

Forschungsbericht

vom 23.12.2021

Betreff: Sicherheitsniveau der deutschen
Fassadenbrandprüfverfahren

Auftraggeber: Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)
Kolonnenstraße 30 B,
10829 Berlin

Forschende: Leibniz Universität Hannover
Institut für Bauphysik
Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad
Dr.-Ing. Thomas Merkewitsch
Appelstraße 9a
30167 Hannover
Geschäftszeichen: P 2-5-4.210-2070.21

und

Ingenieurgesellschaft für das
Brandverhalten von Bauarten Hauswaldt mbH
Dr.-Ing. Sebastian Hauswaldt
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Sabine Kramer
Braustraße 24
04107 Leipzig
Geschäftszeichen: P 52-5-4.215-2088/22

Dienstgebäude
Appelstraße 9A
30167 Hannover
Stadtbahnlinie 4 und 5
Haltestelle Schneiderberg /
Wilhelm-Busch-Museum

Der Forschungsbericht umfasst 73 Textseiten, das
Literaturverzeichnis sowie die Anlage 7

Die Veröffentlichung des vorliegenden Forschungsberichtes, auch auszugsweise,
sowie die Verwendung zu Werbezwecken bedarf der Genehmigung des Institutes

www.ifbp.uni-hannover.de

Kurzfassung

Das Forschungsvorhaben „Zum Sicherheitsniveau der deutschen Fassadenbrandprüfverfahren“ beinhaltet die wesentlichen Themenabschnitte „schwerentflammbare Außenwandbekleidungen“ und nationale Fassadenbrandprüfverfahren im Vergleich mit den aktuell europäisch entwickelten Fassadenbrandprüfverfahren.

Die Untersuchungen zur Vergleichbarkeit europäischer mit nationalen Fassadenbrandprüfverfahren soll eine Grundlage bei der Frage der Ersetz- oder Erweiterbarkeit der nationalen Prüfverfahren durch diese schaffen und dabei helfen, die wesentlichen Unterschiede zu verstehen.

Außerdem wird im Rahmen des Forschungsvorhabens erläutert unter welchen Umständen das nationale Fassadenbrandprüfverfahren nach DIN 4102-20 für die Prüfung schwerentflammbarer Außenwandbekleidungen ein kritisches und realitätsnahes Raumbrandszenario abbildet.

Als experimentelle Grundlage für das Forschungsvorhaben werden sogenannte mittel- und großskalierte Kalibrierungsversuche am gleichen Prüfstand durchgeführt. Auf Basis einer umfangreichen räumlichen Messinstrumentierung wird die Grundlage sowohl zur Vergleichbarkeit der Brandversuche untereinander als auch zur Vergleichbarkeit mit analytischen Berechnungsmodellen sowie vorangegangenen Brandversuchen ermöglicht.

Schlussendlich legen die Untersuchungen dar, ob mit den europäischen Fassadenbrandprüfverfahren die bauordnungsrechtlichen Schutzziele nachgewiesen werden können.

Abstract

The research project "On the safety level of the German façade fire test methods" includes the main topic sections "flame-retardant exterior wall claddings" and national façade fire test methods in comparison with the currently developed European façade fire test methods.

The investigations into the comparability of European and national façade fire test methods are intended to provide clarity on the question of the substitutability or expandability of national test methods by these and to support those involved in understanding the necessary assessment of the differences, some of which are significant.

In addition, the research project will explain under which circumstances the national façade fire test method according to DIN 4102-20 for the testing of flame-retardant exterior wall claddings represents a critical and realistic room fire scenario.

As an experimental basis for the research project, so-called medium- and large-scale calibration tests are carried out on the same test stand. Based on spatial and extensive measurement instrumentation, the basis for comparability of the fire tests with each other and with analytical calculation models as well as previous fire tests is made possible.

Finally, the investigations show whether the protection goals of the German national building authorities can be verified with the European façade fire test methods.

