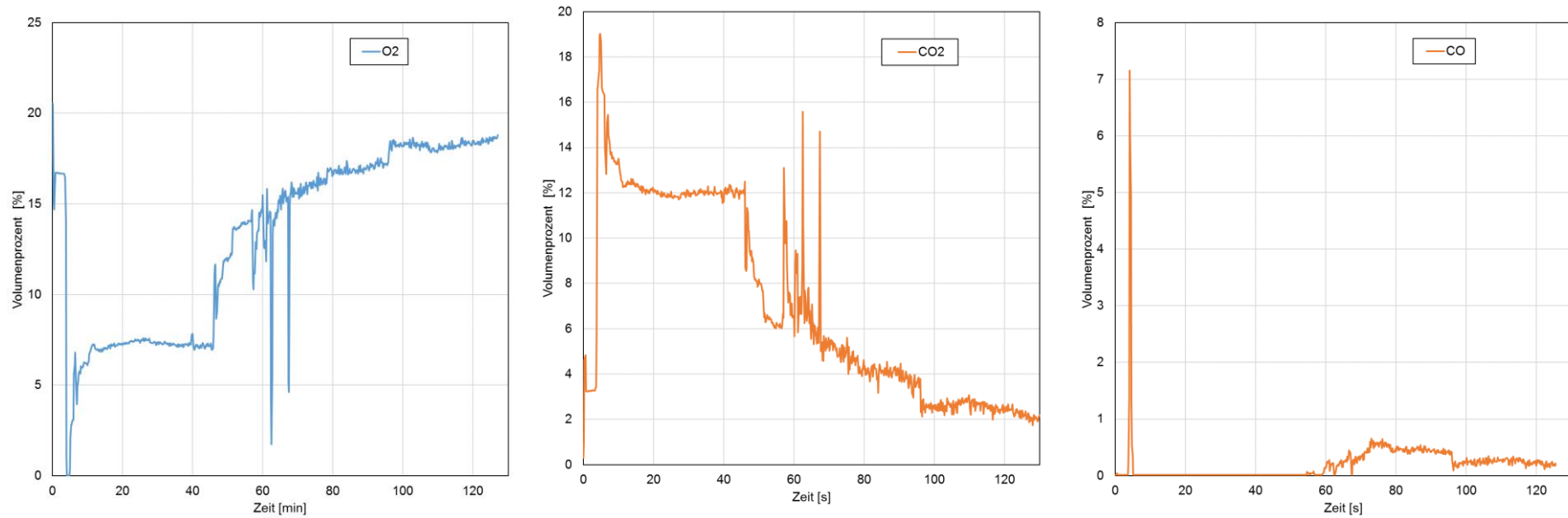


Abbildung 49: O₂, CO₂ und CO Gaskonzentration im Brandraum beim NBH-Versuch 8

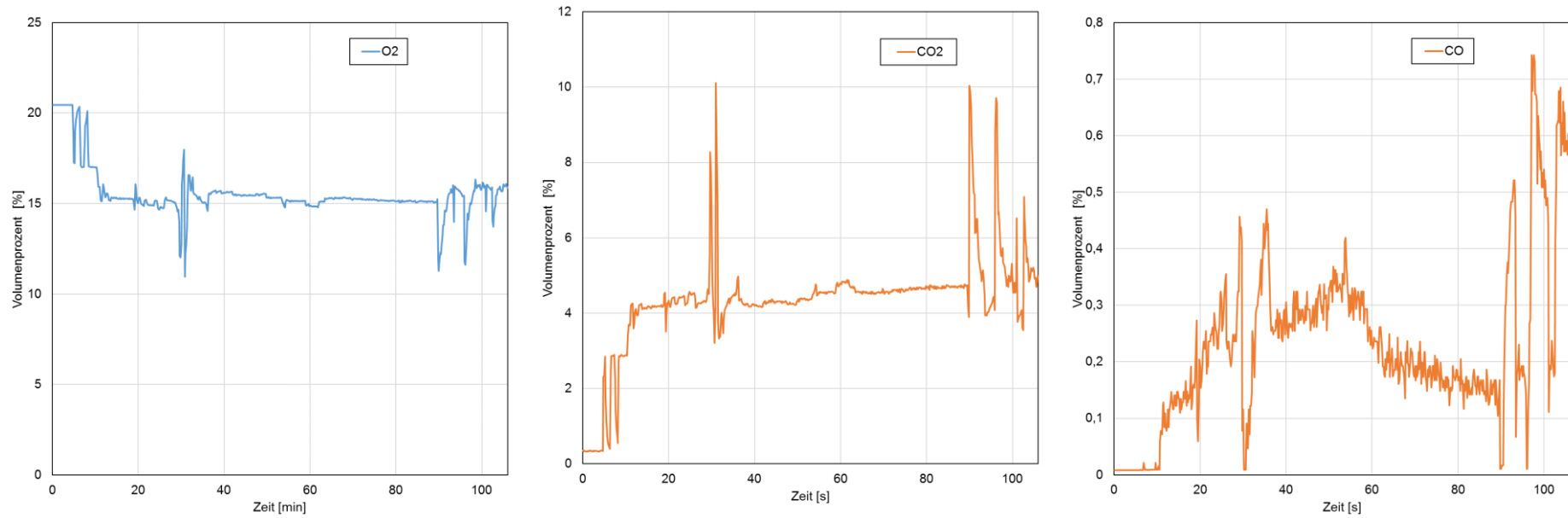


Abbildung 50: O₂, CO₂ und CO Gaskonzentration im Brandraum beim NBG-Versuch 21

Anhang 3 - Fotodokumentation

Prüfkörper NH_VH_Fi_ETK_1D (V 15) nach Brandbeanspruchung



NH_VH_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_VH_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_VH_Fi_ETK_1D Restquerschnitt

Prüfkörper NH_VH_Fi_NBH_1D (V 16) nach Brandbeanspruchung



NH_VH_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht

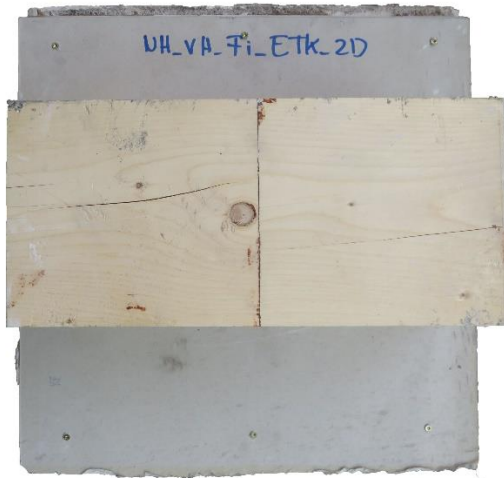


NH_VH_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_VH_Fi_NBH_1D Restquerschnitt

Prüfkörper NH_VH_Fi_ETK_2D (V 15) nach Brandbeanspruchung



NH_VH_Fi_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch



NH_VH_Fi_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_VH_Fi_ETK_2D Restquerschnitt

Prüfkörper NH_VH_Fi_NBH_2D (V16) nach Brandbeanspruchung



NH_VH_Fi_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



NH_VH_Fi_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_VH_Fi_NBH_2D Restquerschnitt

Prüfkörper NH_BSH_Fi_ETK_1D (V 17) nach Brandbeanspruchung



NH_BSH_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSH_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSH_Fi_ETK_1D Restquerschnitt

Prüfkörper NH_BSH_Fi_NBH_1D (V 18) nach Brandbeanspruchung



— NH_BSH_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



— NH_BSH_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSH_Fi_NBH_1D Restquerschnitt

Prüfkörper NH_BSH_Fi_ETK_2D (V 1) nach Brandbeanspruchung



NH_BSH_Fi_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch



NH_BSH_Fi_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSH_Fi_ETK_2D Restquerschnitt

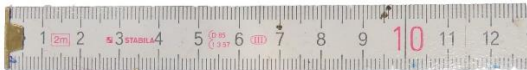
Prüfkörper NH_BSH_Fi_NBH_2D (V 14) nach Brandbeanspruchung



NH_BSH_Fi_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



NH_BSH_Fi_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSH_Fi_NBH_2D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_BSH_Fi_NBG_1D (V 19) nach Brandbeanspruchung



NH_BSH_Fi_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSH_Fi_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSH_Fi_NBG_1D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_BSP_Fi_ETK_1D (V 1) nach Brandbeanspruchung



NH_BSP_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSP_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSP_Fi_ETK_1D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_BSP_Fi_NBH_1D (V14) nach Brandbeanspruchung



NH_BSP_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSP_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSP_Fi_NBH_1D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_BSP_Fi_ETK_1D_2 (V20) nach Brandbeanspruchung



NH_BSP_Fi_ETK_1D_2 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSP_Fi_ETK_1D_2 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSP_Fi_ETK_1D_2 Restquerschnitt

Versuchskörper NH_BSP_Fi_NBH_1D_2 (V18) nach Brandbeanspruchung



NH_BSP_Fi_NBH_1D_2 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSP_Fi_NBH_1D_2 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSP_Fi_NBH_1D_2 Restquerschnitt

Versuchskörper NH_FSH_Fi_ETK_1D (V 5) nach Brandbeanspruchung



NH_FSH_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_FSH_Fi_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_FSH_Fi_ETK_1D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_FSH_Fi_NBH_1D (V4) nach Brandbeanspruchung



NH_FSH_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_FSH_Fi_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_FSH_Fi_NBH_1D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_FSH_Fi_ETK_2D (V3) nach Brandbeanspruchung



NH_FSH_Fi_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch



NH_FSH_Fi_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_FSH_Fi_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_FSH_Fi_NBH_2D (V11) nach Brandbeanspruchung



NH_FSH_Fi_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



NH_FSH_Fi_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_FSH_Fi_NBH_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Bu_ETK_1D (V13) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Bu_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_VH_Bu_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Bu_ETK_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Bu_NBH_1D (V 6) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Bu_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_VH_Bu_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Bu_NBH_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Bu_ETK_2D (V 13) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Bu_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch

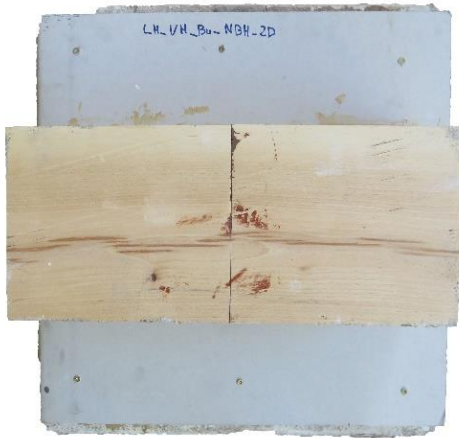


LH_VH_Bu_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Bu_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Bu_NBH_2D (V 8) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Bu_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_VH_Bu_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Bu_NBH_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Bu_NBG_1D (V 19) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Bu_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_VH_Bu_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Bu_NBG_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Ei_ETK_1D (V 7) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Ei_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_VH_Ei_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Ei_ETK_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Ei_NBH_1D (V 8) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Ei_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_VH_Ei_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Ei_NBH_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Ei_ETK_2D (V 7) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Ei_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_VH_Ei_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Ei_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Ei_NBH_2D (V 6) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Ei_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_VH_Ei_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Ei_NBH_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_VH_Ei_NBG_1D (V 21) nach Brandbeanspruchung



LH_VH_Ei_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_VH_Ei_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_VH_Ei_NBG_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Es_ETK_1D (V 3) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Es_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_BSH_Es_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Es_ETK_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Es_NBH_1D (V 12) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Es_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_BSH_Es_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Es_NBH_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Es_ETK_2D (V 2) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Es_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_BSH_Es_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Es_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Es_NBH_2D (V 4) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Es_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_BSH_Es_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Es_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Es_NBG_1D (V 21) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Es_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_BSH_Es_NBG_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Es_NBG_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Bu_ETK_1D (V 20) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Bu_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht

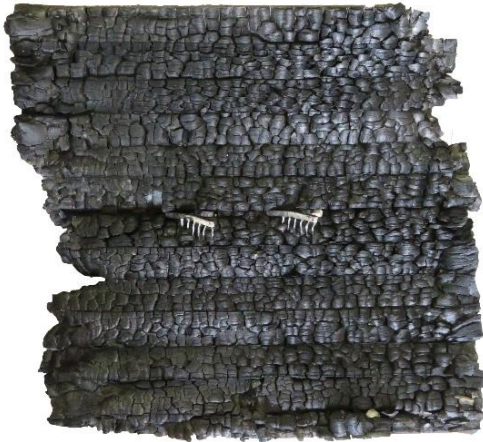


LH_BSH_Bu_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Bu_ETK_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Bu_NBH_1D (V 11) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Bu_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_BSH_Bu_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Bu_NBH_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Bu_ETK_2D (V 5) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Bu_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_BSH_Bu_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Bu_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_BSH_Bu_NBH_2D (V 12) nach Brandbeanspruchung



LH_BSH_Bu_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_BSH_Bu_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_BSH_Bu_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_FSH_Bu_ETK_1D (V 9) nach Brandbeanspruchung



LH_FSH_Bu_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_FSH_Bu_ETK_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_FSH_Bu_ETK_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_FSH_Bu_NBH_1D (V 10) nach Brandbeanspruchung



LH_FSH_Bu_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



LH_FSH_Bu_NBH_1D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_FSH_Bu_NBH_1D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_FSH_Bu_ETK_2D (V 9) nach Brandbeanspruchung



LH_FSH_Bu_ETK_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_FSH_Bu_ETK_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_FSH_Bu_ETK_2D Restquerschnitt

Versuchskörper LH_FSH_Bu_NBH_2D (V 10) nach Brandbeanspruchung



LH_FSH_Bu_NBH_2D Versuchskörper, unbeanspruch



LH_FSH_Bu_NBH_2D brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



LH_FSH_Bu_NBH_2D Restquerschnitt

Versuchskörper NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta1 (V 2) nach Brandbeanspruchung



NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta1 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta1 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt



NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta1 Restquerschnitt

Versuchskörper NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta2 (V 17) nach Brandbeanspruchung



NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta2 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht



NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta2 brandbeanspruchte Seite, Kohleschicht entfernt

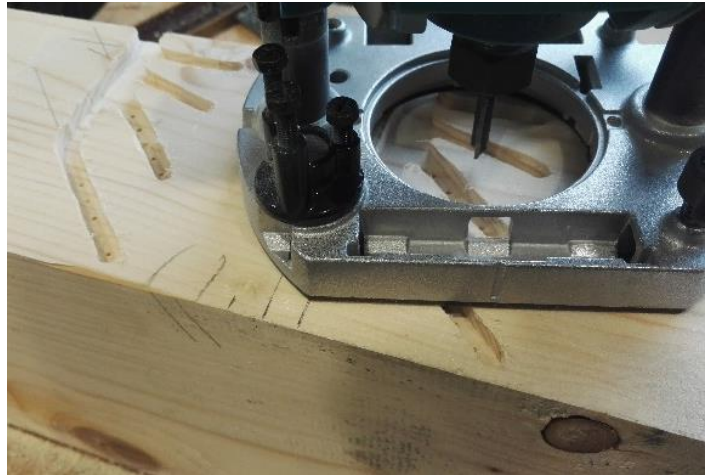


NH_BSP_Fi_ETK_1D_Akusta2 Restquerschnitt

Prüfkörperaufbau (eindimensional)



Bohren der Messstellen



Fräsen der Thermoelement-Führungsnuten



Verfugung



Verklebung der Versuchskörper



Anbringen der GKF-Umrandung



1D Versuchskörper fertig

Prüfkörperaufbau (mehrdimensional)



— Verklebter Versuchskörper mehrdimensional



— Anbringen der GKF Platten



Verfugen



2D Versuchskörper fertig



Lagerung der Versuchskörper

Brandofen / Messtechnik



Kleinprüfstand nach DIN 4102-8



Prüfofen mit eingebautem Prüfkörper



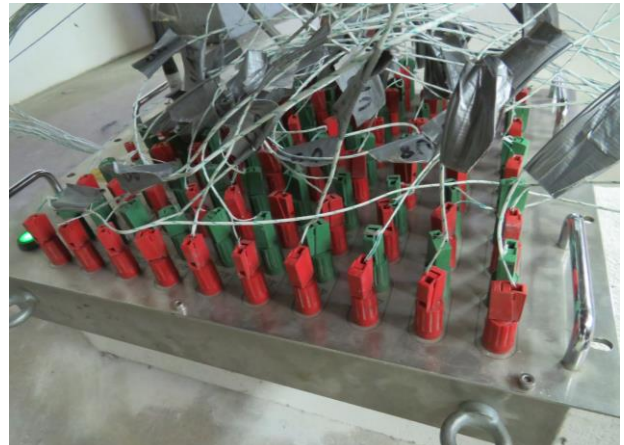
Anordnung der Ofenthermoelemente



Auskleidung des Brandraumes (Keramikwolle)



Anschlussklemmen der Thermoelemente



Steckpult für die Thermoelemente



Mantelthermoelement auf Prüfkörperoberfläche



Abdichtung der Thermoelementnuten



Eingebauter 2D Prüfkörper



Beobachtung des Flammenbildes



Wiegevorgang nach Versuchsende



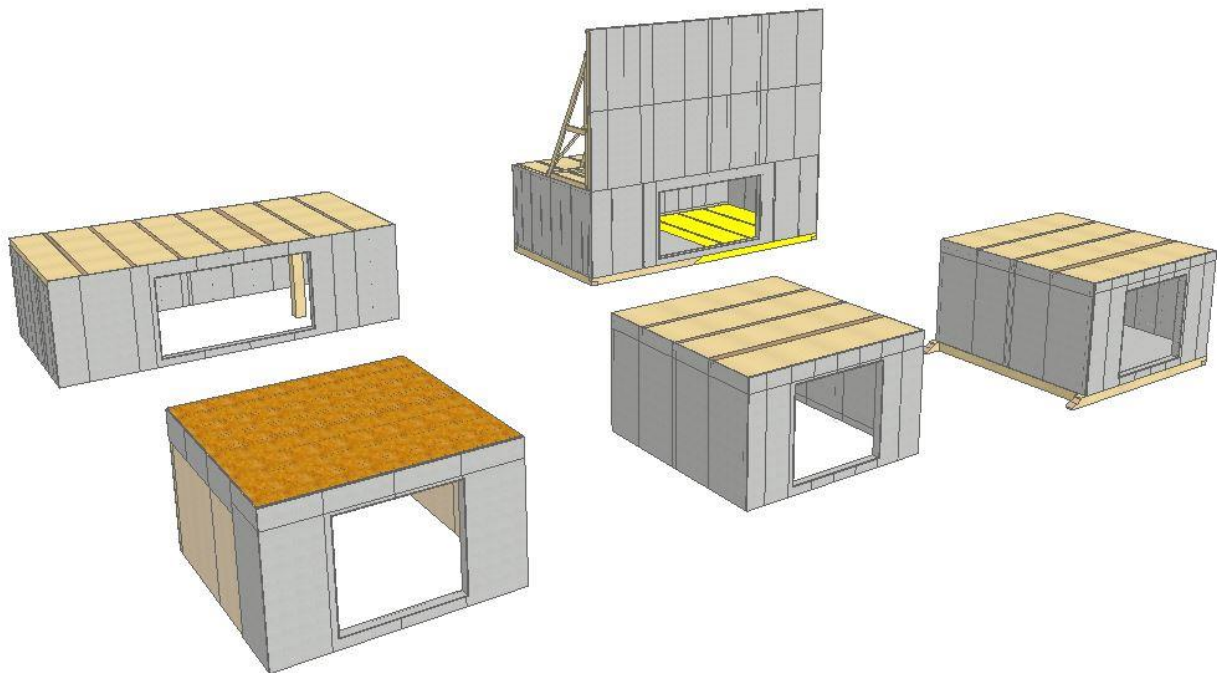
Entfernen der Kohleschicht



4.6 Anhang: Planung der abschließenden Realbrandversuche

Planung der abschließenden Realbrandversuche

Forschungsvorhaben TIMpuls



Inhaltsverzeichnis

1. Ziele der großmaßstäblichen Realbrandversuche	4
1.1 Globale Ziele.....	4
1.2 Konkrete Untersuchungsziele	4
2. Konstruktion und Konzipierung der Versuche	5
2.1 Einleitung.....	5
2.2 Übersicht zu den geplanten Brandversuchen.....	6
2.3 Ziele der Brandversuche	7
2.4 Grundrisse	7
2.5 Öffnungsfaktor	9
2.6 Bauteilkatalog	10
2.6.1 V0; BV_4.5_4.5_nb.....	10
2.6.2 V1; BV_4.5_4.5_ M-HolzBauRI.....	10
2.6.3 V2; BV_4.5_4.5_2xWand	11
2.6.4 V3; BV_4.5_9_Decke	11
2.6.5 V4; BV_4.5_9_Decke&Wand.....	12
2.7 Brandlast.....	12
2.8 Auswahl der Bauteile	13
2.8.1 Wand_BSP.....	13
2.8.2 Wand_HTB.....	14
2.8.3 Decke_BSH.....	15
2.8.4 Decke_HTB.....	16
2.9 Anschlüsse und Elementfugen.....	17
2.9.1 Wand – Wand Anschlüsse.....	17
2.9.2 Wand - Decken Anschlüsse.....	18
2.9.3 Elementstöße	23
2.10 Befestigung der Bekleidungslagen.....	25
2.11 Fassade.....	26
2.12 Haustechnische Installationen.....	26
2.13 Belastung.....	26
2.14 Fußbodenaufbau.....	26
3. Messtechnik	27
4. Kontakt	28
Literaturverzeichnis	29

1. Ziele der großmaßstäblichen Realbrandversuche

1.1 Globale Ziele

Realmaßstäbliche Belegversuche zum Beleg der innerhalb des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse und als Grundlage zum Nachweise der bauordnungsrechtlichen Schutzziele:

- Tragfähigkeit
- Raumabschluss (Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch -> Durchtritt von Feuer, Rauch- und Heißgasen)
- Selbstverlöschen bzw. Löschbarkeit (Nachbrandverhalten)
- Begrenzung der Brandausbreitung

1.2 Konkrete Untersuchungsziele

- 1) Beleg der Ergebnisse der Versuche im Bauteilmaßstab im „realen Versuchsbauwerk“ unter Naturbrandbedingungen mit beweglichen Brandlasten
- 2) Einfluss brennbarer Oberfläche auf den Brandverlauf
- 3) Verhalten der Brandschutzbekleidung und deren Schutzzeiten unter Naturbrandbeanspruchung
- 4) Verhalten bzgl. Selbstverlöschen und Nachbrandverhalten
- 5) Löschbarkeit der Konstruktionen
- 6) Nachweis und abschließende Beurteilung der Vorgaben der M-HolzBauRI
- 7) Beeinflussung des Zeitpunkts der Brandweiterleitung in das Geschoss über dem Brandgeschoss durch brennbare Oberflächen im Raum
- 8) Bewertung der Standsicherheit unter Naturbrandbeanspruchung
- 9) Bewertung des Raumabschlusses (Feuer und Rauch, Wärmedämmung) unter Naturbrandbeanspruchung

2. Konstruktion und Konzipierung der Versuche

2.1 Einleitung

Das Ziel ist die Untersuchung von Raumbränden in Holzbaukonstruktionen mit realistischer mobiler Brandlast und typischer konstruktiver Randbedingungen

- unter Berücksichtigung von ungeschützten Bauteiloberflächen, bzw.
- unter Berücksichtigung eines Versagens der Brandschutzbekleidung während des Brandverlaufes bzw.
- unter Berücksichtigung vollständig geschützter Bauteiloberflächen.

Zusätzlich ergeben sich infolge der unterstützenden interessierten Kreise weiterführende Rahmenbedingungen für die einbezogenen Konstruktionsformen.

So soll im Hinblick auf die Anwendung von vollständig gekapselten Holztafel- oder Holzmassivbauteilen, die infolge der Bekleidung keinen Beitrag zum Brandgeschehen aufweisen, aus Fertigungsgründen (leichtere Verfügbarkeit und Herstellungszeit) auf Holztafelbauteile zurückgegriffen werden.

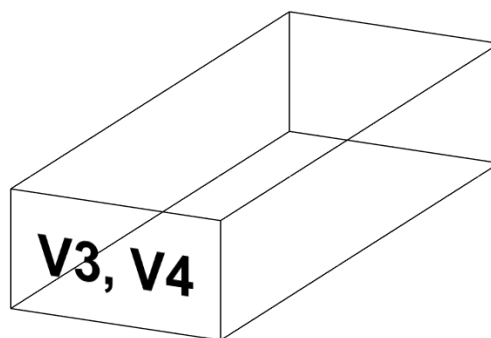
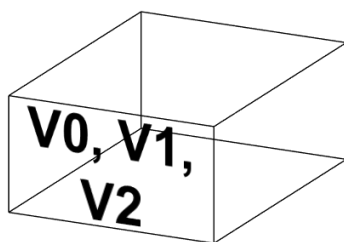
Die globale Planung sieht vor je Brandraum mind. zwei Wände in Holzmassivbauweise und mind. eine Wand in Holztafelbauweise zu errichten.

Die Decke sollen vorzugsweise in Holzmassivbauweise ausgeführt werden, sofern sie sich am Brandgeschehen beteiligen (sichtbar oder planmäßig frühzeitiges Versagen der Brandschutzbekleidung). Produkte in Holzmassivbauweise sollen in diesem Fall kein Abfallen von Lamellen (thermisches Delaminieren) zeigen. Die Versuchskonzeption soll somit keine Effekte aufzeigen, die zur weiterführenden Beeinflussung des Brandverlaufs und zusätzlichen Parametern innerhalb der Versuche führen, z.B. ein „multiple flash-over szenarios“.

2.2 Übersicht zu den geplanten Brandversuchen

Es sind die nachstehenden fünf Brandversuche geplant.

Lfd. Nr.	Versuch	Bezeichnung	Beschreibung
1	V0	BV_4.5_4.5_nb	Raum komplett nichtbrennbar (vollständige Kapselung über den Brandverlauf)
2	V1	BV_4.5_4.5_M-HolzBauRI	Decke sichtbar, alle Wände aus Massivholz und 18 mm Bekleidung nach Entwurf M-HolzBauRI
3	V2	BV_4.5_4.5_2xWand	Zwei gegenüberliegende Wände sichtbar, alle anderen Bauteile 2x18 mm Brandschutzbekleidung
4	V3	BV_4.5_9_Decke	Decke sichtbar, eine HTB-Wand 2x12,5 mm (planmäßiges Versagen erwartet), alle anderen Bauteile mit 2x18 mm Brandschutzbekleidung
5	V4	BV_4.5_9_Decke & Wand	Decke und eine Wand sichtbar. Lineare Bauteile (z.B. Stützen) aus Holz werden integriert



2.3 Ziele der Brandversuche

Folgende Zielsetzungen ergeben sich für die fünf Brandversuche.

Versuch	Bezeichnung	Ziele
V0	BV_4.5_4.5_nb	Referenzversuch mit Raum komplett nichtbrennbar
V1	BV_4.5_4.5_ M-Holz-BauRI	Einfluss einer sichtbaren brennbaren Decke und Schutzzeiten der Wände mit Bekleidung nach Entwurf M-HolzBauRI inklusive Löscheinsatz der Feuerwehr
V2	BV_4.5_4.5_2xWand	Einfluss zweier gegenüberliegender sichtbaren brennbaren Wände in einem quadratischen Raum
V3	BV_4.5_9_Decke	Selbstverlöschen des Raumes und planmäßiges Versagen der Bekleidung einer HTB-Wand
V4	BV_4.5_9_Decke & Wand	Einfluss einer sichtbaren brennbaren Wand, einer sichtbaren brennbaren Decken und zusätzlicher brennbarer linearer Bauteile wie Stützen

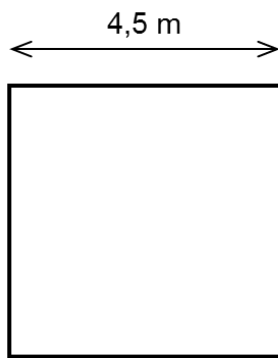
2.4 Grundrisse

Es sind die folgenden zwei Raumgrundrisse geplant.

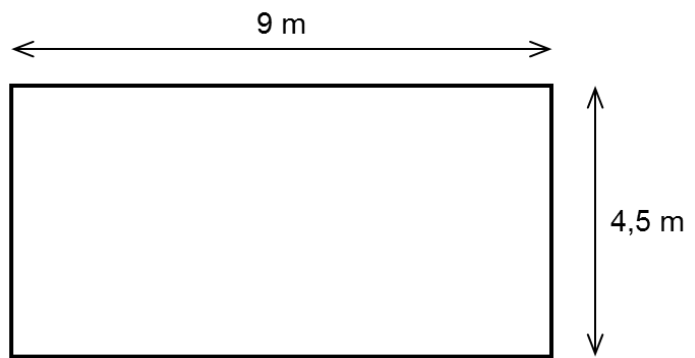
Ver-such	Bezeichnung	Raum Breite* [m]	Raum Länge* [m]	Raum Höhe* [m]	Nettogrund-fläche [m ²]	Nettovolu-men [m ³]
V0	BV_4.5_4.5_nb	4,5	4,5	2,4	20,25	48,6
V1	BV_4.5_4.5_ M-HolzBauRI	4,5	4,5	2,4	20,25	48,6
V2	BV_4.5_4.5_2xWand	4,5	4,5	2,4	20,25	48,6
V3	BV_4.5_9_Decke	4,5	9	2,4	40,5	97,2
V4	BV_4.5_9_Decke & Wand	4,5	9	2,4	40,5	97,2

*Angaben als Nettowerte

Grundrisse

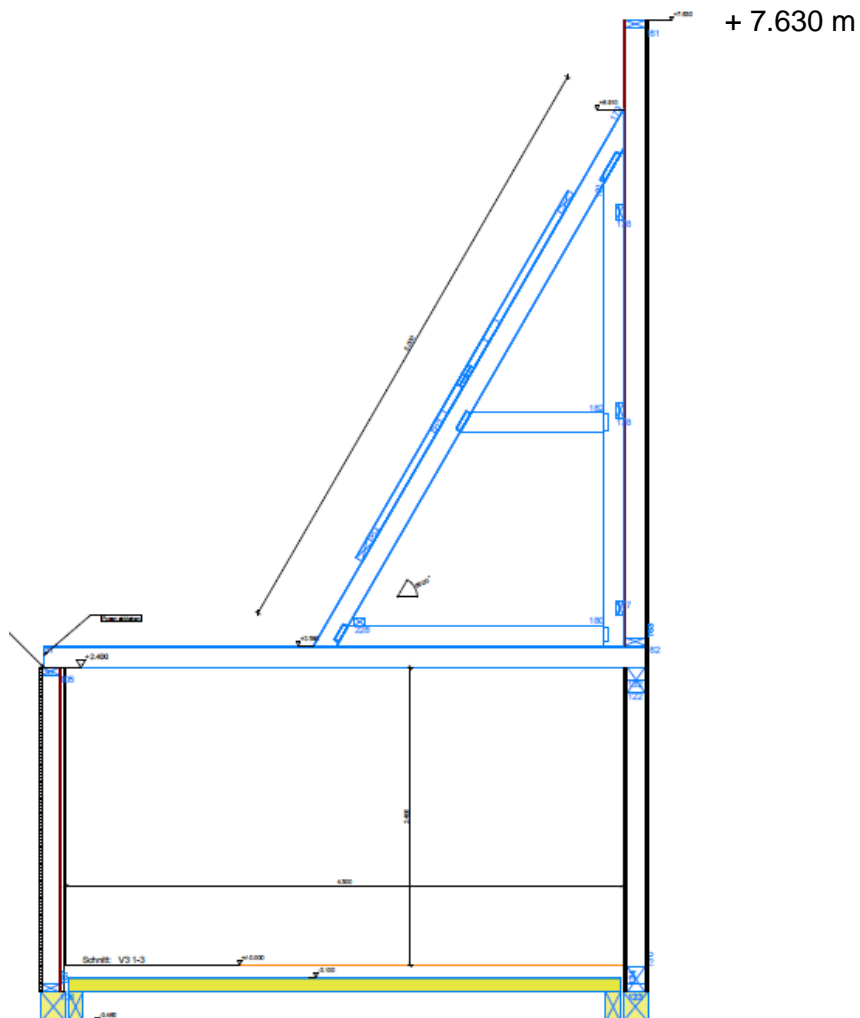


V0, V1, V2



V3, V4

Schnitt



2.5 Öffnungsfaktor

Alle Raumkonstellationen bzw. Versuchsdurchgänge verfügen über eine Fensteröffnung.

Der Öffnungsfaktor wird in Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen auf Basis der Naturbrandkurve nach DIN EN 1991-1-2 Anhang AA zu $O = 0,094 \text{ m}^{1/2}$ gewählt.

Das Fenster ist von Beginn an geöffnet. Nach Gleichung 3.1 [1] lassen sich für den Öffnungsfaktor von $0,094 \text{ m}^{1/2}$ folgende mögliche Öffnungsgrößen und -geometrie ableiten.

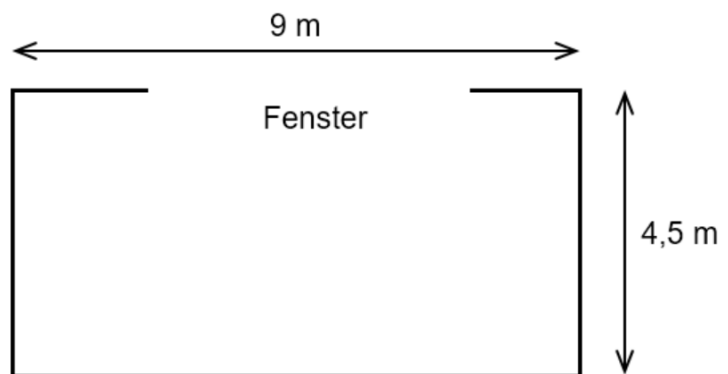
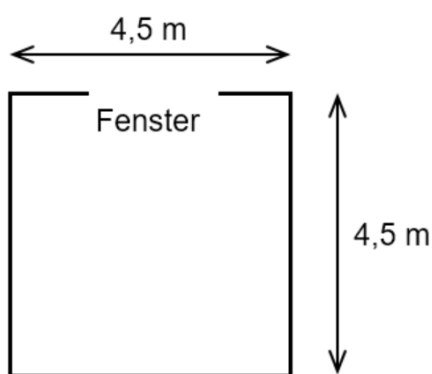
$$O = A_W \sqrt{h_W} / A_t \quad (\text{Gl. 3.1})$$

A_W die Fläche der Ventilationsöffnungen in m^2

h_W die gemittelte Höhe der Ventilationsöffnungen in m

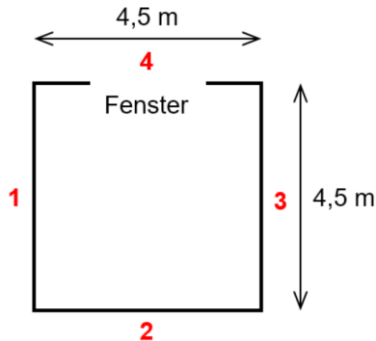
A_t die Gesamtfläche der umfassenden Bauteile mit Öffnungsflächen in m^2

Versuch	Raum Breite [m]	Raum Länge [m]	Raum Höhe [m]	Fensterbreite [m]	Fensterhöhe [m]	Öffnungsfaktor [$\text{m}^{1/2}$]
V0/V1/V2	4,5	4,5	2,4	~2,4	2,2	0,094
V3/V4	4,5	9	2,4	~4,2	2,2	0,094



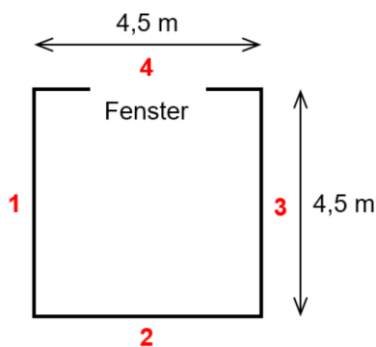
2.6 Bauteilkatalog

2.6.1 V0; BV_4.5_4.5_nb



Bauteil	Bauart	Brandschutzbekleidung
1	Brettsperrholz	2 x 25 mm GF/GKF
2	Brettsperrholz	2 x 25 mm GF/GKF
3	Brettsperrholz	2 x 25 mm GF/GKF
4	Brettsperrholz	2 x 25 mm GF/GKF
Decke	Brettschichtholz	2 x 25 mm GF/GKF

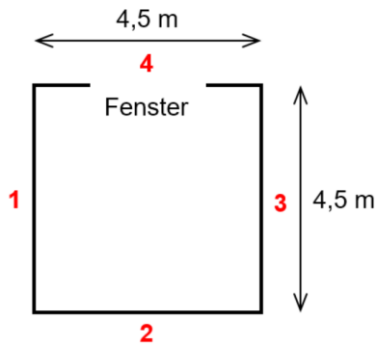
2.6.2 V1; BV_4.5_4.5_ M-HolzBauRI



Bauteil	Bauart	Brandschutzbekleidung
1	Brettsperrholz	1 x 18 mm GF
2	Brettsperrholz	1 x 18 mm GF
3	Brettsperrholz	1 x 18 mm GKF
4	Brettsperrholz	1 x 18 mm GF
Decke	Brettschichtholz	sichtbar

Sichtbare Holzoberfläche zu Brandbeginn 35% (Verhältnis von sichtbarer Holzoberfläche zu A aus Decke + Wände, ohne der Berücksichtigung von Fensterflächen)

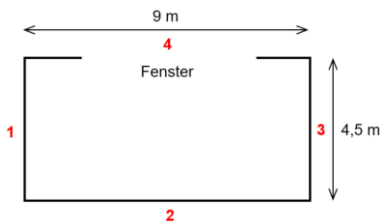
2.6.3 V2; BV_4.5_4.5_2xWand



Bauteil	Bauart	Brandschutzbekleidung
1	Brettsperrholz	sichtbar
2	Holztafelbau	2 x 18 mm GF
3	Brettsperrholz	sichtbar
4	Holztafelbau	2 x 18 mm GF
Decke	Holztafelbau	2 x 18 mm GF

Sichtbare Holzoberfläche zu Brandbeginn 37% (Verhältnis von sichtbarer Holzoberfläche zu A aus Decke + Wände, ohne der Berücksichtigung von Fensterflächen)

2.6.4 V3; BV_4.5_9_Decke

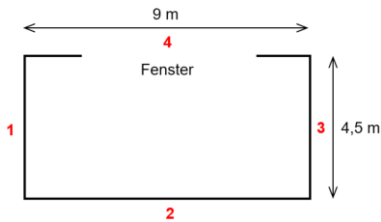


Bauteil	Bauart	Brandschutzbekleidung
1	Holztafelbau	2 x 12,5 mm GF
2	Holztafelbau	2 x 18 mm GF*
3	Holztafelbau	2 x 18 mm GKF
4	Holztafelbau	2 x 18 mm GF
Decke	Brettschichtholz	sichtbar

Sichtbare Holzoberfläche zu Brandbeginn 42% (Verhältnis von sichtbarer Holzoberfläche zu A aus Decke + Wände, ohne der Berücksichtigung von Fensterflächen)

*Bei einer Hälfte der Wandscheibe wird Dämmung direkt nach der Bekleidung angeordnet. Bei der anderen Hälfte wird eine Holzwerkstoffplatte hinter der Bekleidung angeordnet.

2.6.5 V4; BV_4.5_9_Decke&Wand



Bauteil	Bauart	Brandschutzbekleidung
1	Brettsperrholz	sichtbar
2	Holztafelbau	2 x 18 mm GF
3	Holztafelbau	2 x 18 mm GKF
4	Holztafelbau	2 x 18 mm GF
Decke	Brettschichtholz	sichtbar
Lineare Bauteile	Massivholz	sichtbar

Sichtbare Holzoberfläche zu Brandbeginn 58% (Verhältnis von sichtbarer Holzoberfläche zu A aus Decke + Wände, ohne der Berücksichtigung von Fensterflächen)

2.7 Brandlast

Für die Versuche wird eine Brandlastdichte für die Nutzung Wohnraum gewählt. Damit ergibt sich nach [1] für das 90 % - Quantil eine charakteristische Brandlastdichte von 1.085 MJ/m².

Die Brandlast soll in Form von Holzkrippen in den Versuchen ausgeführt werden. Die Grundfläche der einzelnen im Brandraum gleichmäßig verteilten Holzkrippen sollen jeweils 1.000 x 1.000 mm betragen. Sie ist aus Stäben mit den Abmessungen B x H = 40 x 40 mm auszuführen. Das Material zu Luft Verhältnis der Krippe soll 1:1 betragen.

2.8 Auswahl der Bauteile

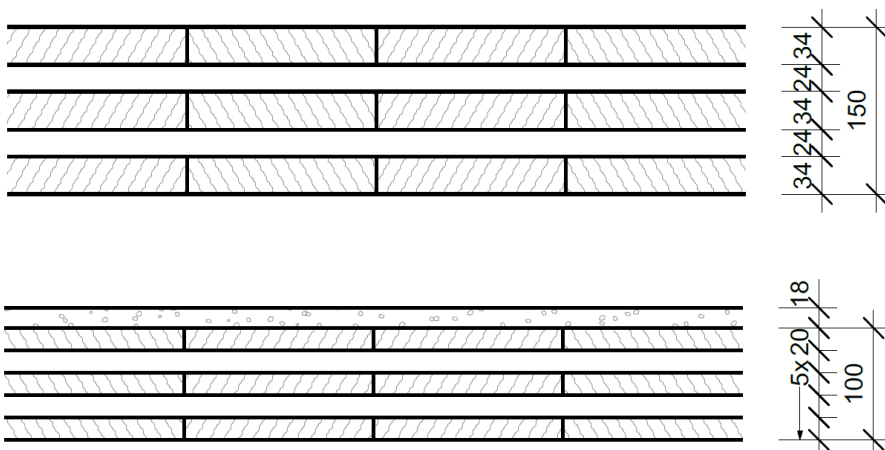
Auf Basis der Voruntersuchungen werden die Bauteile über die Anforderung REI 90 /F90 vordimensioniert. Für die Brandschutzbekleidung werden Gipsfaserplatten und Gipskartonplatten gewählt.

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Bauteil	Bauart
1	Wand_BSP	Wand	Brettsper Holz
2	Wand_HTB	Wand	Holztafelbau
3	Decke_BSH	Decke	Brettschichtholz
4	Decke_HTB	Decke	Holztafel

2.8.1 Wand_BSP

Die sichtbaren und bekleideten Brettsper Holzwände sollen gemäß ETA-06/0138 [3] der Fa. KLH als REI 90 Bauteil ausgelegt werden.

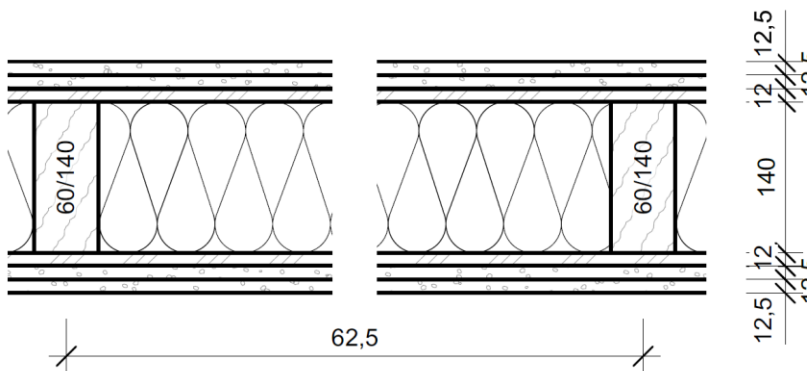
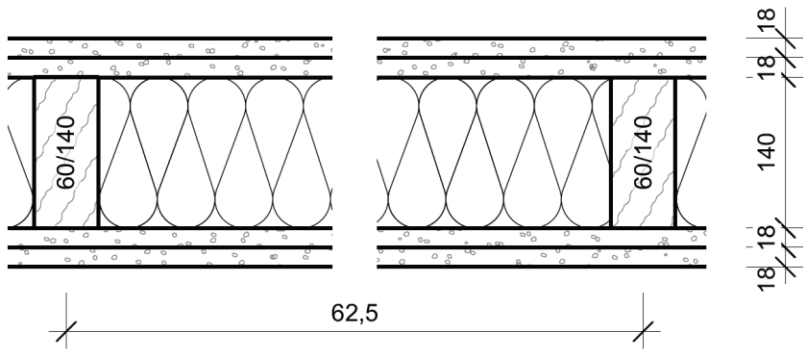
Bezeichnung	Anforderung	Bekleidung GF/GKF [mm]	Bauteildicke BSP [mm]	Verwendbarkeitsnachweis / Technische Regel
Wand_BSP_sichtbar	REI 90	keine	150 (34 24 34 24 34)	ETA-06/0138
Wand_BSP_1x18	REI 90	1 x 18	100 (20 20 20 20 20)	ETA-06/0138



2.8.2 Wand_HTB

Die Holztafelbauwände werden mit Bekleidungslagen von 2 x 18 mm nach Tabelle 10.14 E DIN 4102-4/A1:2018-11 [9], bzw. 2 x 12,5 mm + 12 mm OSB in Anlehnung an Tabelle 10.14 E DIN 4102-4/A1:2018-11 [9] bzw. Prüfbericht Nr. PB 3.2/16-001-8_ENTWURF [10] ausgeführt werden. Die Ständer müssen aus Nadel-schnittholz oder Balkenschichtholz mindestens der Festigkeitsklasse C 24, aus Laubschnittholz mindestens der Festigkeitsklasse D 30 oder aus Brettschichtholz mindestens der Festigkeitsklasse GL 24c oder Furnierschichtholz nach DIN EN 14374 mit einer charakteristischen Biegefestigkeit hochkant ≥ 24 N/mm² bestehen.

Bezeichnung	Anforderung	Bekleidung GF/GKF [mm]	Bauteildicke HT [mm]	Verwendbarkeitsnachweis / Technische Regel
Wand_HT_2x18	REI 90	2 x 18	212	Tabelle 10.14 E DIN 4102-4/A1:2018-11
Wand_HT_2x12,5	REI 90	2 x 12,5	214	in Anlehnung an Tabelle 10.14 E DIN 4102-4/A1:2018-11 und Prüfbericht Nr. PB 3.2/16-001-8_ENTWURF

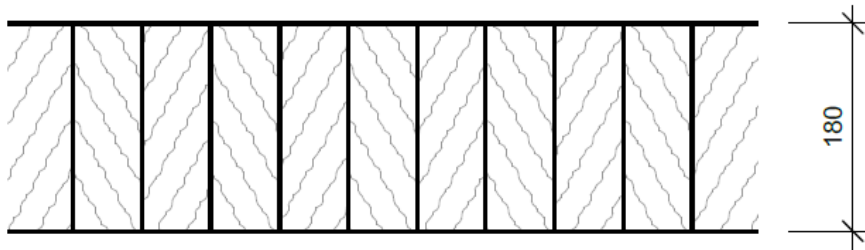


Mineralwolle Rohdichte 30 kg/m³

2.8.3 Decke_BSH

Die Brettschichtholzdecken sollen in Anlehnung an ÖNORM B 1995-1-2 [6] ausgeführt werden.

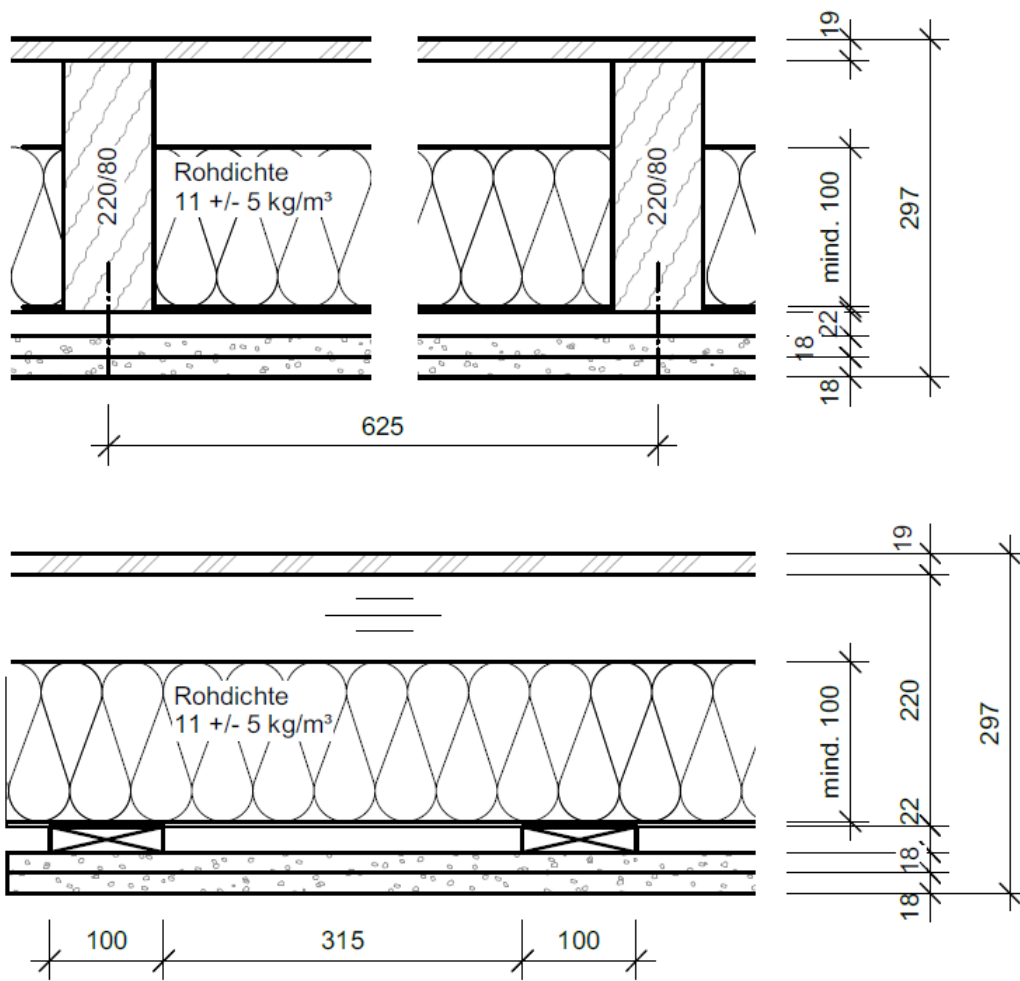
Bezeichnung	Anforderung	Bekleidung GF/GKF [mm]	Bauteildicke HT [mm]	Rechn. Restquerschnitt [mm]	Verwendbarkeitsnachweis / Technische Regel
Decke_BSH	REI 90	keine	180	121,5	in Anlehnung an ÖNORM B 1995-1-2



2.8.4 Decke_HTB

Die Holztafeldecken sollen in Anlehnung an das allgemein bauaufsichtliche Prüfzeugnis Nr. P-SAC-02 /III-725 [7] mit abweichenden Bekleidungslagen von 2 x 18 mm ausgeführt werden.

Bezeichnung	Anforderung	Bekleidung GF [mm]	Bauteildicke HT [mm]	Verwendbarkeitsnachweis / Technische Regel
Decke_HT_2x18	REI 90	2 x 18	297	AbP P-SAC02/III-725



2.9 Anschlüsse und Elementfugen

Die Bauteilanschlüsse (Wand-Decke und Wand -Wand) sowie die Elementstöße erfolgen nach baupraktischen Vorgaben nach den Erkenntnissen aus [2] basierend auf den Projekten dataholz.de; pr EN 1995-1-2; E DIN 4102-4 A1 und HolzbauRLBW. Anschlussprinzipien für Außenwand-Decke, Trennwand-Decke, Wand-Wand werden berücksichtigt.

Die Anschlüsse und Elementfugen der einzelnen Versuche sollen wie folgt ausgeführt werden.

2.9.1 Wand – Wand Anschlüsse

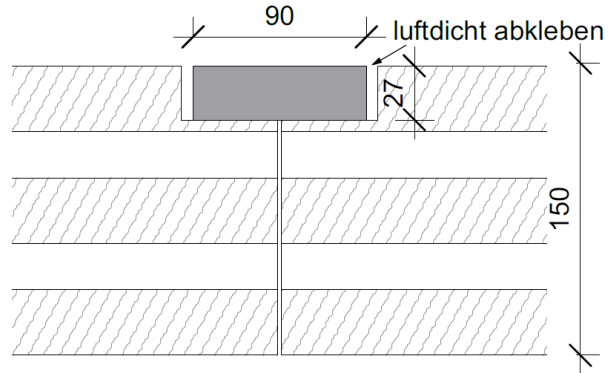
Typ	Skizze
1	<p>Wand - Stufenfalz 100 mm BSP + 18 mm GF</p> <p style="text-align: center;">BRANDRAUM</p>
2	<p>Wand - Stufenfalz 150 mm BSP</p> <p style="text-align: center;">BRANDRAUM</p>

Typ

Skizze

3

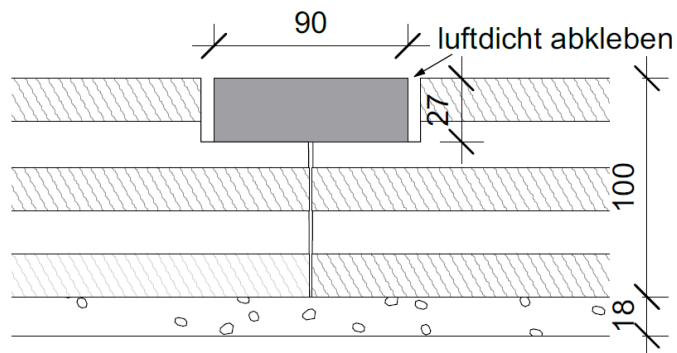
Wand - Falzdeckbrett
 150 mm BSP



BRANDRAUM

4

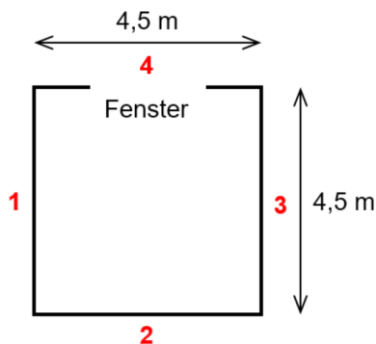
Wand - Falzdeckbrett
 100 mm BSP + 18 mm GF



BRANDRAUM

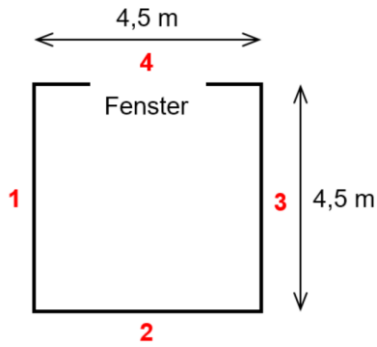
2.9.2 Wand - Decken Anschlüsse

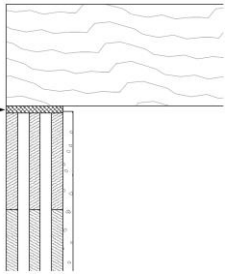
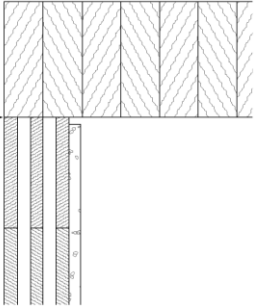
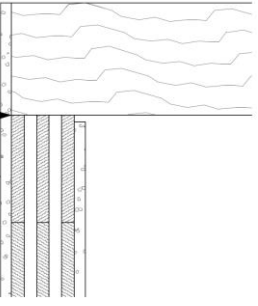
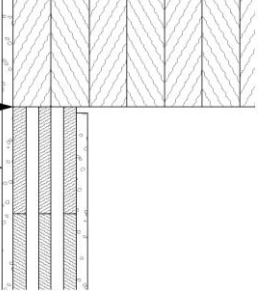
V0; BV_4.5_4.5_nb



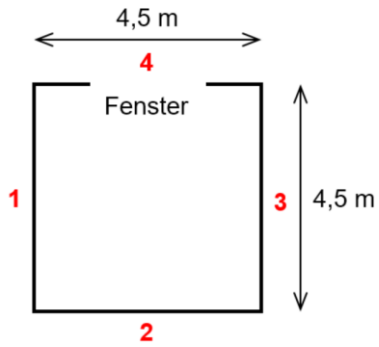
Bauteil	Anschluss	Anschluss Wand- Decke
1	Brettsper Holz	Anschlüsse wie bei V1, da gleiche Bauteile nur mit 2 x 25 mm bekleidet.
2	Brettsper Holz	
3	Brettsper Holz	
4	Brettsper Holz	
Decke	Brettschich Holz	

V1; BV_4.5_4.5_ M-HolzBauRI



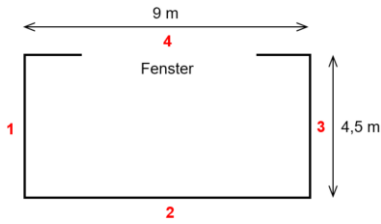
Bauteil	Anschluss	Anschluss Wand- Decke
1	Brettsperr- holzwand – Brettschicht- holzdecke	Elastomerlager 12,5mm luftdicht abkleben 
2	Brettsperr- holzwand – Brettschicht- holzdecke	Stumpf gestoßen luftdicht abkleben 
3	Brettsperr- holzwand – Brettschicht- holzdecke	Stumpf gestoßen Bekleidung außen 
4	Brettsperr- holzwand – Brettschicht- holzdecke	Stumpf gestoßen Bekleidung außen 

V2; BV_4.5_4.5_2xWand



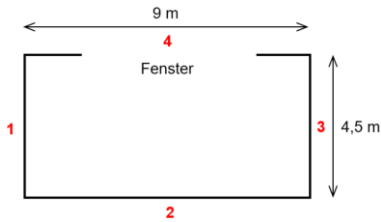
Bauteil	Anschluss	Anschluss Wand- Decke
1	Brettsperr- holz- wand - Holztafelbau- decke	
2	Holztafelbau- wand - Holztafelbau- decke	
3	Brettsperr- holz- wand - Holztafelbau- decke	
4	Holztafelbau- wand - Holztafelbau- decke	

V3; BV_4.5_9_Decke

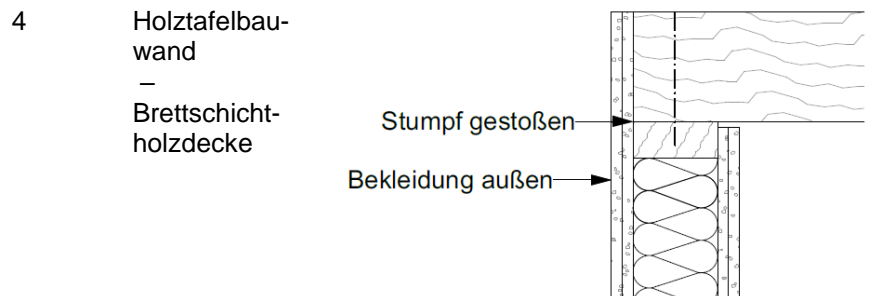
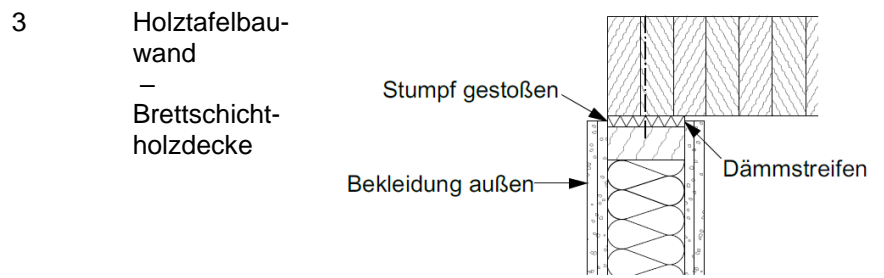
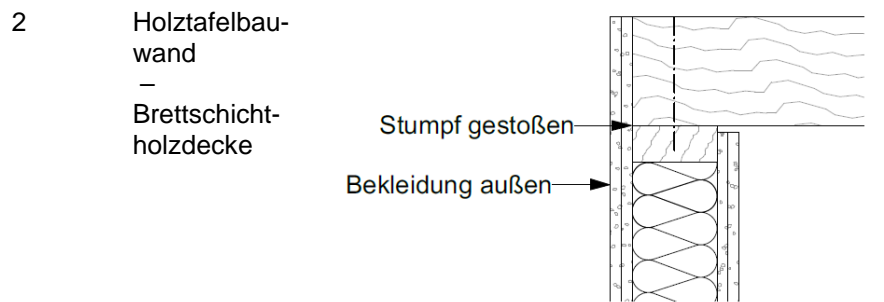
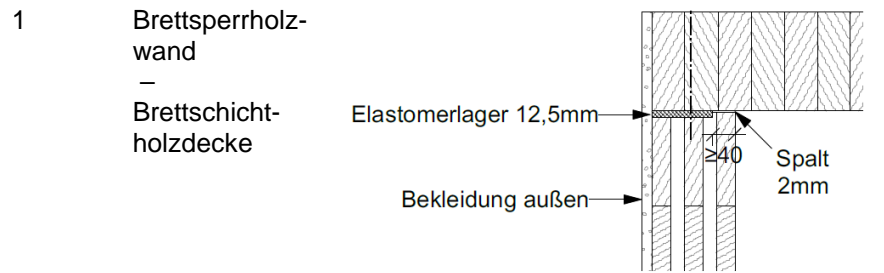


Bauteil	Bauart	Brandschutzbekleidung
1	Holztafelbauwand – Brettschicht-holzdecke	Elastomerlager 12,5mm luftdicht abkleben
2	Holztafelbauwand – Brettschicht-holzdecke	Stumpf gestoßen Luftdicht abkleben
3	Holztafelbauwand – Brettschicht-holzdecke	luftdicht abkleben Dämmstreifen Stumpf gestoßen Bekleidung außen
4	Holztafelbauwand – Brettschicht-holzdecke	Stumpf gestoßen Bekleidung außen

V4; BV_4.5_9_Decke&Wand

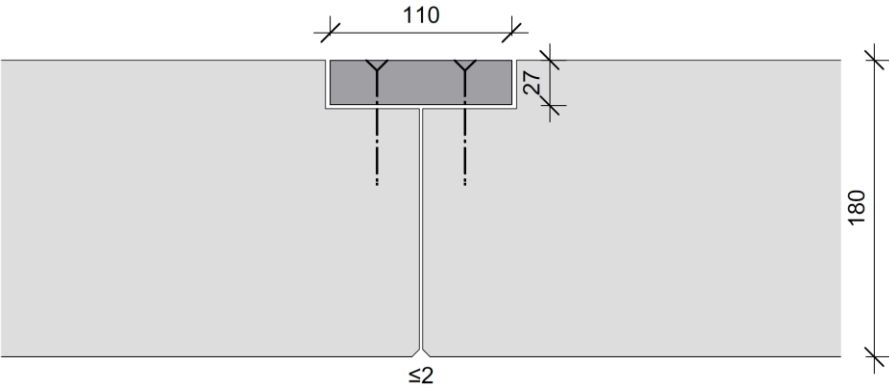
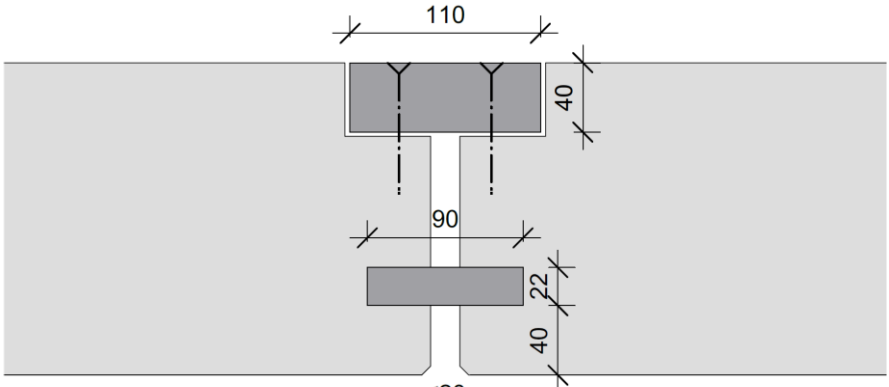
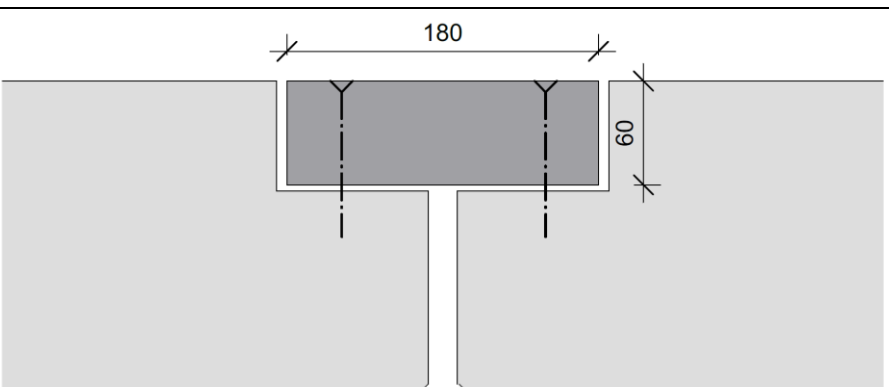


Bauteil	Bauart	Brandschutzbekleidung
---------	--------	-----------------------

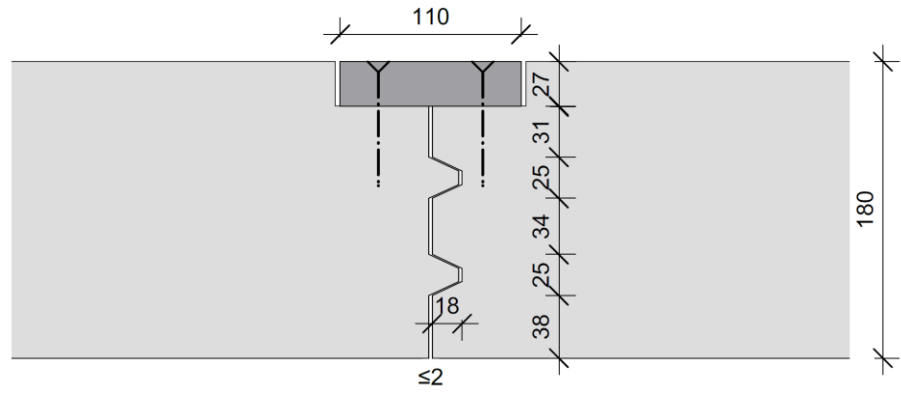


2.9.3 Elementstöße

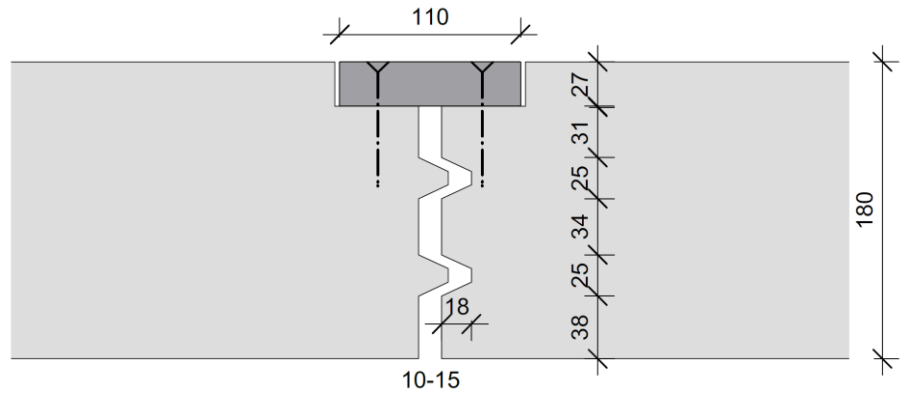
BSH-Decke

Typ	Skizze
1	
2	
3	

4



5



2.10 Befestigung der Bekleidungslagen

Die Befestigung der Bekleidung erfolgt analog zu den Vorgaben der Verwendbarkeitsnachweise und Verarbeitungsrichtlinien der Bekleidungen. Liegen entsprechende Angaben explizit nicht vor sind für die Befestigung der Brandschutzbekleidung die Verbindungsmittel und –abstände nach Tabelle 1 zu wählen. Die Befestigung der Brandschutzbekleidung hat in die Holzunterkonstruktion (Tragkonstruktion oder zusätzliche Holzunterkonstruktion) zu erfolgen. Eine Befestigung „Platte in Platte“ ist nicht zulässig. Plattenstöße sind zur Verhinderung durchgehender Fugen zu versetzen oder zu hinterlegen. Der Fugenversatz der beiden Plattenlagen zueinander ist mit ≥ 300 mm auszuführen.“

Tabelle 1: Verbindungsmittel und –abstände für die Befestigung in die Holzunterkonstruktion

Bekleidung	Abstand (a) der Befestigungsmittel untereinander auf der Trag- oder Unterkonstruktion Reihenabstände: Wand $e \leq 625$ mm, Decke $e \leq 400$ mm				Abstand zum Plattenrand bzw. zur Plattenfuge
	1. Lage (innen)		2. Lage (außen)		
	Klammern	Schnellbauschrauben	Klammern	Schnellbauschrauben	
2 x 18 mm Gipskartonplatte nach DIN 18180 in Verbindung mit EN 520	$\geq \varnothing 1,53$ mm x 40 mm x 11,25 mm a ≤ 240	$\geq \varnothing 3,5$ mm x 35 mm a ≤ 300	$\geq \varnothing 1,53$ mm x 50 mm x 11,25 mm a ≤ 80	$\geq \varnothing 3,5$ mm x 55 mm a ≤ 150 mm	≥ 15 mm
2 x 18 mm Gipsfaserplatte nach EN 15283-2	$\geq \varnothing 1,53$ mm x 40 mm x 11,25 mm a ≤ 300	$\geq \varnothing 3,5$ mm x 35 mm a ≤ 300	$\geq \varnothing 1,53$ mm x 50 mm x 11,25 mm a ≤ 150	$\geq \varnothing 3,5$ mm x 55 mm a ≤ 150 mm	≥ 15 mm

2.11 Fassade

Zur Erfassung der Flammen aus dem Fenster wird oberhalb des einstöckigen Versuchsstandes ein Fassadenschild in vertikaler Verlängerung der Wand angebracht, um die Flammenlängen messtechnisch beurteilen zu können.

Es werden zusätzlich keine brennbaren Außenwandbekleidungen im Rahmen dieser Versuche untersucht.

Die Fassade wird durch eine bekleidete Unterkonstruktion und eine flächige nicht brennbare inerte Bekleidung, wie beispielsweise die Fermacell HD-Platte, gebildet. Die Unterkonstruktion aus Holz wird zusätzlich vor einem Entzünden durch eine 15 mm Gipsplatte geschützt.

2.12 Haustechnische Installationen

Als haustechnische Installationen werden in den Versuchen nur Einbauten (Steckdosen) berücksichtigt.

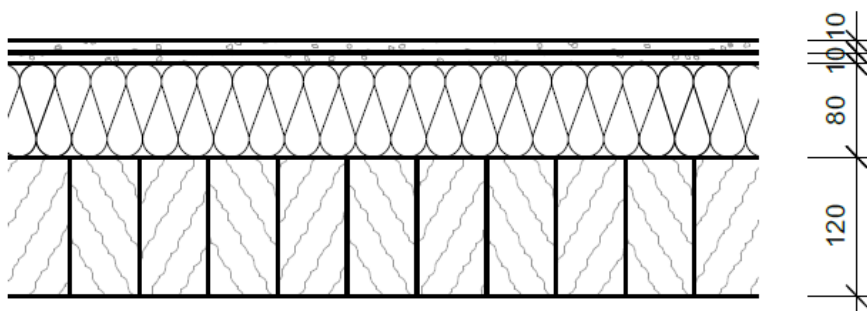
Neben den Ausführungen nach E DIN 4102-4 A1 [9] werden auch herstellerspezifische Ausführungen mit betrachtet.

2.13 Belastung

Von einer mechanischen Belastung wird in den Versuchen abgesehen, um gesichert mögliche Löschszenarien durchführen zu können. Durch Bestimmung des Abbrandes und der Temperaturverteilung innerhalb der Bauteile kann nachträglich eine Tragfähigkeitsbeurteilung erfolgen.

2.14 Fußbodenaufbau

Zum Schutz der Bodenplatte des Versuchsraums und zur messtechnischen Erfassung des Masseverlustes der Brandlast (Gewicht) wird ein Bodenaufbau aus zweimal 10 mm Gipsfaserplatten, MiWo Rohdichte 70 kg/m^3 Dicke 80 mm und BSH 120 mm geplant. Eine Folie zum Schutz des Bodenaufbaus für eventuell anfallendes Löschwasser ist vorzusehen.



3. Messtechnik

Im Rahmen der Versuche sollen folgenden Parameter messtechnisch erfasst werden:

- Brandraumtemperaturen, Wärmestrahlung, Rauchgaskonzentration
- Massenverlust der Konstruktion sowie der mobilen Brandlast
- Feuerwiderstandsverhalten der Bauteile und Anschlüsse
- Temperaturentwicklung in Bauteilen und Anschlüssen (Abbrand, Schutzzeiten Bekleidung)
- Zeitpunkt des Flashovers
- Nachbrandverhalten
- Löscharkeit
- den Zeitpunkt der Brandweiterleitung in das Geschoss über dem Brandgeschoss entlang der Fassade
- die Flammengröße aus einer Öffnung an der Außenwand

Die Darstellung der konkreten Messtechnik ist Anlage „Untersuchungsziele und Messtechnik zu entnehmen“.

Zur Erfassung der im Kapitel zuvor genannten Parameter wird folgende Messtechnik benötigt:

- Acht Kraftmessdosen und umlaufenden Trägerrost zur Erfassung des Masseverlustes der Konstruktion und Brandlast
- Mantelthermoelemente/Plate Thermoelemente für
 - Messbäume im Brandraum,
 - Erfassung der einwirkenden Oberflächentemperatur der Bauteile
 - Fassade
- Thermodraht 2x0,5 zur Erfassung der Bauteiltemperaturen
 - pro Bauteil mind. zwei Messstationen mit Thermoelementen in jeder Schicht
 - Thermoelemente in mehrseitig beanspruchten Bauteilen (Sturz, Stütze)
 - Thermoelemente in jeder Bauteilfuge
 - Thermoelemente an den Einbauten
- Gaskonzentration, Druck, Strömungssituation im Brandraum, Fenster
- Durchflussmessung (Löschwassermenge)

Videodokumentation, visuelle Beobachtungen

4. Kontakt

TIMpuls ist ein Verbund-Forschungsvorhaben der Technischen Universität München, Technischen Universität Braunschweig, Hochschule Magdeburg-Stendal und dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge.

Die abschließenden Realbrandversuche werden, unter Einbeziehung aller beteiligten Partner, zentral durch den Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München geplant.

Ansprechpartner

Thomas Engel
Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

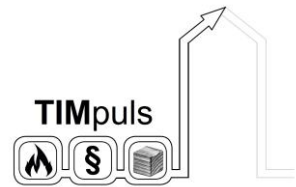
Arcisstr. 21
80333 München

Tel.: +49 (89) 289 – 28679
engel@tum.de

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09; Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke
- [2] Suttner, E.; Werther, N.; Dumler, P. (2020) Stand der Technik zur Qualität von Bauteil- und Elementfugen in Holzbaukonstruktionen im Hinblick auf den Durchtritt von Feuer und Rauch; DOI: 10.13140/RG.2.2.20566.80964
- [3] Europäisch Technische Bewertung ETA-06/0138 vom 20.02.2017; OIB
- [4] DIN 4102-4:2016-05; Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile
- [5] Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis Nr. P-SAC-02 / III-392 vom 09. Mai 2014; 1. Ausfertigung
- [6] ÖNORM B 1995-1-2; Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1995-1-2, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen; Ausgabe: 2011-09-01
- [7] Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis Nr. P-SAC02/III-725 vom 18. Dezember 2019; 1. Ausfertigung
- [8] DIN EN 1995-1-2:2010-12; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall
- [9] NA 005 DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau): NA 005-52-04 AA Arbeitsausschuss Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Klassifizierung; aktuelles Manuskript DIN 4102-4-A1 (D) 2019-12-17 ohne Aenderungskennung; Datum des Dokumentes 2019-12-19
- [10] Prüfbericht Nr. PB 3.2/16-001-8_ENTWURF: Feuerwiderstandsprüfung einer tragenden, raumabschließenden und wärmedämmenden Innenwandkonstruktion in Holzständerbauweise mit einer beidseitigen, symmetrischen Bekleidung/Beplankung und einer Gefachdämmung auf Brandverhalten nach DIN EN 1365-1:2013-08 in Verbindung mit DIN EN 1363-1:2012-10 zur Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer bei einseitiger Brandbeanspruchung. Entwurf vom 19. Januar 2017 1. Ausfertigung

4.7 Anhang: Stellungnahme zum Entwurf der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile in Holzbauweise für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 – M-HolzBauRL



Technische Universität München | Arcisstraße 21 | 80333 München
Forschungsvorhaben TIMpuls

per Mail an FK-Bauaufsicht@stmb.bayern.de

München, 18. Juli 2019

Stellungnahme zum Entwurf der Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile in Holzbauweise für Gebäude der Gebäudeklassen 4 und 5 – M-HolzBauRL

Sehr geehrter Herr Ministerialrat Kraus,
sehr geehrte Fachkommission Bauaufsicht,
sehr geehrte Damen und Herren,

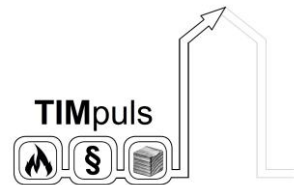
mit diesem Schreiben übersenden wir (die Technische Universität Braunschweig als Fachgebiet Brandschutz und die Technische Universität München als Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion) Ihnen, unsere seitens der Projektpartner des Forschungsvorhabens TIMpuls erstellte Stellungnahme zum Entwurf der M-HolzBauRL.

Ziel des Forschungsvorhabens TIMpuls ist die Bereitstellung eines wissenschaftlich begründeten Konzepts, um die Verwendbarkeit tragender und raumabschließender Holzbaukonstruktionen in mehrgeschossigen Gebäuden bis zur Hochhausgrenze zu ermöglichen. Dies soll durch die Schaffung von Grundlagen auf Basis experimenteller und numerischer Untersuchungen, zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Brandschutz-Regelungen im Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus, erfolgen.

Das Vorhaben wird institutsübergreifend von

- der Technischen Universität Braunschweig,
- der Technischen Universität München,
- der Hochschule Magdeburg-Stendal,
- und dem Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge

bearbeitet.



Sehr gerne stehen wir Ihnen für eine weitere Erläuterung unserer Stellungnahme bzw. für Rückfragen zur Verfügung.

In Folge der Einführung dieser Richtlinie steht auch die Notwendigkeit, alle die Richtlinie tangierenden bauordnungsrechtlichen Regelwerke entsprechend zu überarbeiten. Insbesondere sehen wir neben Öffnung bzw. Erweiterung der entscheidenden Stellen in der Musterbauordnung eine zentrale Aufgabe auch darin, die Technischen Baubestimmungen (M-VV TB) so zu überarbeiten, dass für die aus der neuen M-HolzBauRL entstehenden Bauteilanforderungen (REI 60 K₂30, REI 90 K₂60, etc.) geeignete Nachweismöglichkeiten geschaffen werden.

Nachfolgend sind die Kommentierungen zur M-HolzBauRL mit vorlaufender Nummern aufgeführt.

Kommentierung der M-HolzBauR

1.) Bzgl. Titel der Richtlinie:

Hochfeuerhemmende Wände sind auch in Gebäudeklasse 3 (§ 30 (3) 2. MBO) notwendig. Beschreibung sollte sich an Bauteilanforderungen

- hochfeuerhemmend gemäß § 26 Abs. 2 Satz 3 Nr. 2 MBO sein müssen
- und für o.g. Teile, die hochfeuerhemmend oder feuerbeständig sein müssen und abweichend nach § 26 Abs. 2 Satz 4 MBO in Holzbauweise zulässig sind

richten.

Vorschlag:

Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile in Holzbauweise die hochfeuerhemmend oder abweichend an Stelle hochfeuerhemmend bzw. feuerbeständig aus brennbaren Baustoffen ausgeführt werden – M-HolzBauRI

2.) Bzgl. 1. Anwendungsbereich:

Der Bezug auf Gebäudeklassen ist mit Ausnahme des Bereichs der Fassadenbekleidung generell als fehleranfällig zu betrachten. Einerseits besteht die Gefahr, Konstellationen der GK 4 und 5 zu übersehen, für die ggf. auch Bauteile mit Anforderung hochfeuerhemmend bzw. feuerbeständig erforderlich sind, andererseits sollten die Regelungen dieser Richtlinie auch im Zuge von allfälligen Abweichungsanträgen verwendbar sein. Der Bezug auf Gebäudeklassen schränkt die

notwendige Flexibilität enorm ein. Die Richtlinie sollte sich deshalb klar auf Bauteilanforderungen beschränken.

Zusätzlich wird aus Sicht der Kommentierenden eine Beschreibung der hinter der Richtlinie liegenden Schutzziele, wie sie auch bereits in der Richtlinie HFHHolzR unter Abschnitt 2 aufgeführt waren, für sinnvoll erachtet.

Vorschlag:

beide Absätze streichen und ersetzen durch

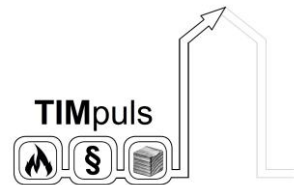
Diese Richtlinie gilt für Gebäude mit tragenden, aussteifenden bzw. raumabschließenden Bauteilen aus Holz oder Holzwerkstoffen, die nach bauaufsichtlichen Vorschriften hochfeuerhemmend gemäß § 26 Abs. 2 Satz 3 Nr. 2 MBO sein müssen und für o.g. Bauteile, die hochfeuerhemmend oder feuerbeständig sein müssen und abweichend nach § 26 Abs. 2 Satz 4 MBO in Holzbauweise zulässig sind. Die Richtlinie gilt für Bauteile in Holztafel-, Holzrahmen- Skelett- und Fachwerkbauweise sowie Massivholzbauteile.

Diese Richtlinie gilt außerdem für nicht hinterlüftete sowie vorgehängte belüftete und hinterlüftete Fassaden, welche aus Holz und Holzwerkstoffen nach § 28 (5) Satz 2 MBO aus normalentflammbaren Baustoffen zulässig sind.

Die vorliegende Richtlinie stellt brandschutztechnische Anforderungen, an

- *zu verwendende Baustoffe,*
- *die brandschutztechnische Bekleidung von Wand- und Deckenbauteilen,*
- *die konstruktive Ausbildung von Wand- und Deckenbauteilen, Stützen und Trägern einschließlich ihrer Anschlüsse sowie die konstruktive Ausbildung von Außenwandbekleidungen*
- *Öffnungen für Türen, Fenster und sonstige Einbauten und*
- *Installationsführungen.*

Durch diese auf die Verwendung brennbarer Baustoffe spezifizierten Anforderungen sollen die grundlegenden Schutzziele nach § 14 MBO erfüllt werden. Insbesondere soll



- *ein Brennen der tragenden und aussteifenden Holzkonstruktionen auf ein bauordnungsrechtlich akzeptierbares Maß begrenzt,*
- *die Einleitung von Feuer und Rauch in Wand- und Deckenbauteile über Fugen, Installationen oder Einbauten sowie eine Brandausbreitung innerhalb dieser Bauteile (verdeckte Hohlraumbrände) über ausreichenden Zeitraum verhindert und*
- *die Übertragung von Feuer und Rauch über Anschlussfugen von raumabschließenden Bauteilen in angrenzende Nutzungseinheiten, Geschosse oder Brandabschnitte während der vorgesehenen Schutzzeiten verhindert sowie*
- *im Bereich von brennbaren Außenwandbekleidungen eine über das akzeptierte Maß hinausgehende Brandausbreitung begrenzt*

werden.

Diese Richtlinie gilt nicht für Gebäude oberhalb der Hochhausgrenze (gemäß § 2 Abs. 4 Nr. 1 MBO), für Kellergeschosse (gemäß § 2 Abs. 6 MBO), sowie für unterirdische Mittel- und Großgaragen (gemäß § 1 Abs. 8 MGarVO).

Zusätzlich ist diese Richtlinie nicht anzuwenden für Gebäude, bei denen ein fehlender oder zeitlich stark verzögerter Löschangriff durch die Feuerwehr zu erwarten ist (z.B. Berghütten oder in besonderen Fällen Gebäude in abgeschiedener ländlicher Gegend).

3.) Bzgl. 2.1 Standardgebäude

Ein genereller Ausschluss von Gebäuden mit Sonderbautatbestand ist nicht zielführend. Teilweise können auch nur Gebäudeteile von einem Sonderbautatbestand betroffen sein. Sonderbauten werden allgemein durch das Vier-Augen-Prinzip durch eine Untere Baubehörde bzw. einen PrüfSV geprüft.

Beispielsweise wäre nach aktuellem Entwurf ein mehrgeschossiges Gebäude mit Kita (> 10 Kinder) im EG nicht mehr in Holzbauweise nach dieser Richtlinie möglich.

Diese Einschränkung stellt ein zu großes Hemmnis für den Holzbau dar.

Vorschlag:

Anwendungsbereich (siehe Vorschlag Kapitel 1) eindeutig formulieren und Abschnitt 2.1 sowie Begriff „Standardgebäude“ streichen.

4.) Bzgl. 2.2 Holzbauweisen

Formulierungen sollen überarbeitet werden. Holztafel- und Holzrahmenbauweise sollte als ein gemeinsamer Definitionspunkt zusammengefasst werden.

Definition Holztafelbau nach DIN EN 1995-1-1 NA:2013-08:

„Verbundkonstruktionen unter Verwendung von Rippen aus Bauschnittholz, Brettschichtholz, Balkenschichtholz, Holzwerkstoffen und mit tragenden oder aussteifenden Beplankungen aus Vollholz, Holzwerkstoffen oder Gipswerkstoffen, die ein- oder beidseitig angeordnet sein können. Rippen und Beplankung werden durch mechanische Verbindungsmittel oder Klebung miteinander verbunden.“

Skelett- und Fachwerkbauweise sollte ergänzt werden.

Im Anwendungsbereich der Richtlinie sollten Skelett- und Fachwerkbauweise aufgenommen werden, daher werden deren Definition und die Beschreibung der Anwendung notwendig.

Vorschlag:

Der Holzskelett- und Fachwerkbau ist eine stabförmige Bauweise und charakterisiert durch ein Tragskelett aus senkrechten Stützen und waagrechten Trägern sowie einem gesonderten Aussteifungssystem. Bei dieser Bauweise können sinngemäß die Regeln zur Holztafelbauweise angewendet werden.

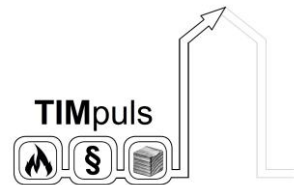
5.) Bzgl. 2.4 Außenwandbekleidung

Der Begriff „belüftet“ ist aufzunehmen und beschreibt im Gegensatz zu „hinterlüftet“ den Verschluss der Lüftungsebene im oberen Bereich.

Skizzen zu hinter-/belüftete Konstruktion sowie WDVS sind folglich erforderlich.

6.) Bzgl. 3.1 Gebäudeabschlusswände

Aneinandergereihte Gebäude aus nichtbrennbaren Baustoffen benötigen auf demselben Grundstück keine Gebäudeabschlusswände. Dies gilt sowohl für Sonderbauten, als auch für Gebäude mit großen Nutzungseinheiten. Aus unserer Sicht lässt sich dbzgl. kein erhöhtes Risiko für Gebäude aus brennbaren Baustoffen (Holz) ableiten. Trennwände bei Gebäuden aus brennbaren Baustoffen erfüllen genauso wie bei nichtbrennbaren einen identisch nachgewiesenen und in den Anforderungen gleichlautenden Feuerwiderstand in Bezug auf Raumabschluss. Das reine



Vorhandensein sichtbarer Holzoberflächen beeinflusst diese vorgenannte Wabenbildung folglich nicht. Bei ausgedehnten Gebäuden kommen indes bauordnungsrechtlich innere Brandwände in entsprechender Klassifikation zum Einsatz.

Die vorliegende Forderung stellt eine klare Benachteiligung des Baustoffes Holz dar. Sollte eine solche Maßnahme für erforderlich erachtet werden, ist diese im Zuge einer Änderung gleichlautend für alle Baustoffe und Konstruktionsarten in die Musterbauordnung aufzunehmen.

Vorschlag:

Abschnitt 3.1. streichen.

7.) Bzgl. 3.2 Dämmstoffe

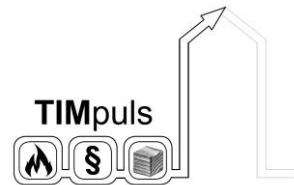
Der zweite Halbsatz kann entfallen, da grundsätzlich die Mindestanforderung zu nicht brennbaren Dämmstoffen und Schmelzpunkt $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ nicht mehr unterschritten werden darf/soll. Zudem wäre zu konkretisieren, durch welche Dokumente anderes bestimmt werden kann.

Als wesentlich für die Leistungsfähigkeit von Holzrahmen- bzw. -tafelbauteilen kann der richtige Einbau des hohlraumfüllenden Dämmstoffes angesehen werden. Eine explizite Handlungsanweisung in dieser Richtlinie für einen richtigen Einbau wird deshalb als sinnvoll erachtet und soll aus Abschnitt 4.3 allgemein übernommen werden.

Vorschlag:

Zweiten Halbsatz streichen und Ergänzung des Absatzes mit:

Einlagige Dämmschichten müssen so eingebaut werden, dass diese vollflächig, dicht gestoßen eingebaut sind. Bei zwei- bzw. mehrlagigen Dämmschichten sind die Stöße zu



versetzen. Dämmschichten sind mit einem Übermaß von mindestens 2 % in die Gefache einzubauen, sofern im Verwendbarkeitsnachweis nichts Abweichendes geregelt ist.

Die Verwendung brennbarer Dämmstoffe innerhalb von Holztafelelementen ist zulässig, sofern sichergestellt ist, dass diese sich nicht am Brand beteiligen. Dies kann durch eine K₂60-Bekleidung und eine darunterliegende Holzwerkstoffplatte sichergestellt werden.

8.) Bzgl. 3. Allgemeine Anforderungen

Analog zur bisherigen Richtlinie HFHHolzR ist nach wie vor als grundlegende Anforderung das hohlraumfreie Bauen zur Vermeidung verdeckter bzw. Hohlraumbrände als ein wesentlicher Bestandteil zur Erfüllung des Schutzzieles „wirksame Löscharbeiten müssen möglich sein“ anzusehen. Es wird deshalb ein expliziter Absatz zur Sensibilisierung als notwendig erachtet.

Vorschlag:

Abschnitt 3.4 Hohlräume einfügen.

Bauteile und Konstruktionen nach dieser Richtlinie sind, insbesondere in den Gefachen, hohlraumfrei mit Dämmstoffen nach Abschnitt 3.2 auszufüllen. Dies gilt gleichlautend auch für entstehende Bauteilzwischenräume bei mehrschaligen Konstruktionen. Ausnahmen hiervon bilden teilgedämmte hochfeuerhemmende Decken nach Abschnitt 4.4.

9.) Bzgl. 4. Anforderungen an Gebäude der Gebäudeklasse 4 mit feuerwiderstandsfähigen Bauteilen in Holzrahmen- und Holztafelbauweise

Siehe Hinweis zum Titel der Richtlinie, z.B. sind hochfeuerhemmende Wände auch in GK3 notwendig.

Vorschlag:

Anforderungen an Bauteile in Holztafel- und Holzrahmenbauweise.

10.) Bzgl. 4.1 Allgemeines

Die Nichtberücksichtigung der Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise für Bauteile anstelle feuerbeständig ist aus brandschutztechnischer Sicht nicht begründbar. Es bestehen absolut keine Bedenken, auch Bauteile inklusive deren konstruktiver Anschlüsse für einen Feuerwiderstand von 90 Minuten auszubilden, sofern die bewährten Ausführungsregeln der HFHHolzR in analoger Weise übernommen und auf diese Bauteile angewendet

werden. Am Markt existieren zahlreiche, durch allgemein bauaufsichtliche Prüfzeugnisse belegte F90-B Konstruktionen, welche die bezüglich der Gebäudeklasse 5 zu stellenden Anforderungen regelmäßig erfüllen können.

In Folge der geringeren Wärmestromdichte an klassischen Bauteilanschlüssen nach HFHHolzR sowie einer feststellbaren Überkapazität der wirksamen Schutzzeit aktuell klassifizierter K₂60-Bekleidungen weisen sämtliche Anschlüsse, welche entsprechend den festgelegten Richtdetails ausgeführt werden, zusätzliche Reserven und ausreichende Schutzfunktion für eine Erweiterung auf 90 Minutenkonstruktionen auf.

Ein Einbrand größer als der der flächigen Bauteile ist infolge der dichten Ausführung von Bauteil- und Elementfugen ausgeschlossen. Zudem kann gezeigt werden, dass sich die Anschlussystematik aus brandschutztechnischer Sicht mindestens gleichwertig zu denen der Massivholzkonstruktionen bewerten lässt und objektiv auch vergleichbar ist.

- Rauchdichtigkeit der Anschlüsse:

Aus brandschutztechnischer Sicht bestehen für die Anschlusssituation Wand an Massivdecke keine Unterschiede zwischen der Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise und der Massivholzbauweise. Beide Bauweisen schließen in Ihren Anschlussbereichen (Kontaktfläche Wand-Decke) vollflächig mit massiven Konstruktionselementen (z.B. Rähm bei Holztafelbau bzw. Brettsperrholz bei Massivholzbau) in vergleichbarer Tiefe (Kontaktfläche) ab. Für die Füge- bzw. Kontaktstellen ergeben sich dementsprechend keinerlei brandschutztechnische Unterschiede. Ebenfalls ist z.B. auch kein signifikanter Unterschied im Vergleich zu einem Anschluss mit einer bauordnungsrechtlich zulässigen Trockenbauwand in diesem Bereich zu erkennen. Im Gegenteil kann bei der Holzbauweise allgemein von einem im Brandfall deutlich formstabileren Anschluss ausgegangen werden, da die dünnen Blechprofile der Trockenbauweise unter entsprechender Temperatureinwirkung deutlich größeren Verformungen ausgesetzt sind. In Abbildung 1 ist die geschilderte Anschlusssituation (Kontaktfläche) Wand-Decke in Abhängigkeit der Bauweisen Holztafelbau, Holzmassivbau und Trockenbau skizziert.

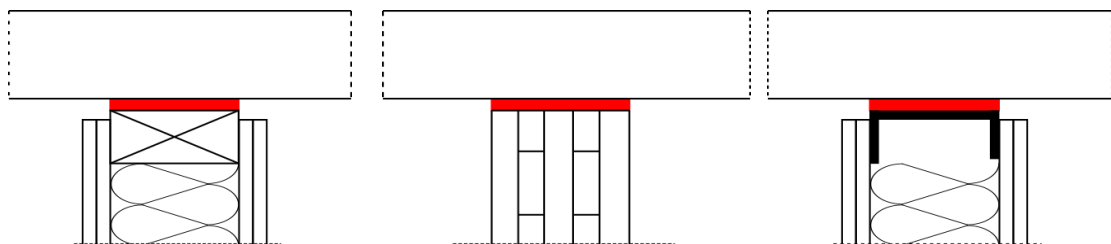


Abbildung 1: Vergleich Anschluss Wand an Decke unterschiedlicher Bauweisen (Holztafel, Massivholz, Trockenbau). Fügestelle (Kontaktfläche) als roter Balken dargestellt.

Alle bisher durchgeführten Versuche mit entsprechenden Anschlüssen haben gezeigt, dass sowohl bei der Holztafelbauweise als auch bei der Massivholzbauweise ein Einbrand in die Fügestelle (Anschluss) gleichmäßig in vorhersagbarem Ausmaß und ohne Hohl-

und Glimmbranderscheinungen stattfindet. Siehe hierzu beispielhaft das Ergebnis eines Brandversuchs eines Wand-Deckenanschlusses in Massivholzbauweise in Abbildung 2.



Abbildung 2: Brandbeanspruchte Ecke Wand-Deckenanschluss in Massivholzbauweise

Für die Bewertung von Wand-Decken Anschlusssituationen an unterseitig bekleidete Holzbalkendecken ergeben sich analoge Überlegungen. Auf Grund der unterseitig notwendigen, brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung bleibt die Füge- bzw. Kontaktstelle zunächst über den Zeitraum der Schutzzeit der Bekleidung (für K260 mindestens 60 Minuten) vom Brandgeschehen unbeansprucht. Kommt es lokal zu einem Versagen der unterseitigen Deckenbekleidung nach frühestens 60 Minuten, wird der Brandeintrag durch die in der Decke angeordnete mineralische Dämmung weiter behindert bzw. begrenzt (siehe Abbildung 3, rechts). Als zusätzliche Brand- und Rauchschutzbarriere dient die bereits in der bisherigen M-HFHolzR geforderte Verblockung zwischen den Deckenbalken oberhalb der raumabschließenden Wandbauteile. Hier besteht ein analoges System zu den im vorhergehenden Absatz beschriebenen Anschlüssen mit "monolithischen" Decken, da auch wieder vollflächig Holz auf Holz in der Fügestelle (Kontaktfläche) zusammentrifft, vgl. Abbildung 3.

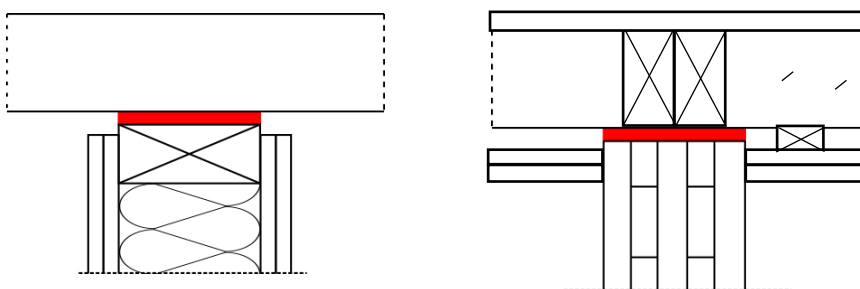


Abbildung 3: Vergleich Anschluss Wand an Holzbalkendecke unterschiedlicher Bauweisen (Holztafel, Massivholz). Fügestelle als roter Balken dargestellt.

Technisch werden die Verblockungen seitlich über Verblattungen (Nut) an die Deckenbalken angeschlossen, sodass hier ein dichter Fugenversatz entsteht. Jeweils oben und unten wird die Verblockung durch die Verschraubung (Mindestmaße und -abstände der Verbindungsmittel bereits konstruktiv in M-HFHolzR definiert) kraftschlüssig an das Wandbauteil bzw. die obere Deckenbeplankung angeschlossen.

- Gefahr von Hohlraumbränden:

Holzrahmen- bzw. Holztafelbauwände sind gemäß bisheriger M-HFHolzR bereits mit mineralischer formstabiler Dämmung (Steinwolle) mit Übermaß voll ausgedämmt herzustellen (vgl. Abbildung 4. links). Bei mehrlagigen Dämmschichten werden zusätzlich die Stöße versetzt. Die raumseitig aufgebrachte brandschutztechnisch wirksame Bekleidung mit der Klassifizierung K₂60 verhindert eine Beanspruchung der brennbaren Konstruktion von mindestens 60 Minuten.

Nach dem Versagen der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung werden die brennbaren Konstruktionsteile (Schwelle, Ständer, Rähm) durch die formstabile Steinwolldämmung geschützt, wodurch maximal nur ein eindimensionaler Abbrand raumseitig, vergleichbar mit der Massivholzbauweise, stattfinden kann. Seitliche Einbrände in die Konstruktionsteile werden durch die Dämmung verhindert (vgl. Abbildung 6, rechts).



Abbildung 4: Beispiel für mineralisch gedämmte Holztafelbauwand (Überwachungsstelle MPA BAU TU München) und Wandelement nach 60 Minuten Brandversuch mit entfernter Bekleidung.

Für Holzbalkendecken kann zunächst über die Schutzzeit der unterseitig aufgebrachten brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung (K₂60) über 60 Minuten von einem zu mineralischen Bauteilen analogen Bauteilverhalten ausgegangen werden.

Nach lokalem Versagen der Bekleidungslagen findet auf Grund der Druckverteilung im Brandraum ein Eintrag von Heißgasen in die zuvor geschlossenen Gefache statt. Mit zunehmender Größe der in den Deckengefachen zur Verfügung stehenden Hohlräumen steigt dementsprechend die Gefahr entstehender Hohlraumbrände bzw. Glimmbränderscheinungen (vgl. Abbildung 5).

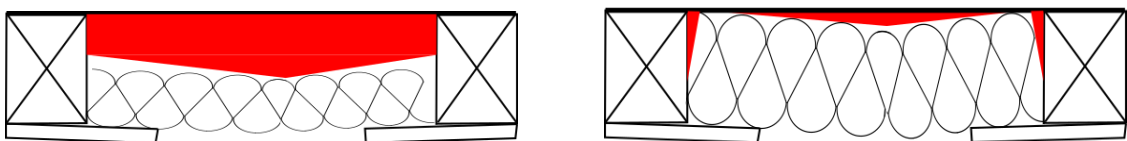


Abbildung 5: Mineralisch teilgedämmte (links) und vollgedämmte (rechts) Holzbalkendecke mit unterbrochener Brandschutzbekleidung. Rot dargestellte Bereiche stellen entstehende Hohlräume dar.

Brandversuche an Deckenbauteilen haben gezeigt, dass durch eine entsprechende Vollausedämmung der Deckenkonstruktion ein Eintrag von Heißgasen auch nach dem Versagen der Brandschutzbekleidung ausreichend behindert werden kann. Abbildung 6 zeigt ein Beispiel eines Brandversuchs mit abgefallener Brandschutzbekleidung und unbeanspruchter oberer Deckenbeplankung (rechtes Bild nach entfernter Dämmung).

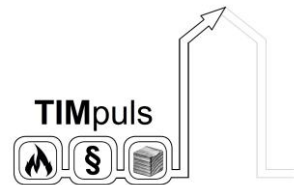


Abbildung 6: Beispiel für mineralisch gedämmte Holzbalkendecke nach Brandversuch mit abgefallener Brandschutzbekleidung (linkes Bild) und entfernter Steinwollgedämmung (rechtes Bild). Quelle: Forschungsvorhaben mehrgeschossiger Holzbau

Aus brandschutztechnischer Sicht ist deshalb für Konstruktionen, die abweichend an Stelle feuerbeständig aus brennbaren Baustoffen ausgeführt werden dürfen, über die bisherigen Vorgaben der M-HFHolzR für hochfeuerhemmende Deckenbauteile hinaus, in jedem Fall eine mit Übermaß eingebaute Vollausedämmung zu fordern.

In Fachkreisen unstrittig ist, dass nach 60 Minuten die immobile Brandlast innerhalb eines Brandraumes im Regelfall umgesetzt ist und dementsprechend keinen weiteren Beitrag mehr liefern kann. Unter Berücksichtigung dieses Gesichtspunktes kann deshalb eine brandschutz-technisch wirksame Bekleidung mit einer Schutzzeit von 60 Minuten (K_260) auch bei Gebäuden der Gebäudeklasse 5 als ausreichend zum Schutz der brennbaren Konstruktionswerkstoffe ($REI 90$) angesehen werden.

Die Notwendigkeit einer vollflächigen Öffnung von Holztafelbauwänden nach einem Brandereignis durch Kräfte der Feuerwehr lässt sich unter Berücksichtigung oben genannter Punkte nicht erkennen. Dies würde, sofern diese Notwendigkeit tatsächlich bestehen würde, ebenso für Trockenbauwände, in denen Brandlast (Elektro-, Rohrleitungs- bzw. weitere Installationen) vorhanden sein können, gleichlautend gelten und würde bereits heute regelmäßig bei Brandereignissen zu einer Erhöhung der



Einsatzzeit führen. Vergleichbar ist auch die notwendige Sichtung durch Einsatzkräfte bei Unterdecken (Abgehängte Decken) und Systemböden zu nennen.

Ein möglicher Beitrag der Tragkonstruktion zur Wärmefreisetzung nach Versagen der Brandschutzbekleidung (> 60 Minuten) ist auf Basis internationaler Untersuchungen bei der Holztafelbauweise als vernachlässigbar klein anzusehen, da in Folge der Dämmung nach Abschnitt 3.2 nur von einem Abbrand der Schmalseiten der Konstruktionshölzer auszugehen ist. Abweichend zu hochfeuerhemmenden Bauteilen in Holztafelbauweise wird für Deckenbauteile anstelle feuerbeständig eine vollständige Ausdämmung über die gesamte Gefachhöhe als erforderlich erachtet.

Die Beschreibung „allseitig“ führte in der Praxis immer wieder zu missverständlichen Interpretationen, da damit auch die Schmalseiten unterhalb der Schwelle oder oberhalb des Rähms bekleidet werden müssten. Es wird eine Formulierung vorgeschlagen, welche die Bekleidung ausschließlich der brandbeanspruchten Seiten vorsieht.

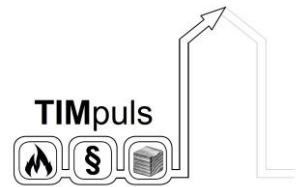
Die MBO führt für Wände anstelle von Brandwänden in Gebäudeklasse 3 ebenfalls hochfeuerhemmende Wände als Anforderung auf. Der zweite Absatz ist somit missverständlich, da eine zusätzliche mechanische Beanspruchbarkeit in diesem Fall nicht verlangt wird. Letztendlich liegt eine ausreichende abschließende Definition der Bauteilanforderung durch die Musterbauordnung (§ 30 (3) Satz 2 Nr. 1 MBO) in Verbindung mit den Technischen Baubestimmungen bereits vor und muss hier nicht erneut geregelt werden (Vermeidung doppelter und ggf. widersprüchlicher Regelungen).

Vorschlag:

1. Absatz ersetzen durch:

Hochfeuerhemmende Bauteile gemäß § 26 Abs. 2 Satz 2 Nr. 3 MBO sowie Bauteile anstelle feuerbeständig nach § 26 Abs. 2 Satz 4 MBO sind nach dieser Richtlinie aus brennbaren Baustoffen in der Holzrahmen- und Holztafelbauweise zulässig. Sie sind auf den brandbeanspruchten Seiten mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus nicht brennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung, siehe Abschnitt 4.2) zu bekleiden und mit Dämmstoffen gemäß Abschnitt 3.2 auszufüllen.

2. Absatz ersatzlos streichen.



11.) Bzgl. 4.2 Brandschutzbekleidung

Aus zahlreichen allgemein bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen bzw. aus entsprechenden K₂60 Klassifizierungsberichten kann eine allgemein gültige Ausführung für die Kapselbekleidung mit 2 x 18 mm GKF bzw. GF abgeleitet und vorgeschlagen werden. Durch Aufnahme einer entsprechenden Variante kann ein enorm vereinfachter Bemessungs- bzw. Nachweisverlauf erreicht werden.

In der Überarbeitung der Technischen Regel DIN 4102-4 / M-VVTB soll eine einfache Nachweismöglichkeit (Plattenbeschaffenheit inklusive Regelungen für die Unterkonstruktion und Verbindungsmittel) für Brandschutzbekleidungen aufgenommen. Durch Bereitstellung einer entsprechenden Übersetzungstabelle in der M-VVTB kann künftig auch ein Nachweis nach DIN EN 1995-1-2 für Brandschutzbekleidungen geführt werden. Diese Möglichkeiten sollten bereits mit in der Richtlinie berücksichtigt werden.

Vorschlag:

Sie darf ohne weiteren Nachweis durch Anordnung einer zweilagigen Bekleidung mit Gipsplattenstoffen der Dicke von 2 x 18 mm nach DIN 18180 in Verbindung mit EN 520 bzw. DIN EN 15283-2 ausgeführt werden. Für die Befestigung dieser Brandschutzbekleidung sind nachweisfrei die Verbindungsmittel und –abstände nach Tabelle 1 zu wählen.

Tabelle 1: Verbindungsmittel und –abstände für eine nachweisfreie Befestigung

Bekleidung	Abstand (a) der Befestigungsmittel untereinander auf der Trag- oder Unterkonstruktion				Abstand zum Plattenrand bzw. zur Plattenfuge
	1. Lage (innen)		2. Lage (außen)		
	Klammern	Schnellbau-schrauben	Klammern	Schnellbau-schrauben	
2 x 18 mm Gipskartonplatte nach DIN 18180 in Verbindung mit EN 520	≥ Ø 1,53 mm x 40 mm x 11,25 mm a ≥ 200	≥ Ø 3,5 mm x 35 mm a ≥ 300	≥ Ø 1,53 mm x 50 mm x 11,25 mm a ≥ 80	≥ Ø 3,5 mm x 55 mm a ≥ 150 mm	≤ 50 mm
2 x 18 mm Gipsfaserplatte nach EN 15283-2	≥ Ø 1,53 mm x 40 mm x 11,25 mm a ≥ 200	≥ Ø 3,5 mm x 35 mm a ≥ 300	≥ Ø 1,53 mm x 50 mm x 11,25 mm a ≥ 80	≥ Ø 3,5 mm x 55 mm a ≥ 150 mm	≤ 30 mm

Alternativ kann die Brandschutzbekleidung auch mit einer Schutzzeit von mindestens 60 Minuten nach anderen eingeführten Technischen Baubestimmungen nachgewiesen werden.

Die Brandschutzbekleidung muss jeweils raumseitig durchgängig aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Elementfugen sind mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindungen auszubilden, so dass keine durchgängigen Fugen entstehen.

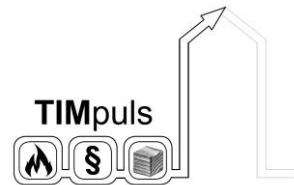
12.) Bzgl. 4.3 Wände und Wandscheiben

Für eine Ergänzung des Abschnitts 4 mit Bauteilen „anstelle feuerbeständig“ ist der erste Absatz entsprechend offen zu formulieren. Weiterführend ist die Ausführung der Gefachdämmung für alle Bauweisen allgemein in Abschnitt 3.2 geregelt.

Vorschlag:

Ergänzung erster Absatz „Wände und Wandscheiben in Holzrahmen- bzw. tafelbauweise sind mit einer Brandschutzbekleidung nach Abschnitt 4.2 herzustellen.“

Streichung der letzten beiden Sätze.



13.) Bzgl. 4.4 Decken

Erster Absatz ist durch Streichen von hochfeuerhemmend für eine Ergänzung des Abschnitts 4 mit Bauteilen „anstelle feuerbeständig“ zu öffnen.

Für Decken anstelle feuerbeständig wird aus Sicht der Kommentierenden eine Vollausdämmung über die gesamte Gefachhöhe erforderlich, um Hohlraumbrände nach Versagen der Bekleidung ausschließen zu können.

Letzter Absatz ist zu streichen, da diese Anforderungen sinnvollerweise in Abschnitt 5 bei den Massivholzbauteilen geregelt werden sollte.

Vorschlag:

Decken in Holzrahmen- oder Holztafelbauweise sind an ihrer Unterseite mit einer Brandschutzbekleidung nach Abschnitt 4.2 herzustellen. Sie sind umlaufend mit Holzprofilen (sog. Verblockung, siehe Abbildung 1) auszuführen, die zwischen die Deckenbalken oder die Rippen einzubauen sind. Zwischen den Deckenbalken oder -rippen muss ein Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 flankenformschlüssig verlegt werden. Dabei genügt für hochfeuerhemmende Decken eine Dämmung von mindestens 100 mm, für Decken anstelle feuerbeständig ist ein Vollausdämmung über die gesamte Gefachhöhe auszuführen.

14.) Bzgl. 4.5 Stützen und Träger

Erster Absatz ist durch Streichen von hochfeuerhemmend für eine Ergänzung des Abschnitts 4 mit Bauteilen „anstelle feuerbeständig“ zu öffnen.

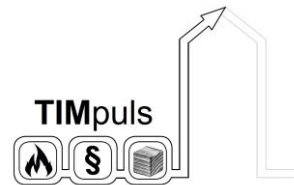
Anstatt des Wortes Massivholzbauweise sollte die notwendige Eigenschaft auf „hohlraumfrei“ geändert werden, da die Bezeichnung „Massivholzbauweise“ eine nicht eindeutige Definition in Hinblick auf das dahinter liegende Schutzziel der „Ermöglichung wirksamer Löschmaßnahmen“ bietet. Gerade im Bereich von Stützen besteht durchaus die Möglichkeit, dass bei aus mehreren Querschnitten zusammengeklebten Verbundquerschnitten im Innern ein durchgehender Hohlraum ausgebildet ist.

Der Anteil der Stützen soll infolge ihrer vernachlässigbar kleinen Fläche nicht berücksichtigt werden, da diese Fläche bereits durch die in den Wandflächen enthaltenen Fensteröffnungen (nicht brennbare Baustoffe) enthalten ist.

Vorschlag:

Stützen und Träger sind mit einer Brandschutzbekleidung nach Abschnitt 4.2 auszuführen.

Hohlraumfrei ausgeführte Stützen und Träger sind ohne Brandschutzbekleidung nach Abschnitt 4.2 zulässig, sofern die erforderliche Feuerwiderstandsfähigkeit nachgewiesen



wird und die Anforderungen gemäß Abschnitt 4.6 eingehalten werden. Hinsichtlich der Beschränkung des Anteils brennbarer Bauteiloberflächen bleibt Abschnitt 5.3 Satz 3 unberührt.

15.) 4.6.1. Allgemeines

In der Ausführung der Anschlüsse muss zwischen Maßnahmen an der Bekleidungsfuge und Maßnahmen im Stoßbereich der konstruktiven Holzbauteile unterschieden werden. Zugehörige Ergebnisse basieren auf zahlreich ausgewerteten Brandversuchen an Bauteil und Elementfugen. Entsprechende Prinzipien und Ausführungen sind auch Gegenstand der überarbeiteten Version zur E DIN 4102-4 (A1).

Die konstruktive Ausführung mit stumpfen Stoß wurde innerhalb der Versuche im nachfolgenden Forschungsvorhaben untersucht und nachgewiesen.

[Merk, Werther, Gräfe...; „Erarbeitung weiterführender Konstruktionsdetails für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise der Gebäudeklasse 4“, Abschlussbericht TU München, Band F 2923, Fraunhofer IRB Verlag]

Es wird eine Anpassung an die Ergebnisse vorgeschlagen (angepasste Zeichnungen können zur Verfügung gestellt werden)

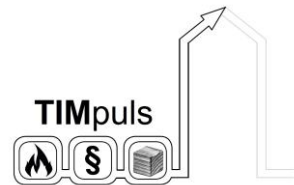
Vorschlag:

Anstelle des vorgenannten Fugenversatzes kann die Brandschutzbekleidung bei Anschlüssen von Wand- oder Deckenbauteilen auch stumpf gestoßen werden, sofern ein vollständiges Ausfüllen der Fuge mit nicht brennbaren Baustoffen, wie z.B. Verspachtelung, Einbau komprimierter Dämmstoffe nach Abschnitt 3.2 oder im Brandfall aufschäumenden Baustoffen erfolgt. Alternativ sind Deckleisten oder Hinterlegungen aus Gipsplattenstoffen ≥ 18 mm nach DIN 18180 in Verbindung mit EN 520 bzw. DIN EN 15283-2 zulässig.

Anschlüsse von Bauteil- und Elementfugen sind so auszubilden, dass die konstruktiven Holzbauteile dicht miteinander verbunden werden können.

Anstelle des stumpfen Stoßes der Holzbauteile darf eine Fuge mit einer maximalen Breite von 30 mm ausgeführt werden, wenn diese mit Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 vollflächig ausgeführt wird. Der Dämmstoff muss im nicht komprimierten Zustand eine Nennrohdichte von ≥ 20 kg/m³ aufweisen und muss im eingebauten Zustand auf mindestens die Hälfte seiner Ausgangsdicke komprimiert werden.

Weiterhin ist der Einbau von mindestens normalentflammbaren Schalldämmlagern mit einer Dicke ≤ 15 mm und einer Rohdichte von ≥ 200 kg/m³ oder im Brandfall aufschäumenden Baustoffen bzw. Brandschutzdichtmasse zulässig, sofern die Bekleidungsfuge gemäß der zuvor beschriebenen Ausführungen hergestellt wird.



16.) **Bzgl. 4.6.3. Anschlüsse von Wänden und Stützen an Decken**

Die Maßnahmen zur Ausbildung der Elementfugen sowie für deren Anschluss an Holztafelelemente sind bereits in Abschnitt 4.6.1 ausreichend erläutert. Dementsprechend genügt hier ein Verweis.

Erweiternd wird ein Textvorschlag zur Regelung der baupraktisch vorhandenen Elementfugen orthogonal zu raumabschließenden Wandbauteilen aufgenommen.

Vorschlag:

Textpassagen (2. Absatz) streichen und ergänzen

Bei Anschlüssen von Wänden an Decken in Massivholzbauweise nach Abschnitt 5.3 sind die konstruktiven Maßnahmen nach Abschnitt 4.6.1 zu beachten.

Elementfugen von Decken in Massivholzbauweise ohne Brandschutzbekleidung nach Abschnitt 5.3, die über raumabschließende Wände nach Abschnitt 4.3 hinweggeführt werden, sind so auszubilden, dass eine Übertragung von Feuer und Rauch ausreichenden lang behindert wird. Hierzu sind die Elementfugen über die gesamte Höhe im Bereich der Wand mit komprimierten Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 oder im Brandfall aufschäumenden Baustoffen auszufüllen.

Sofern die Elementfuge bzw. das Deckenbauteil oberhalb einer raumabschließenden Wand nicht durchlaufend ist, sind sinngemäß die Maßnahmen nach Abschnitt 5.4.2 anzuwenden.

17.) **Bzgl. 4.7 Öffnungen für Türen, Fenster und sonstigen Einbauten**

Die konstruktive Ausführung eines einfachen Versatzes ist ebenso möglich, dies sollte in Abbildung 7 aufgenommen werden. Der Nachweis wurde prüftechnisch erbracht (vgl. Abbildung 3-2 in [Merk, Werther, Gräfe...; „Erarbeitung weiterführender Konstruktionsdetails für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise der Gebäudeklasse 4“, Abschlussbericht TU München, Band F 2923, Fraunhofer IRB Verlag])

Vorschlag:

Streichung hochfeuerhemmend im ersten Absatz wie oben im Text.

Modifikation der Abbildung 7 um die zusätzliche Darstellung eines einfachen Stufenfalz zu zeigen. Abbildung kann von Kommentierenden bereitgestellt werden.

18.) **Bzgl. 5. Anforderungen an Standardgebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 mit feuerwiderstandsfähigen Bauteilen in Massivholzbauweise**

Siehe Hinweise zum Titel der Richtlinie, zu Abschnitt 2.1, etc.

Vorschlag:

*Änderung Kapitelüberschrift in:
Anforderungen an Bauteile in Massivholzbauweise*

19.) Bzgl. 5.1. Allgemeines

Aus Sicht der Kommentierenden sollten die weiteren Erkenntnisse des Forschungsvorhabens TIMpuls abgewartet werden, um weitere Aussagen über sinnvolle Begrenzungen von Nutzungseinheitsgrößen zu tätigen.

20.) Bzgl. 5.2 Brandwände und Treppenraumwände in Gebäudeklasse 5

Brandwände und Treppenraumwände in der Gebäudeklasse 5 sind über §30 (3) Satz 1 ausreichend geregelt. Um Missverständnissen diesbezüglich vorzubeugen, könnte in Abschnitt 1 Anwendungsbereich ein Hinweis aufgenommen werden, dass §30 (3) Satz 1 von dieser Richtlinie unberührt bleibt. Dieser Hinweis wird jedoch aus Sicht des Kommentierenden nicht für erforderlich gehalten.

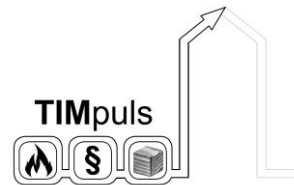
Vorschlag:

Abschnitt vollständig streichen, ggf. Ergänzung Anwendungsbereich vornehmen.

21.) Bzgl. 5.3 Oberflächen von Massivholzbauteilen

Aus Sicht der Kommentierenden erscheint die einfache Regelung über die Mindestanforderung an eine 18 mm dicke Gipsplatte nicht ausreichend, da keinerlei weitere Leistungseigenschaften an die Bekleidung näher definiert werden. Aus Kapselversuchen nach EN 14358 ist jedoch bekannt, dass eine 18 mm Gipsplatte einer Qualität von K₂30 entspricht. Mit einer entsprechenden Forderung nach einer K₂30 Kapselbekleidung werden alle notwendigen Parameter für die angedachte Schutzwirkung ausreichend definiert und die Bekleidungsart bleibt produktneutral beschrieben.

Auf Basis von [Merk 2015, Sicherheit mehrgeschossiger Holzgebäude im Brandfall – Eine Risikoanalyse unter stochastischer Abbildung realer Ereignisverläufe im Brandfall] kann eine Reduzierung der Brandschutzbekleidung auf K₂30 nur unter Annahme eines stattfindenden Löschangriffs der Feuerwehr vorgenommen werden. Für das Szenario eines fehlenden oder zeitlich stark verzögerten Löschangriffs wird eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung K₂60 im Sinne von Abschnitt 4.2 erforderlich.



Für die Bauart von Brandwänden sind brennbare Baustoffe bereits gemäß Landesbauordnung ausgeschlossen, jedoch ist für hochfeuerhemmende Bauteile und dementsprechend auch für Bauteile anstelle hochfeuerhemmend (Massivholzbauteile) die Verwendung brennbarer Konstruktionsbaustoffe zulässig. Für diese Brandwandersatzwände als brandabschnittsbildende Bauteile ist aus Sicht des Kommentierenden ebenfalls eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung analog zu den Regelungen in Abschnitt 4.2 zu fordern, um keine Absenkung des bisherigen, nach M-HFHolzR anzunehmenden Schutzniveaus zu erreichen. Der Anteil der Stützen soll infolge ihrer vernachlässigbar kleinen Fläche nicht berücksichtigt werden, da diese Fläche bereits durch die in den Wandflächen enthaltenen Fensteröffnungen (nicht brennbare Baustoffe) enthalten ist.

Vorschlag:

Titel auf Brandschutzbekleidung („Brandschutzbekleidung von Massivholzbauteilen“) ändern und weitere Leistungsanforderungen (Schraubenabstände etc.) definieren.

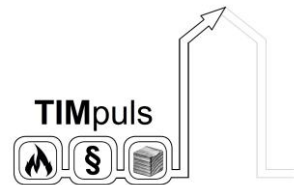
Massivholzwände, die anstelle von Brandwänden nach § 30 (3) Satz 2 Nr. 1 MBO zulässig sind, müssen an allen brandbeanspruchten Seiten eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung nach § 26 Abs. 2 Satz 2 Nr. 3 MBO haben, die eine Entzündung des Holzwerkstoffes während eines Zeitraumes von mindestens 60 Minuten verhindert und als K₂60 nach DIN EN 13501-2 klassifiziert ist. Sie darf auch als Brandschutzbekleidung mit einer Schutzzeit von mindestens 60 Minuten nach anderen eingeführten Technischen Baubestimmungen nachgewiesen werden.

Auch für allfällige Öffnungen und Durchdringungen bzw. Einbauten in Massivholzbauteilen sind entsprechende Regelungen aufnehmen. Wegen der reduzierten Bekleidungsanlagen ist hier ein eigenes Kapitel einzuführen. Für Brandwandersatzwände ist wiederum die Systematik der doppelten Leibungsbekleidung wie bei den Holzrahmenbauteilen anzuwenden.

Vorschlag:

Abschnitt zu Öffnungen in Massivholzbauteilen einfügen:

Werden in Massivholzbauteilen Öffnungen für Einbauten wie Fenster, Türen, Verteiler und Lampenkästen hergestellt, ist die Brandschutzbekleidung in den Öffnungsleibungen mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindungen auszuführen. Für Massivholzwände, die anstelle von Brandwänden zulässig, ist eine Bekleidung der Leibungen im Sinne der Vorgaben nach Abschnitt 4.7 auszuführen.



Werden an den Verschluss der Öffnungen brandschutztechnische Anforderungen gestellt wie an Feuerschutzabschlüsse, Brandschutzverglasungen, Rohr- oder Kabelabschottungen und Brandschutzklappen, muss ein entsprechender bauaufsichtlicher Verwendbarkeits- bzw. Anwendbarkeitsnachweis vorliegen, der den Einbau dieser Abschlüsse in Bauteile nach Abschnitt 5 regelt.

22.) Bzgl. 5.5. Rauchdichtigkeit bei raumabschließend feuerwiderstandsfähigen Bauteilen

Diese allgemeine Maßnahme wird für alle Bauteil- und Elementfugen notwendig, auch wenn diese aktuell in den Zeichnungen nicht überall aufgeführt sind.

Vorschlag:

5.5.1. Allgemeines

Element- und Bauteilfugen sind kraftschlüssig im Abstand von höchstens 500 mm mit Schrauben oder durch Koppelbretter zu verbinden.

23.) Bzgl. 5.4.1. Wände a) Rauchdichtigkeit von Elementfugen

Eine Bekleidung der jeweils möglichen brandbeanspruchten Seite wird notwendig, da die Beanspruchungsseite bei raumabschließenden Bauteilen nicht vorhersehbar ist. Die wesentliche Schicht um konvektive Heiß- und Rauchgasströme über die gesamte Brandbeanspruchung auszuschließen ist jedoch die Bekleidung auf der jeweils brandabgewandten Seite. Zum Ausschluss eines Konvektionsstroms bei einem ansonsten dicht gestoßenen und mechanisch verbundenen Elementanschluss reichen bereits einfache Gipsbekleidungen mit einer Dicke von 9,5 mm.

Bei Sichtholzoberflächen können konvektive Heißgasströme mit Hilfe von Luftdichtungsmaßnahmen nach DIN 4108-7 ausgeschlossen werden, sofern diese nicht thermisch beeinflusst werden. Bei einer Überdeckung von mindestens 20 mm bis zur erwarteten Abbrandgrenze kann dies als eingehalten angesehen werden. Die Fugenbreite im Stoß darf dabei einen Wert von 2 mm nicht übersteigen.

Die in Abb. 8 dargestellten Elementstöße weisen nach Forschungsergebnissen des DGfH-Forschungsvorhabens „unbekleidete flächige massive Holzbauteile“ keine ausreichende Rauchdichtigkeit auf. Vorschlag wäre eine einseitige K₂₆₀-Brandschutzbekleidung oder eine beidseitige rauchdichte Bekleidung ohne Brandschutzanforderungen.

Vorschlag:

Elementfugen von raumabschließenden Massivholzwandbauteilen sind so auszubilden, dass einer Übertragung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird. Dies gilt als erfüllt, wenn

- auf diesen Bauteilen beidseitig eine die Elementfuge überlappende Bekleidung / Beplankung oder eine bekleidete installationsfreie Vorsatzschale angeordnet wird (Abbildung 8a und 8b).

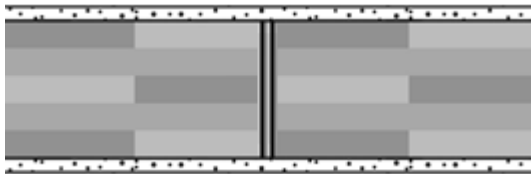


Abbildung 8a: Wand mit symmetrisch angeordneter Bekleidung aus 18 mm Gipsplatte (Horizontalschnitt)

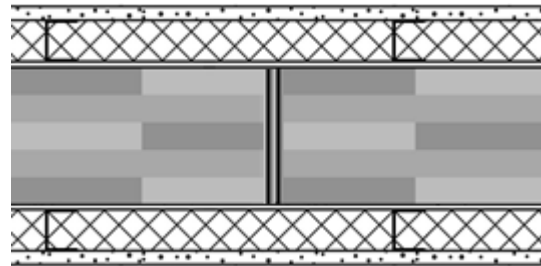


Abbildung 8b: Wand mit symmetrisch angeordneter Vorsatzschale (Horizontalschnitt)

- die Elementfuge, ausgebildet als Stufenfalzverbindung, eingelegte Feder/n oder beidseitig angeordnetes Koppelbrett, mit Maßnahmen zur Luftdichtung so ausgeführt werden, dass diese für den Zeitraum der Brandbeanspruchung wirksam bleiben. Dies gilt als erfüllt, wenn die minimalen ideellen Dicke des Restholzquerschnittes von 20 mm bis zum Stufenfalz bzw. zur Feder oder dem Koppelbrett erhalten bleibt (Abbildungen 8c bis 8e). Der Fugenspalt ist dabei jeweils auf ≤ 2 mm zu begrenzen.

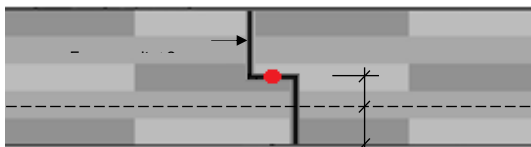


Abbildung 8c: Wand ohne Bekleidung mit Stufenfalz und mittig angeordneter Zusatzmaßnahme (Horizontalschnitt)



Abbildung 8d: Wand ohne Bekleidung mit mittig eingelegter Feder und Zusatzmaßnahme (Horizontalschnitt)

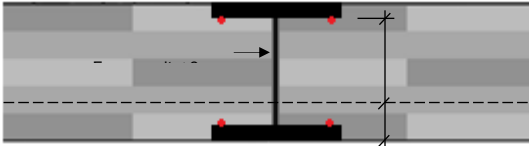


Abbildung 8e: Wand ohne Bekleidung mit beidseitig angeordnetem Koppelbrett und Zusatzmaßnahme (Horizontalschnitt)

24.) Bzgl. 5.4.1. Wände a) Rauchdichtigkeit von Bauteilfugen

Analog zu den Elementfugen muss die Übertragung des Durchtritts von Feuer und Rauch an den Bauteilfugen ebenfalls ausgeschlossen und nicht wie im Entwurf nur der Rauchdurchtritt berücksichtigt werden. Dazu werden nachfolgende Maßnahmen vorgeschlagen:

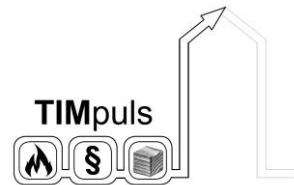
Grundsätzlich gilt, dass in allen Fällen von Fügungen oder Stößen die kraftschlüssige Verbindung der Elemente neu eingefügten Abschnittes 5.5.1 Allgemeines gegeben ist.

Die konstruktive Ausführung von Wand-Wand Bauteilanschlüssen bei Massivholzbauteilen, die eine Brand- und Rauchausbreitung verhindern, kann im Wesentlichen mit drei Grundprinzipien beschrieben werden:

- I) Anschlussfuge mit Formschluss,
- II) dicht gestoßenen Anschlussfuge mit außenseitiger Abdichtung und
- III) Anschlussfuge mit max. 30 mm Spalt, ausgefüllt mit Mineralwolle nach Abschnitt 3.2.

Über die Ausführung mit Formschluss entsteht beidseitig ein Fugenversatz analog zu den Ausführungen im Holztafelbau nach Abschnitt 4.6, durch den konvektive Strömungen auch nach einem Versagen der brandraumseitigen Bekleidung ausgeschlossen werden können. Der Anschluss bzw. die verschlossene Bekleidungsfuge bleibt auf der brandabgewandten Seite jeweils thermisch unbeanspruchert.

Erfolgt ein stumpfer Stoß ohne Fugenversatz, ist dieser ohne planmäßigen Fugenspalt (≤ 2 mm) auszuführen, um den Eintrag von Heißgasen zu begrenzen. Wesentliches Mittel um konvektive Strömungen auszuschließen und damit die Rauchdichtigkeit über die gesamte Beurteilungszeit herzustellen ist die beidseitige Anordnung von Luftdichtungsmaßnahmen oder die dauerelastische Verfügenungen im Bereich der Bekleidung bzw. in den ersten 15 mm des Elementes.



[z.B. Frangi 1999: Brandverhalten von Holzdecken aus Hohlkastenelementen; Frangi 2001 Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken; Fornather 2003 Brandverhalten von Holz unter besonderer Berücksichtigung stiftförmiger Verbindungsmittel, Herstellerspezifische Brandprüfungen]

Vorgenanntes Prinzip wurde bereits bei der Regelung des Anschlusses von flankierenden Decken an Massivbauteile (mineralisch) in dieser Richtlinie berücksichtigt.

Weist der Stoßbereich eine durchgehende Spaltbreite (Fugendicke) von bis zu 30 mm auf, sind diese mit einem Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 auszufüllen. Durch diese Maßnahme wird der Strömungswiderstand so erhöht, dass ein Einbrand und der Rauchdurchtritt ausgeschlossen wird. Abweichend zum Entwurf wird auf Basis der Erfahrungen bzw. Regelungen nach DIN 4102-4, Brandprüfungen und Forschungsberichten ein Spalt von max. 30 mm als sicher erachtet. Ergänzend dazu wurde eine Komprimierung des Dämmstoffes auf die Hälfte der Ausgangsdicke vorgeschlagen, um Toleranzen auszugleichen.

Vorschlag:

Bauteilfugen von raumabschließenden Massivholzwandbauteilen (Wand/Wand) sind so auszubilden, dass einer Übertragung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird. Dies gilt als erfüllt, wenn

- *bei bekleideten Wänden, die Bekleidung der durchlaufenden Wand unterbrochen wird und mit der Bekleidung der einbindenden Wand einen Falz ausbildet. Die Bekleidungsfuge ist dabei beidseitig mit nicht brennbaren Baustoffen, wie z.B. Verspachtelung oder im Brandfall aufschäumenden Baustoffen bzw. Brandschutzdichtmassen vollständig zu füllen (siehe Abbildung 9a).*
- *unbekleidete Wände oder bekleidete Wände dicht ohne Fugenspalt gestoßen werden und beidseitig am Anschluss durch Maßnahmen zur Luftdichtung, durch im Brandfall aufschäumenden Baustoffen oder durch Brandschutzdichtmassen abgedichtet sind. Die Dichtung hat bei bekleideten Elementen in der Tiefe der Bekleidung und bei unbekleideten Elementen mit einer Eindringtiefe von ≥ 15 mm zu erfolgen.*
- *unbekleidete Wände stumpf gestoßen werden und in die maximal 30 mm breite Stoßfuge ein Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 eingelegt wird. Der Dämmstoff muss im unkomprimierten Zustand eine Nennrohdichte von ≥ 20 kg/m³ aufweisen und im eingebauten Zustand auf mindestens die Hälfte seiner Ausgangsdicke komprimiert werden (siehe Abbildung 9b). Der Anschluss an eine Wand mit durchlaufender Bekleidung sowie der Anschluss von bekleideten Wänden, deren Bekleidung stumpf gestoßen wird, ist entsprechend auszuführen (siehe Abbildung 9b).*

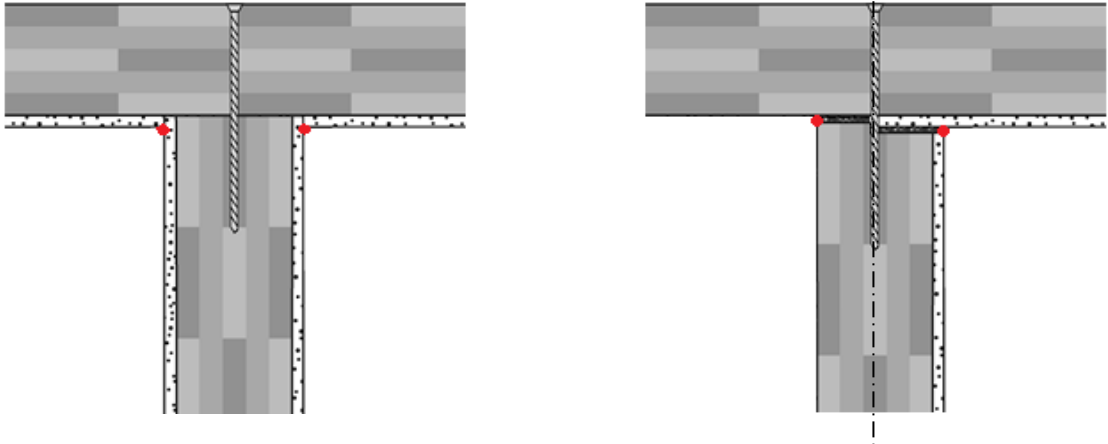
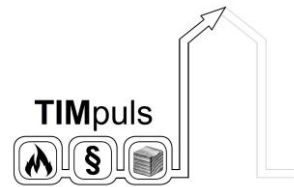


Abbildung 9a und 9b : Anschluss Wand/Wand, Falz und durchlaufende Bekleidung (Horizontalschnitt)

Bei Anschlüssen an eine massive Wand (z.B. Treppenraumwand aus Stahlbeton) ohne kraftschlüssige Verbindung ist zusätzlich beidseitig eine Brandschutzdichtmasse (Mindesteindringtiefe 25 mm) einzubringen (siehe Abbildung 9c).

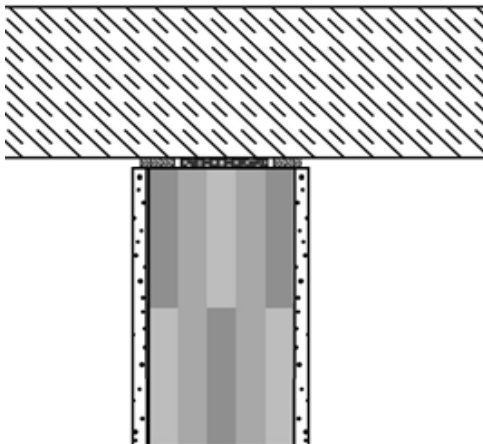
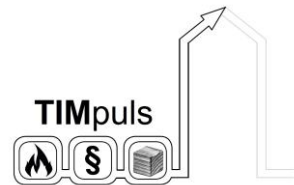


Abbildung 9c: Anschluss Wand-Treppenraumwand, mit Steinwolle ausgestopfte Stoßfuge und Brandschutzdichtmasse (Horizontalschnitt)

25.) Bzgl. 5.5.3. Decken

Analog zu den Elementfugen von Wänden soll die Übertragung des Durchtritts von Feuer und Rauch an den Fugen von Decken ausgeschlossen und nicht nur wie im Entwurf der Rauchdurchtritt berücksichtigt werden. Dazu werden nachfolgende Maßnahmen vorgeschlagen:

l) Aufbringen eines Fußbodenaufbaus, der in Abschnitt 4.3 als K260 Bekleidung definiert wird und entsprechend Entwurf zu DIN 4102-4 (A1) als F90 (I-Kriterium 140/180 K) in



Verbindung mit Rohdecke eingestuft wird. Ein Durchtritt von Feuer und Rauch wird somit bei Brandbeanspruchung von oben und unten ausgeschlossen.

II) Durch Anordnung einer der unter Abschnitt 5.5.2 a) aufgeführten konstruktiven Maßnahmen können in gleicher Weise auch für Decken die konvektive Heißgasströme mit Hilfe von entsprechenden Luftdichtungsmaßnahmen im thermisch unbeanspruchten Bereich ausgeschlossen werden. Zusätzlich ist zur Erfüllung der allgemeinen Forderung nach Bekleidung brennbarer Konstruktionsbaustoffe (Abschnitt 5.3) eine mindestens 18 mm dicke Gipsplatte (GKF / GF) aufzubringen.

Ergänzt wurde eine Maßnahme zur Regelung der baupraktisch vorhandenen Elementfugen orthogonal zu raumabschließenden Wandbauteilen bei durchgehenden Decken.

Vorschlag:

a) Elementfugen

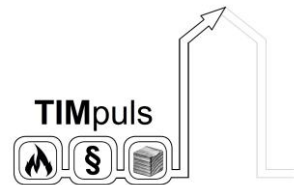
Elementfugen von raumabschließenden Massivholz-Deckenbauteilen sind so auszubilden, dass einer Übertragung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) über diese hinweg vorgebeugt wird.

Dies gilt als erfüllt, wenn bei unterseitig unbekleideten oder bekleideten Massivholzdeckenelementen oberseitig ein Fußbodenaufbau nach Abschnitt 4.3 aufgebracht wird (siehe Abbildung 10a).

Alternativ können die Maßnahmen nach Abschnitt 5.5.2 (Elementfugen bei Wänden) sinngemäß angewendet werden, wenn auf das Massivholzdeckenelement oberseitig eine durchgehende Bekleidung nach Abschnitt 5.3 aufgebracht wird.

Elementfugen von Deckenelementen in Massivholzbauweise ohne Bekleidung nach Abschnitt 5.3, die über raumabschließende Massivholzwände hinweggeführt werden, sind so auszubilden, dass eine Übertragung von Feuer und Rauch ausreichenden lang behindert wird. Hierzu sind die Elementfugen über die gesamte Höhe im Bereich der darunterliegenden Wand mit komprimierten Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 oder im Brandfall aufschäumenden Baustoffen bzw. Brandschutzdichtstoffen auszufüllen.

Sofern die Deckenelemente oberhalb der raumabschließenden Wand gestoßen sind, ist die Stoßfuge der Deckenbauteile mit einem mind. 20mm dicken Streifen aus Mineralwolle auszufüllen, der durch die kraftschlüssige Verbindung der Deckenbauteile miteinander zu komprimieren ist (siehe Abbildung 10b).



Analog zu den Elementfugen muss die Übertragung des Durchtritts von Feuer und Rauch an den Bauteilfugen ebenfalls ausgeschlossen und nicht wie im Entwurf nur der Rauchdurchtritt berücksichtigt werden. Hierzu gelten die identischen Überlegungen wie für Wand/Wand-Bauteilanschlüsse in Abschnitt 5.5.2. Erweitert wird dies um die Anordnung von Schallschuttlagern aus normal entflammbaren Baustoffen. Auf Basis von durchgeführten Brandversuchen kann auch hier gezeigt werden, dass diese in Verbindung mit den beschriebenen äußeren Abdichtungsmaßnahmen wirksam sind.

Vorschlag:

b) Bauteilfugen

Bauteilfugen von raumabschließenden Massivholzdeckenbauteilen zu Massivholzwänden (Wand/Decke) sind so auszubilden, dass einer Übertragung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird. Dies gilt als erfüllt, wenn

- die konstruktiven Wand- und Deckenbauteile dicht ohne Fugenspalt gestoßen werden und beidseitig am Anschluss durch Maßnahmen zur Luftdichtung, durch im Brandfall aufschäumende Baustoffe oder durch Brandschutzdichtmassen abgedichtet sind. Die Abdichtung hat bei bekleideten Elementen in der Tiefe der Bekleidung und bei unbekleideten Elementen mit einer Eindringtiefe von mind. 15 mm zu erfolgen (siehe Abbildung 10c).

- anstelle des stumpfen Stoßes der Holzbauteile eine maximal 30 mm breite Fuge ausgeführt wird und diese mit Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 vollflächig verschlossen ist. Der Dämmstoff muss im nicht komprimierten Zustand eine Nennrohichte von $\geq 20 \text{ kg/m}^3$ aufweisen und muss im eingebauten Zustand auf mindestens die Hälfte seiner Ausgangsdicke komprimiert werden (siehe Abbildung 10d links).

- in der Kontaktfuge zwischen den Holzbauteilen mindestens normalentflammbare Schallsdämmager mit einer Dicke $\leq 15 \text{ mm}$ und einer Rohichte von $\geq 200 \text{ kg/m}^3$ oder im Brandfall aufschäumende Baustoffen bzw. Brandschutzdichtmasse angeordnet wird. Der äußere Bereich der Fuge ist jeweils raumseitig mit der Bekleidungslage abzudecken oder in der Tiefe der Bekleidung bzw. bei unbekleideten Elementen in einer Eindringtiefe von mind. 15 mm zu verschließen. Dazu können Fugenspachtel, im Brandfall aufschäumende Baustoffe oder Brandschutzdichtmassen verwendet werden (siehe Abbildung 10d rechts).

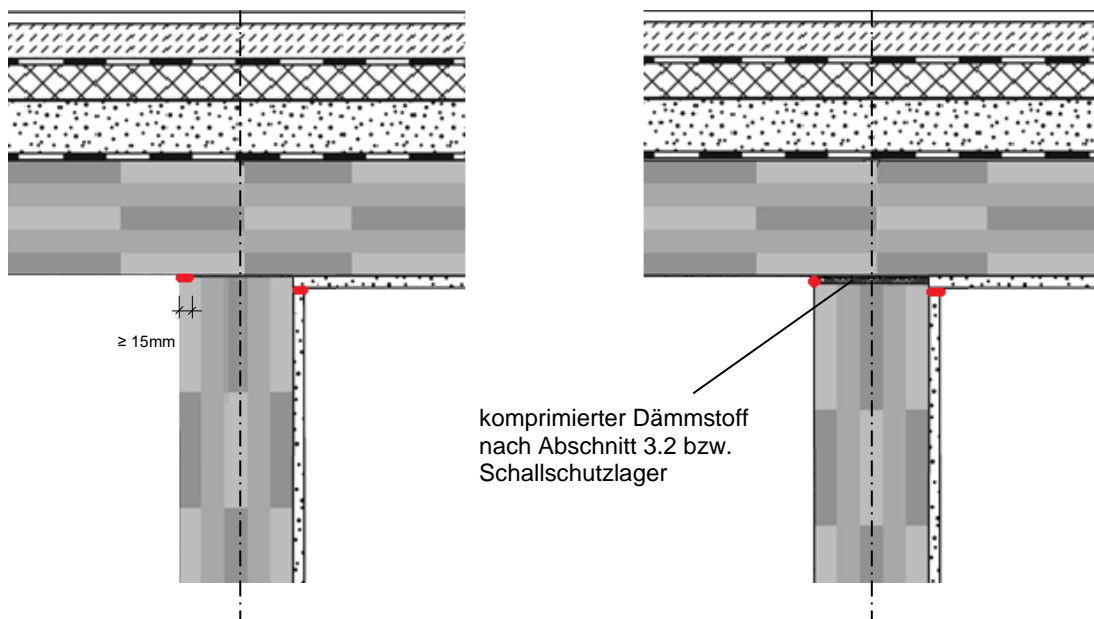


Abbildung 10c und 10d: Anschluss Wand/Decke, dichter Stoß und komprimierter Dämmstreifen / Schallschutzlager

Beim Anschluss einer unbekleideten Massivholzdecke an eine durchlaufende massive Wand (z.B. Brandwand, Treppenraumwand) ist die Bauteilfuge an der Stirnseite des Massivholzbauteils mit Dämmstoffen nach Abschnitt 3.2 auszustopfen. Es ist ein nichtbrennbarer Estrichranddämmstreifen einzubringen, dabei ist die Abdichtungsbahn des Fußbodenaufbaus luftdicht an die aufgehende massive Wand anzubringen (siehe Abbildung 10c).

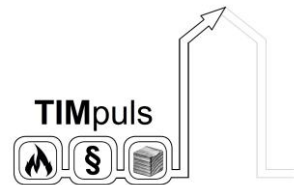
26.) Bzgl. 6. Anforderungen an Außenwandbekleidungen aus Holz und Holzwerkstoffen bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5

Holzfaserdämmstoffe als WDVS

Der Einsatz brennbarer Dämmstoffe auf Basis von nawaRo-Dämmstoffen für WDVS der GK 4 und 5 sollte ebenfalls zugelassen werden, sofern der Dämmstoff mindestens die Anforderungen der Euroklasse C erfüllt und durch das Putzsystem ein Brennen und Glimmen des Dämmstoffes verhindert wird. Der Nachweis kann in Anlehnung nach DIN 4102-20 geführt werden. Entsprechende Forschungsergebnisse der TU Braunschweig und der HS Magdeburg-Stendal liegen vor und wurden der Projektgruppe Brandschutz bereits vorgestellt.

Ein an der MfPA Leipzig durchgeführter Fassadengroßbrandversuch an einem Ausschnitt unverputzten Holzfaserdämmplatten in Anlehnung an DIN 4102-20 zeigt zudem die Robustheit des Systems.

Vorschlag:



6.1 Allgemeines

(...)

Dies gilt als erfüllt, wenn die Anforderungen nach den Abschnitten 6.2, 6.3 und 6.4 eingehalten werden.

6.3 Wärmedämmverbundsysteme auf Basis von Holzfaserdämmstoffen

Wärmedämmverbundsysteme mit Holzfaserdämmplatten mindestens der Euroklasse C dürfen in der Gebäudeklasse 4 und 5 eingesetzt werden, sofern durch das Putzsystem in Kombination mit einem Sturz- und Laibungsschutz aus nichtbrennbaren Dämmstoffen ein Glimmen des Holzfaserdämmstoffes verhindert wird. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist im Fassadengroßbrandversuch nach DIN 4102-20 nachzuweisen. Diese Vorgehensweise kann auch auf andere vergleichbare zum Glimmen neigende Dämmstoffe übertragen werden.

27.) Bzgl. 6.2.2. Horizontale Brandsperrern

Ergänzung:

Dabei ist die Verankerung bis auf eine tragende Unterkonstruktion (Rippe / Schwelle / Rähm / Massivholzplatte) zurückzuführen.

28.) Bzgl. 6.2.3. Vertikale Brandsperrern

Ergänzung:

...sondern ist mindestens in Brandwanddicke mit einem im Brandfall formstabilen Dämmstoff nach Abschnitt 3.2 und einer Nennrohdichte von $\geq 100 \text{ kg/m}^3$ auszufüllen (siehe Abbildung 12).

29.) Bzgl. 6.3. Wirksame Löscharbeiten für die Feuerwehr

Jede Gebäudeseite mit einer Außenwandbekleidung aus Holz oder Holzwerkstoffen muss für wirksame Löscharbeiten erreicht werden können.

Anpassung:

Im Einvernehmen mit der Brandschutzdienststelle sind auf dem Grundstück ggf. sind Zu- oder Durchfahrten entsprechend der TR A 2.2.1.1 der MVVTB zu schaffen.

30.) Bzgl. 7.2. Elektrische Leitungen

Ein reduzierter Abstand zu brennbaren Konstruktionsbaustoffen von 100 mm innerhalb von Holztafelbaukonstruktionen wurde innerhalb der Versuche im nachfolgenden Forschungsvorhaben untersucht und nachgewiesen.

[Gräfe, Merk, Werther, ...; „Erarbeitung weiterführender Konstruktionsdetails für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise der Gebäudeklasse 4“, Abschlussbericht TU München, Band F 2923, Fraunhofer IRB Verlag]

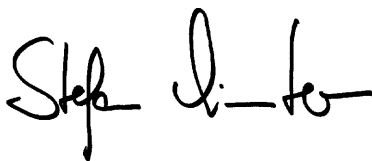
31.) Bzgl. 8.1. Bauausführung

1. Absatz: Die Qualifikation für die Eignung der bauausführenden Unternehmen sollte präzisiert werden.

3. Absatz: Wie soll die Bestätigung der Übereinstimmung der Bauausführung nach dieser Richtlinie für Bauprodukte erfolgen? Für ein Ü-Zeichen wäre eine Anpassung der M-VV TB notwendig.

Erwartungsvoll sehen wir dem Ergebnis zur Anhörung der M-HolzBauRL entgegen.

Mit freundlichen Grüßen



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Technische Universität München
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Fachgebiet Brandschutz

4.8 Anhang: Übersicht zur Parameterbewertung der FRIM-MAB-D für GK 5

Übersicht

Die Bewertung der Parameter ist in die unten stehende Tabelle einzutragen. Der maximale Wert je Parameter ist 5. Die Parameter werden anschließend mit der jeweiligen Gewichtung multipliziert. Die gewichteten Bewertungen werden anschließend addiert und führen zu einem Wert, der maximal 5 betragen kann. Der Risikoindex ist definiert als 5- Wert. Ein niedriger Risikoindex bedeutet ein geringeres Risiko und ein höheres Brandschutzniveau. Der Risikoindex erhält erst im Vergleich zu einem zweiten Wert eine Bedeutung.

Parameter		Gewichtung	Bewertung	gewichtete Bewertung
Nr.	Name			
P1	Oberflächen in Nutzungseinheiten	0,0574		
P2	Brandbekämpfungseinrichtungen	0,0675		
P3	Feuerwehr	0,0685		
P4	Größe der Nutzungseinheiten	0,0664		
P5	Trennwände	0,0675		
P6	Türen	0,0695		
P7	Fenster	0,0475		
P8	Fassade	0,0496		
P9	Dachraum	0,0522		
P10	Angrenzende Gebäude	0,0403		
P11	Entrauchung	0,0606		
P12	Branderkennung	0,0630		
P13	Brandmeldung	0,0506		
P14	Rettungswege	0,0606		
P15	Tragfähigkeit	0,0631		
P16	Wartung und Schulung	0,0601		
P17	Be- und Entlüftung	0,0556		
Summe:		1,0000		
Risikoindex = (5 - Wert (a))				

P1: Oberflächen in Nutzungseinheiten (außer Bodenbelägen)

Definition:

Möglichkeit durch die Baustoffqualität in Nutzungseinheiten die Entzündung zu verzögern und die Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu reduzieren.

Bewertung des Parameters P1:

Es werden die Baustoffklassen der Wand- und Deckenoberflächen bewertet, die in einer Nutzungseinheit vorzufinden sind. Liegen unterschiedliche Baustoffklassen vor, kann dies anteilig über den Umsetzungsgrad berücksichtigt werden. Von der Bewertung ausgenommen sind kleine Teilbereiche, die von der Bauordnung zugelassen sind.

Baustoffklasse der Oberflächen					
Typische Produkte	Euroklasse*	Baustoff- klasse	Bewertung	Umsetz- ungsgrad	Gesamtbewertung
Stein, Beton	A 1	A 1	5		
Gipskartonplatten	A 2	A 2	5		
Imprägniertes Holz	B	B 1	3		
Tapete auf	C				
Holz, d > 4 mm	D	B 2	1		
Holzfaserplatten mit	E				
verschiedene	F	B 3	0		

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

1

bis Umsetzungsgrad vollständig

* nur Hauptklassen

Resultierende Bewertung:

Bemerkungen:

Die Bewohner können die Oberflächen verändern und unterschiedliche Oberflächenqualitäten können in verschiedenen Teilen eines Gebäudes zur Anwendung kommen. Der Anwender muss daher eine ingenieurmäßige Einschätzung der angemessenen Baustoffklasse geben, um dies zu berücksichtigen. Bitten den Umsetzungsgrad als Dezimalzahl angeben.

P2: Brandbekämpfungseinrichtungen

Definition:

Systeme und Ausrüstungen zur Brandbekämpfung

P2a: Automatische Löschanlage

Art der Löschanlage

N = keine Löschanlage

R = "residential sprinkler"
nach VdS 2896

O = "ordinary sprinkler"
nach VdS CEA 4001 o. DIN EN 12845

Einbauort der Löschanlage

W = in den Nutzungseinheiten

F = in den Rettungswegen

B = Nutzungseinheiten &
Rettungswege

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen						
Art der Löschanlage	N	R	R	R	O	O	O
Einbauort	-	W	F	B	W	F	B
Bewertung P2a	K	M	G	H	M	G	H

(K = kein Einfluss, G = geringer Einfluss, M = mittlerer Einfluss, H = hoher Einfluss)

Bewertung P2a:

P2b: Mobiles Löschgerät

N	Nicht vorhanden
E	Feuerlöscher auf jeder Etage
W	Feuerlöscher in jeder Nutzungseinheit

Bewertung P2b:

Bewertung des Parameters 2:

Sub-Parameter	Entscheidungshilfen											
P2a	K	K	K	G	G	G	M	M	M	H	H	H
P2b	N	E	W	N	E	W	N	E	W	N	E	W
Bewertung	0	0	1	1	1	2	4	4	4	5	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P2:

Bemerkungen:

Der Begriff "residential sprinkler" bezieht sich auf Anlagen, die aufgrund von niedrigeren Anforderungen direkt an die Hauswasserversorgung angeschlossen werden können (siehe VdS-Richtlinie 2896). Sogenannte "ordinary sprinkler" besitzen erhöhte Anforderungen an Bevorratung und Zuverlässigkeit der Wasserversorgung. Diese sind nach VdS CEA 4001 oder DIN EN 12845 auszuführen.

P3: Feuerwehr

Definition:

Möglichkeiten der Feuerwehr zur Brandbekämpfung und Lebensrettung

P3a: Leistungsfähigkeit der zuständigen Feuerwehr

Leistungsfähigkeit der zuständigen Feuerwehr	Bewertung P3a
Kein Löschzug erreichbar	0
Branbekämpfung nur von außerhalb des Gebäudes möglich	1
Brandbekämpfung möglich, aber keine Begehung eines	2
Brandbekämpfung und Begehung eines verrauchten Gebäudes	4
Gleichzeitige Brandbekämpfung, Begehung eines verrauchten	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P3a:

P3b: Hilfsfrist

Hilfsfrist [min]	Bewertung P3b
> 20	0
15 - 20	1
10 - 15	2
5 - 10	3
0 - 5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P3b:

P3c Anleiterbarkeit (Anzahl der Fenster oder Balkone die bei einem Brand von Feuerwehrleitern erreichbar sind)

Anleiterbarkeit	Bewertung P3c
Weniger als 1 Fenster pro Nutzungseinheit ist über Feuerwehrleitern erreichbar	0
Mindestens 1 Fenster pro Nutzungseinheit ist über Feuerwehrleitern erreichbar	3
Alle Fenster sind über Feuerwehrleitern erreichbar	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P3c:

Resultierende Bewertung:

$P3 = 31 \% P3a + 47 \% P3b + 22 \% P3c$

Bemerkungen:

Wenn kein Löschzug erreichbar ist, dann wird der Parameter P3 = 0 gesetzt. Wenn ein zweiter baulicher Rettungsweg vorhanden ist, ist der Parameter P3c = 5 zu setzen.

P4: Größe der Nutzungseinheiten

Definition:

Maximale Fläche der Nutzungseinheiten in einem Gebäude

Bewertung des Parameters P4:

Maximale Fläche der Nutzungseinheiten	Bewertung
> 400 m ²	0
> 200 - 400 m ²	1
> 100 - 200 m ²	2
> 50 - 100 m ²	3
≤ 50 m ²	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P4:



Bemerkungen:

keine Bemerkungen

P5: Raumabschließende Bauteile - NEU

Definition:

Feuerwiderstand und Brandverhalten der raumabschließenden Bauteile

P5a: Raumabschluss und Wärmedämmung

Alle Anforderungen in P5a müssen auch für die Bauteilanschlüsse nachgewiesen werden.

Raumabschluss, thermische Isolierung	Bewertung
EI < EI 15	0
EI 15 ≤ EI < EI 30	1
EI 30 ≤ EI < EI 45	2
EI 45 ≤ EI < EI 60	3
EI 60 ≤ EI < EI 90	4
EI ≥ EI 90	5

Bewertung P5a:

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

P5b: Brandverhalten

Liegen unterschiedliche Bauteilaufbauten vor, kann dies anteilig über den Umsetzungsgrad berücksichtigt werden. Anforderungen der Kapselung müssen auch für Bauteilanschlüsse und Einbauten nachgewiesen werden.

Bauweise, Kapselung, Brennbarkeit	Bewertung	Umsetzungsgrad	Gesamtbewertung
nichtbrennbare Bauweise	5		
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 60	4		
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 30	3		
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K15	2		
Holzmassivbauweise; K ₂ 60	4		
Holzmassivbauweise; K ₂ 30	3		
Holzmassivbauweise; K15	2		
Holzmassivbauweise; unbekleidet	1		

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

1 bis Umsetzungsgrad vollständig

Bewertung P5b:

P5c: Installationsführungen

Ist die Bewertung des Sub-Parameters P5c "Installationsführungen" = 0, so ist auch die resultierende Bewertung des Parameters P5 = 0 zu setzen.

Installationsführungen	Bewertung P5c
Installationsführung ohne besondere Schutzmaßnahmen	0
Installationsführung entsprechend den Erleichterungen der MLAR	2
Installationsführung mit klassifizierten Abschottungen	3
Installationsschachte, die eine eigene Nutzungseinheit mit	3
Keine Installationsführungen zwischen den Nutzungseinheiten	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P5c:

Resultierende Bewertung P5:

P5 = 35% P5a + 41% P5b + 24% P5c



Bemerkungen:

keine

P5: Raumabschließende Bauteile - ALT

Definition:

Feuerwiderstand und Brandverhalten der raumabschließenden Bauteile

P5a: Raumabschluss und Wärmedämmung

Alle Anforderungen in P5a müssen auch für die Bauteilanschlüsse nachgewiesen werden.

Raumabschluss, thermische Isolierung	Bewertung
EI < EI 15	0
EI 15 ≤ EI < EI 30	1
EI 30 ≤ EI < EI 45	3
EI 45 ≤ EI < EI 60	4
EI ≥ EI 60	5

Bewertung P5a:

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

P5b: Brandverhalten

Liegen unterschiedliche Bauteilaufbauten vor, kann dies anteilig über den Umsetzungsgrad berücksichtigt werden. Anforderungen der Kapselung müssen auch für Bauteilanschlüsse und Einbauten nachgewiesen werden.

Bauweise, Kapselung, Brennbarkeit	Bewertung	Umsetzungsgrad	Gesamtbewertung
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 30	4		
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 60	5		
Holztafelbauweise; brennb. Dämm.; K ₂ 30	4		
Holztafelbauweise; brennb. Dämm.; K ₂ 60	5		
Holzmassivbauweise; unbekleidet	1		
Holzmassivbauweise; K ₂ 15	3		
Holzmassivbauweise; K ₂ 30	4		
Holzmassivbauweise; K ₂ 60	5		

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P5b:

P5c: Installationsführungen

Ist die Bewertung des Sub-Parameters P5c "Installationsführungen" = 0, so ist auch die resultierende Bewertung des Parameters P5 = 0 zu setzen.

Installationsführungen	Bewertung P5c
Installationsführung ohne besondere Schutzmaßnahmen	0
Installationsführung entsprechend den Erleichterungen der MLAR	2
Installationsführung mit klassifizierten Abschottungen	3
Installationsschachte, die eine eigene Nutzungseinheit mit	3
Keine Installationsführungen zwischen den Nutzungseinheiten	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P5c:

Resultierende Bewertung P5:

P5 = 35% P5a + 41% P5b + 24% P5c

Bemerkungen: keine Bemerkungen

P6: Türen

Definition:

Behinderung der Brand- und Rauchausbreitung durch Türen

P6a: Türen zwischen Nutzungseinheiten und Rettungsweg

Raumabschluss und therm. Isolierung = EI (A = keine Anforderung, B = dichtschießend, C = EI ≥ EI 30)

Rauchdichtigkeit: J = Ja, N = Nein

Schließmechanismus: M = manuell, S = selbstschließend

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen								
	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Raumabschluss und therm. Isolierung	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Rauchdichtigkeit	-	N	N	J	J	N	N	J	J
Schließmechanismus	-	M	S	M	S	M	S	M	S
Bewertung P6a	0	1	2	1	3	2	4	3	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P6a: _____

P6b: Türen zwischen notwendigen Fluren und Treppenraum

Raumabschluss und Wärmedämmung = EI (A = keine Anforderung, B = dichtschießend, C = EI ≥ EI 30)

Rauchdichtigkeit: J = Ja, N = Nein

Schließmechanismus: M = manuell, S = selbstschließend

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen								
	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Raumabschluss und therm. Isolierung	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Rauchdichtigkeit	-	N	N	J	J	N	N	J	J
Schließmechanismus	-	M	S	M	S	M	S	M	S
Bewertung P6b	0	1	2	1	3	2	4	3	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5);
wird der Sub-Parameter P6b = 0 gesetzt.

Bewertung P6b: _____

Bewertung des Parameters P6:

$$P6 = (0,67 \times P6a + 0,33 \times P6b)$$

Resultierende Bewertung:

Bemerkungen:

Aufzugtüren, welche als Rettungsweg genutzt werden, Behördlich anerkannt sind und mit allen erforderlichen Anforderungen ausgestattet sind, werden als "Türen in Rettungswegen" behandelt. Außenliegende oder offene Rettungswege sind ingenieurmäßig zu beurteilen.

P7: Fenster

Definition:

Maßnahmen, die einen Brandüberschlag über die Fassade durch Fenster oder andere Öffnungen in der Fassade beeinflussen.

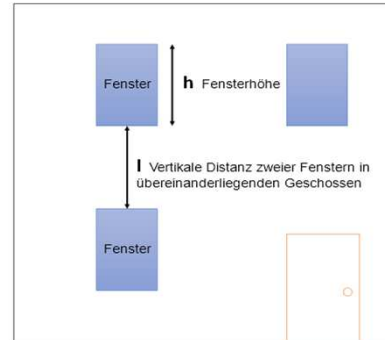
P7a: Relative vertikale Entfernung

Der Wert r ist definiert als der Quotient aus vertikaler Distanz zweier Fenster in

$r =$

relative vertikale Entfernung	Bewertung P7a
$r < 1$	A
$r \geq 1$ *	B

$r = l/h$



Bewertung P7a:

* gilt auch für eine Begrenzung der Brandausbreitung infolge Auskragungen (bspw. Balkone) oder eine rückversetzte Geschossanordnung

P7b: Brandschutzqualität der Fenster

Raumabschluss E	Bewertung P7b
ohne Anforderung	C
$E \geq E 15$	D
$E \leq E 30$	E

Bewertung P7b:

Bewertung des Parameters P7:

Sub-Parameter	Entscheidungshilfen					
P7a	A	A	A	B	B	B
P7b	C	D	E	C	D	E
Bewertung P7	0	3	5	2	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P7:

Bemerkungen:

Bei unterschiedlichen vertikalen Entfernungen zweier Fenster muss eine ingenieurmäßige Einschätzung erfolgen. Der kleinste vertikale Abstand kann sowohl als Basis und auch als Vergleichswert dienen. In den meisten Fällen wird der Einfluss sehr gering sein und das Problem unterschiedlicher vertikaler Entfernungen hat keine große Bedeutung.

P8: Fassade

Definition:

Möglichkeit durch die Baustoffqualität der Fassade die Brandausbreitung zu reduzieren.

Bewertung des Parameters P8:

Baustoffklasse der Fassadenkonstruktion		
Euroklasse*	Baustoffklasse	Bewertung
A 1	A 1	5
A 2	A 2	5
B	B 1	3
C		
D	B 2	1
E		
F	B 3	0

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5); * Nur Hauptklassen angegeben

Resultierende Bewertung:



Bemerkungen:

P9: Dachraum

Definition:

Maßnahmen zur Unterdrückung der Brandausbreitung auf den Dachraum und innerhalb

P9a: Behinderung der Brandausbreitung auf den Dachraum

Der übliche Weg der Brandausbreitung auf den Dachraum geschieht über die Traufe.

Lösung vorhanden	Bewertung P9a
Ja	J
Nein	N

Bewertung P9a:

P9b: Bauliche Unterteilung des Dachraums

Maximale Baulich nicht unterteilte Fläche im Dachraum	Bewertung P9b
kein Dachraum vorhanden	S
$A \leq 100 \text{ m}^2$	H
$100 \text{ m}^2 < A \leq 400 \text{ m}^2$	M
$400 \text{ m}^2 < A \leq 1600 \text{ m}^2$	G
$A > 1600 \text{ m}^2$	K

(S = sehr hoher Einfluss, H = hoher Einfluss, M = mittlerer Einfluss, G = geringer Einfluss, K = kein Einfluss)

Bewertung P9b:

P9c: Unterteilung des Dachraumes entsprechend der Nutzungseinheiten

Unterteilung des Dachraums	Bewertung P9c
Die Grenzen der Nutzungseinheiten sind nicht im Dachraum fortgeführt	N
Die Grenzen der Nutzungseinheiten sind im Dachraum fortgeführt	J

Bewertung P9c:

Bewertung des Parameters P9:

Sub-Parameter	Entscheidungshilfen													
	N	N	N	N	N	J	J	J	J	J				
P9a	N	N	N	N	N	J	J	J	J	J				
P9b	K	G	M	H	S	K	G	M	H	S				
P9c	N	N	N	J	N	J	-	N	N	N	J	N	J	-
Bewertung P9	0	0	1	2	2	3	5	2	2	3	4	4	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P9:

Bemerkungen:

Ist kein Dachraum vorhanden wird der Parameter P9 = 5 gesetzt.

P10: Angrenzende Gebäude

Definition:

Abstand zu angrenzenden Gebäuden

Bewertung des Parameters P10:

Wenn zwei Gebäude durch eine Brandwand getrennt sind ist dies mit einem Abstand von 8m vergleichbar.

Entfernung zu angrenzenden Gebäuden	Bewertung P10
$D < 5 \text{ m}$	0
$5 \leq D < 8 \text{ m}$	1
$8 \leq D < 12 \text{ m}$	2
$12 \leq D < 20 \text{ m}$	3
$D \geq 20 \text{ m}$	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung:

Bemerkungen:

P11: Entrauchung

Definition:

Einrichtungen zur Entrauchung der Rettungswege.

P11a: Häufigkeit der Entrauchungseinrichtungen

Häufigkeit	Bewertung P11a
Kein Entrauchungssystem vorhanden	K
Nur im obersten Geschoss	O
In jedem Geschoss	J

Bewertung P11a:

P11b: Aktivierung der Entrauchungseinrichtungen

Aktivierung	Bewertung P11b
manuell	M
automatisch	A

Bewertung P11b:

P11c: Art der Entrauchungssysteme

Art	Bewertung P11c
Natürliche Entrauchung (Fenster in Deckennähe)	N
Mechanische Entrauchung	M
Überdruck und natürliche Entrauchung	ÜN
Überdruck und mechanische Entrauchung	ÜM

Bewertung P11c:

Bewertung des Parameters P11:

Sub-Parameter	Entscheidungshilfen																
	K	O	O	O	O	O	O	O	O	J	J	J	J	J	J	J	J
P11a																	
P11b	-	M	M	M	M	A	A	A	A	M	M	M	M	A	A	A	A
P11c	-	N	M	ÜN	ÜM	N	M	ÜN	ÜM	N	M	ÜN	ÜM	N	M	ÜN	ÜM
Bewertung P11	0	1	1	2	2	3	3	4	4	2	2	3	3	4	4	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P11:

Bemerkungen:

Bei außenliegenden Rettungswegen (Außentreppe, Balkone mit Treppen) ist eine ingenieurmäßige Bewertung erforderlich. Zu beachten ist, ob sich Rauch aufgrund von baulichen Gegebenheiten auch außerhalb des Gebäudes sammeln kann.

P12: Branderkennung

Definition:

Einrichtungen, die der Erkennung eines Brandes dienen.

P12a: Häufigkeit der Branddetektoren

Branddetektoren in Wohnungen

N = kein Detektor

A = mindestens ein Detektor je Nutzungseinheit

B = mehr als ein Detektor je Nutzungseinheit

Branddetektoren in Rettungswegen

N = Nein

J = Ja

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen					
	N	N	A	B	A	B
Wohnungen	N	N	A	B	A	B
Rettungswegen	N	J	N	N	J	J
Bewertung P12a	K	G	G	M	H	H

(K = Kein Einfluss; G = geringer Einfluss, M = mittlerer Einfluss, H = hoher Einfluss)

Bewertung P12a:

P12b: Zuverlässigkeit der Branddetektoren

Wirkungsweise der Branddetektoren (W = Wärmedetektor, R = Rauchdetektor)

Energieversorgung (B = Batterie, Ö = öffentliches Stromnetz)

Einflussgröße	Entscheidungshilfen					
	W	W	W	R	R	R
Wirkungsweise	W	W	W	R	R	R
Energieversorgung	B	Ö	B + Ö	B	Ö	B + Ö
Bewertung P12b	G	M	M	M	H	H

(G = geringer Einfluss, M = mittlerer Einfluss, H = hoher Einfluss)

Bewertung P12b:

Bewertung des Parameters P12:

Sub-Parameter	Entscheidungshilfen									
	K	G	G	G	M	M	M	H	H	H
P12a	K	G	G	G	M	M	M	H	H	H
P12b	-	G	M	H	G	M	H	G	M	H
Bewertung P12	0	1	2	2	2	3	3	3	4	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P12:

Bemerkungen:

Bei der Bewertung sogenannter "Heimrauchmelder" ist eine ingenieurmäßige Einschätzung erforderlich. Es ist auf eine sinnvolle Kombination der Parameter P12 und

P13: Brandmeldung

Definition:

Einrichtungen, die im Brandfall der Alarmierung dienen.

P13a: Art des Signals

Optisches Signal (J = Ja, N = Nein), Akustisches Signal (N = Nein, T = Tonsignal, S = Sprachmitteilung)

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen					
	N	J	N	N	J	J
Optisches Signal	N	J	N	N	J	J
Akustisches Signal	N	N	T	S	T	S
Bewertung P13a	K	G	M	H	M	H

(K = Kein Einfluss; G = geringer Einfluss, M = mittlerer Einfluss, H = hoher Einfluss)

Bewertung P13a:

P13b: Reichweite der Alarmierung

Werden durch die Alarmierung nur die Nutzer der betroffenen Nutzungseinheit gewarnt oder können auch Nutzer außerhalb dieser erreicht werden?

Reichweite der Alarmierung	Bewertung P12b
Die Alarmierung erfolgt nur innerhalb der Nutzungseinheit	A
Es besteht die Möglichkeit das Signal manuell auf das Gesamtgebäude oder mindestens einen großen Teil des Gebäudes auszudehnen	B

Bewertung P13b:

Bewertung des Parameters P13:

Sub-Parameter	Entscheidungshilfen						
P13a	K	G	G	M	M	H	H
P13b	-	A	B	A	B	A	B
Bewertung P13	0	1	2	3	4	4	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P13:

Bemerkungen:

Bei der Bewertung sogenannter "Heimrauchmelder" ist eine ingenieurmäßige Einschätzung erforderlich. Es ist auf eine sinnvolle Kombination der Parameter P12 und P13 zu achten.

P14: Rettungswege - NEU

Definition:

Sicherheit von Rettungswegen.

P14a: Art der Rettungswege

Treppenträume

A = eine notwendige Treppe dient als Fluchtmöglichkeit

B = der Rettungsweg führt zu zwei unabhängigen notwendigen Treppen

C = direkte Fluchtmöglichkeit zu zwei unabhängigen notwendigen Treppen*)

Fenster/ Balkone

D = Fenster und Balkone können nicht zur Flucht genutzt werden

E = je Nutzungseinheit kann mindestens ein Fenster zur Flucht genutzt werden

F = je Nutzungseinheit können mindestens zwei Fenster zur Flucht genutzt werden

G = je Nutzungseinheit kann der Balkon zur Flucht genutzt werden

H = je Nutzungseinheit können mindestens ein Fenster und der Balkon zur Flucht genutzt werden)

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen													
	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
notwendige Treppen	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
Fenster/ Balkone	E	F	G	H	E	F	G	H	D	E	F	G	H	H
Bewertung P14a	0	1	1	3	2	3	3	4	4	5	5	5	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5);

* oder Sicherheitstreppenraum

Bewertung P14a:

P14b: Dimensionierung und Anordnung

Maximale Entfernung zu einer notwendigen Treppe (A < 15 m, B = 15-30 m, C > 30 m)

Anzahl der Stockwerke (D = 1-3, E = 4-5, X > 5)

Max. Anzahl an NE je Geschoss, die an einen Rettungsweg anschließen (F ≤ 4, G ≥ 5)

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen													
	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B	B	B
Maximale Entfernung	C	C	C	C	C	C	B	B	B	B	B	B	B	B
Anzahl der Geschosse	D	D	E	E	X	X	D	D	E	E	X	X	X	X
Anzahl der Nutzungseinheiten	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F
Bewertung P14b	2	2	0	1	0	0	4	4	3	3	2	2	2	2

Maximale Entfernung	A	A	A	A	A	A
Anzahl der Geschosse	D	D	E	E	X	X
Anzahl der Nutzungseinheiten	G	F	G	F	G	F
Bewertung P14b	5	5	4	4	3	3

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P14b:

P14c: Orientierungshilfen

Hinweisschilder (A = nicht vorhanden, B = unbeleuchtete Schilder, C = beleuchtete Schilder),

Gesamtbeleuchtung (D = manuell einzuschalten, E = dauerhaft eingeschaltet)

Notbeleuchtung (F = nicht vorhanden, G = vorhanden)

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen													
	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
Hinweisschilder	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
Gesamtbeleuchtung	D	D	E	E	D	D	E	E	D	D	E	E	E	E
Notbeleuchtung	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G
Bewertung P14c	0	3	3	4	2	4	3	4	2	4	3	5	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P14c:

P14d: Oberflächen in Rettungswegen (außer Bodenbelägen)

Es ist das im Rettungsweg vorhandene ungünstigste Produkt zu wählen. Eine anteilige Berechnung ist nicht vorgesehen.

Baustoffklasse			
Typische Produkte	Euroklasse *	Baustoffklasse	Bewertung
Stein, Beton	A 1	A 1	5
Gipskartonplatten	A 2	A 2	5
Imprägniertes Holz	B	B 1	3
Tapete auf Gipskartonplatten	C		
Holz, d > 4 mm	D	B 2	1
Holzfaserverplatten mit niedriger	E		
verschiedene Kunststoffe	F	B 3	0

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5), * nur Hauptklassen

Bewertung P14d:

Resultierende Bewertung P14:

P14 = 34% P14a + 27% P14b
 + 16% P14c + 23% P14d

Bemerkungen:

Entwurf zur Weiterentwicklung der FRIM-MAB-D.

P14: Rettungswege - ALT

Definition:

Sicherheit von Rettungswegen.

P14a: Art der Rettungswege

Treppenträume

A = eine notwendige Treppe dient als Fluchtmöglichkeit

B = der Rettungsweg führt zu zwei unabhängigen notwendigen Treppen

C = direkte Fluchtmöglichkeit zu zwei unabhängigen notwendigen Treppen*)

Fenster/ Balkone

D = Fenster und Balkone können nicht zur Flucht genutzt werden

E = je Nutzungseinheit kann mindestens ein Fenster zur Flucht genutzt werden

F = je Nutzungseinheit können mindestens zwei Fenster zur Flucht genutzt werden

G = je Nutzungseinheit kann der Balkon zur Flucht genutzt werden

H = je Nutzungseinheit können mindestens ein Fenster und der Balkon zur Flucht genutzt werden)

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen													
	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
notwendige Treppen	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
Fenster/ Balkone	E	F	G	H	E	F	G	H	D	E	F	G	H	H
Bewertung P14a	0	1	1	3	2	3	3	4	4	5	5	5	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5); * oder Sicherheitstreppe

Bewertung P14a:

P14b: Dimensionierung und Anordnung

Maximale Entfernung zu einer notwendigen Treppe (A < 15 m, B = 15-30 m, C > 30 m)

Anzahl der Stockwerke (D ≤ 4, E = 5-6),

Maximale Anzahl an Nutzungseinheiten je Geschoss, die an einen Rettungsweg anschließen (F ≤ 4, G

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen													
	C	C	C	C	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Maximale Entfernung	C	C	C	C	B	B	B	B	A	A	A	A	A	A
Anzahl der Geschosse	E	E	D	D	E	E	D	D	E	E	D	D	D	D
Anzahl der Nutzungseinheiten	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F
Bewertung P14b	0	1	2	2	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P14b:

P14c: Orientierungshilfen

Hinweisschilder (A = nicht vorhanden, B = unbeleuchtete Schilder, C = beleuchtete Schilder),

Gesamtbeleuchtung (D = manuell einzuschalten, E = dauerhaft eingeschaltet)

Notbeleuchtung (F = nicht vorhanden, G = vorhanden)

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen													
	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
Hinweisschilder	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C	C	C
Gesamtbeleuchtung	D	D	E	E	D	D	E	E	D	D	E	E	E	E
Notbeleuchtung	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G	F	G
Bewertung P14c	0	3	3	4	2	4	3	4	2	4	3	5	5	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P14c:

P14d: Oberflächen in Rettungswegen (außer Bodenbelägen)

Es ist das im Rettungsweg vorhandene ungünstigste Produkt zu wählen. Eine anteilige Berechnung ist nicht vorgesehen.

Baustoffklasse			
Typische Produkte	Euroklasse *	Baustoffklasse	Bewertung
Stein, Beton	A 1	A 1	5
Gipskartonplatten	A 2	A 2	5
Imprägniertes Holz	B	B 1	3
Tapete auf Gipskartonplatten	C		
Holz, d > 4 mm	D	B 2	1
Holzfaserplatten mit niedriger	E		
verschiedene Kunststoffe	F	B 3	0

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5), * nur Hauptklassen

Bewertung P14d:

Resultierende Bewertung P14:

$$P14 = 34\% P14a + 27\% P14b + 16\% P14c + 23\% P14d$$

Bemerkungen:

Außenliegende Rettungswege sind ingeneursmäßig zu betrachten. Als Richtwert kann der Parameter P14b bei Gebäuden ≤ 6 Geschossen mit 4 und bei Gebäuden ≥ 7 Geschossen mit 3 angenommen werden.

Licht, das durch Bewegungsmelder geschaltet ist kann als "Licht immer an" bewertet werden.

Die Baustoffklasse von Fußböden in Rettungswegen wird nicht berücksichtigt.

P15: Tragende Bauteile - NEU

Definition:

Tragfähigkeit und Brandverhalten der tragenden Bauteile.

P15a: Tragfähigkeit

Tragfähigkeit	Bewertung P15a
$R < R_{30}$	0
$R_{30} \leq R < R_{60}$	2
$R_{60} \leq R < R_{90}$	4
$R_{90} \leq R$	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P15a:

P15b: Stoßbeanspruchung

N = sind nicht auf das Kriterium der seitlichen Stoßbeanspruchung geprüft,

J = sind auf das Kriterium der seitlichen Stoßbeanspruchung geprüft

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen				
	N	J*	N	J*	J*
Gebäudeabschlusswände und	N	J*	N	J*	J*
Treppenraumwände	N	N	J	J	J
Trennwände	N	N	N	N	J
Bewertung P15b	0	2	2	4	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5), * oder wenn keine Brandwand erforderlich

Bewertung P15b:

P15c: Brandverhalten

Liegen unterschiedliche Bauteilaufbauten vor, kann dies anteilig über den Umsetzungsgrad berücksichtigt werden. Anforderungen der Kapselung müssen auch für Bauteilanschlüsse und Einbauten nachgewiesen werden.

Bauweise, Kapselung, Brennbarkeit	Be- wertung	Umsetz- ungsgrad	Gesamt-bewertung	
nichtbrennbare Bauweise	5			
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 60	4			
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 30	3			
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K15	2			
Holzmassivbauweise; K ₂ 60	4			
Holzmassivbauweise; K ₂ 30	3			
Holzmassivbauweise; K15	2			
Holzmassivbauweise; unbekleidet	1			

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

1

bis Umsetzungsgrad vollständig

Bewertung P15c:

Resultierende Bewertung P15:

P15 = 50% P15a + 24% P15b + 26% P15c

Bemerkungen:

keine

P15: Tragende Bauteile - ALT

Definition:

Tragfähigkeit und Brandverhalten der tragenden Bauteile.

P15a: Tragfähigkeit

Tragfähigkeit	Bewertung P15a
$R < R_{30}$	0
$R_{30} \leq R < R_{60}$	2
$R_{60} \leq R < R_{90}$	4
$R_{90} \leq R$	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P15a:

P15b: Stoßbeanspruchung

N = sind nicht auf das Kriterium der seitlichen Stoßbeanspruchung geprüft,

J = sind auf das Kriterium der seitlichen Stoßbeanspruchung geprüft

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen				
	N	J*	N	J*	J*
Gebäudeabschlusswände und Treppenraumwände	N	J*	N	J*	J*
Treppenraumwände	N	N	J	J	J
Trennwände	N	N	N	N	J
Bewertung P15b	0	2	2	4	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5), * oder wenn keine Brandwand erforderlich

Bewertung P15b:

P15c: Brandverhalten

Liegen unterschiedliche Bauteilaufbauten vor, kann dies anteilig über den Umsetzungsgrad berücksichtigt werden. Anforderungen der Kapselung müssen auch für Bauteilanschlüsse und Einbauten nachgewiesen werden.

Bauweise, Kapselung, Brennbarkeit	Be- wertung	Umsetz- ungsgrad	Gesamt-bewertung	
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 30	4			
Holztafelbauweise; nb Dämmung; K ₂ 60	5			
Holztafelbauweise; brenn. Dämmung; K ₂ 30	4			
Holztafelbauweise; brenn. Dämmung; K ₂ 60	5			
Holzmassivbauweise; unbekleidet	1			
Holzmassivbauweise; K ₂ 15	3			
Holzmassivbauweise; K ₂ 30	4			
Holzmassivbauweise; K ₂ 60	5			

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

1

bis Umsetzungsgrad vollständig

Bewertung P15c:

Resultierende Bewertung P15:

$P15 = 50\% P15a + 24\% P15b + 26\% P15c$

Bemerkungen: keine

P16: Wartung und Schulung

Definition:

Wartung der Anlagentechnik und Rettungswege. Schulung der Nutzer.

P16a: Wartung der Anlagentechnik

wie Brandmeldern, maschineller Entrauchung oder automatische Löschanlagen.

Wartung der Anlagentechnik	Bewertung P16a
Seltener als alle 3 Jahre	0
Mindestens einmal in drei Jahren	2
Mindestens einmal pro Jahr	4
Mindestens zweimal pro Jahr	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P16a:

P16b: Überprüfung der Rettungswege

Überprüfung der Rettungswege	Bewertung P16b
Seltener als alle 3 Jahre	0
Mindestens einmal in drei Jahren	1
Mindestens einmal pro Jahr	3
Mindestens zweimal pro Jahr	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P16b:

P16c: Schulung der Nutzer

Schriftliche Informationen

A = nicht erhältlich, **B** = schriftliche Informationen liegen an einem öffentlichen Ort aus,

C = schriftliche Informationen liegen an einem öffentlichen Ort aus und werden neuen Bwohnern ausgehändigt

Übungen **D** = es werden keine Übungen durchgeführt, **E** = Brandbekämpfungsübungen werden

regelmäßig durchgeführt, **F** = Evakuierungsübungen werden regelmäßig durchgeführt, **G** =

Brandbekämpfungs- und Evakuierungsübungen werden regelmäßig durchgeführt

Einflussgrößen	Entscheidungshilfen											
	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Schriftliche Informationen	A	A	A	A	B	B	B	B	C	C	C	C
Übungen	D	E	F	G	D	E	F	G	D	E	F	G
Bewertung P16c	0	1	1	2	1	3	3	4	2	4	4	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Bewertung P16c:

Resultierende Bewertung P16:

P16= 40% P16a + 27% P16b + 33% P16c

Bemerkungen:

Eine Wiederholungsstudie der Methode zeigte, dass verschiedene Ingenieure diesen Parameter unterschiedlich bewerteten. Ein Grund hierfür ist, dass Zeichnungen und Baubeschreibungen hierzu nur sehr wenige Informationen enthalten. Trotzdem stellt der Parameter „Wartung und Schulung“ einen sehr wichtigen Gesichtspunkt hinsichtlich der brandschutztechnischen Sicherheit eines Gebäudes dar. Es wird daher vom Anwender verlangt, Informationen aus anderen verlässliche Quellen zu besorgen. Nur so ist eine vernünftige Einschätzung dieses Parameters möglich.

P17: Be- und Entlüftung

Definition:

Maßnahmen um eine Rauchausbreitung über Be- und Entlüftungssysteme zu behindern.

Bewertung des Parameters P17:

Art der Klimatisierung	Bewertung
Keine Vorrichtung zur Behinderung der Rauchausbreitung im	0
Zentrale Belüftung, bei der über Druckunterschiede erreicht wird,	2
Belüftungssysteme, die durch Brandschutzklappen in	3
Belüftungssysteme mit einem Installationsschacht als eigenen	3
Individuelle Belüftungseinrichtung je Nutzungseinheit	5

(schlechteste Bewertung = 0; beste Bewertung = 5)

Resultierende Bewertung P17:



Bemerkungen:

Wenn kein System nötig: P17 = 5.