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Umsetzung und Zielstellung	2
2	Stand der Technik und Forschung	4
2.1	Einführung	4
2.2	Brandbeanspruchungen von Fassaden.....	4
2.2.1	Brand in einem Gebäude	5
2.2.2	Brand von außen, angrenzend zur Fassade	5
2.2.3	Brand in einem Nachbargebäude.....	6
2.3	Bauordnungsrechtliche Anforderungen und Schutzziele	8
2.4	Fassadenbrandprüfverfahren national und europäisch.....	10
2.4.1	Nationale Verfahren – DIN 4102-20 [12]	10
2.4.2	Nationale Verfahren – DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand 2021-11) [13]	12
2.4.3	Europäische Verfahren – Medium-Exposure-Test.....	13
2.4.4	Europäisches Verfahren – Large-Exposure-Test	15
2.5	Ausblick	17
3	Brandversuche	18
3.1	Einführung	18
3.2	Medium-Exposure-Test – Holz (EU).....	20
3.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung	20
3.2.2	Versuchsergebnisse	24
3.3	Medium-Exposure-Test – DIN 4102-20 Gas (DE)	28
3.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung	28
3.3.2	Versuchsergebnisse	29
3.4	Large-Exposure-Test – Holz (EU)	32
3.4.1	Versuchsaufbau und -durchführung	32
3.4.2	Versuchsergebnisse	36
3.5	Large-Exposure-Test - Sockelbrandprüfung (DE)	41

3.5.1	Versuchsaufbau und -durchführung	41
3.5.2	Versuchsergebnisse	44
4	Vergleichsauswertungen und -betrachtungen	49
4.1	Freigesetzte Wärmeenergie und Wärmefreisetzungsrate.....	49
4.2	Wärmestromdichten.....	51
4.3	Isothermen und Temperaturen.....	55
4.4	Vergleich Medium-Exposure- und Large-Exposure-Tests mit dem Raumbrandszenario	64
4.4.1	Einführung	64
4.4.2	Medium- und Large-Exposure Holz (EU) vs. Raumbrand.....	64
4.5	Fazit.....	67
5	Zusammenfassung.....	70
6	Literaturverzeichnis	74
7	Anlagen	78
7.1	Vergleich der Fassadenbrandprüfverfahren	78
7.2	Versuchsaufbau und -durchführung	83
7.2.1	Brandversuch – Vorbereitungen.....	83
7.3	Versuchsergebnisse	95
7.3.1	Bilder Brandversuch.....	95
7.3.2	Gegenüberstellung ausgewählter Bilder und Isothermen	111
7.3.3	Isothermen der Mittelwerttemperaturen.....	138
7.4	Mittelwerttemperaturen – Tabellen.....	155
7.4.1	Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 – 300 s bis 900 s	155
7.4.2	Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 – 300 s bis 1200 s	156
7.4.3	Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 – 0 s bis 1200 s	158
7.4.4	Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V4 bis V6 – 300 s bis 900 s	159
7.4.5	Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V4 bis V6 – 300 s bis 1200 s	161
7.4.6	Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V4 bis V6 – 0 s bis 1200 s	162
7.4.7	Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 – 300 s bis 1200 s.....	164

7.4.8	Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 – 300 s bis 1500 s.....	165
7.4.9	Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V10 bis V12 – 300 s bis 1200 s.....	167
7.4.10	Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V10 bis V12 – 300 s bis 1500 s.....	168
7.5	THR, HRR und Wärmestromdichten	170

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Außenwandbekleidungssysteme wie Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) mit brennbaren Dämmstoffen oder vorgehängte hinterlüftete Fassaden (vhF) können wesentlich zu einer schnellen vertikalen Brandausbreitung über die Fassade von Gebäuden beitragen. Um dies zu verhindern, müssen diese Fassadenkonstruktionen hinsichtlich des Brandverhaltens und der Notwendigkeit und Wirksamkeit von konstruktiven Brandschutzmaßnahmen untersucht werden.

Neben den üblichen Baustoffuntersuchungen werden daher in Deutschland bereits seit Anfang der 1990er Jahre Fassadenbrandversuche durchgeführt. In der zweiten Hälfte der 1990er Jahre wurden zunehmend mehr solcher Brandversuche durchgeführt und der erste Entwurf für DIN 4102-20 verfasst. Die Erfahrungen aus diesen und den in den folgenden Jahren durchgeführten, zahlreichen Brandversuchen sind in die Regelungen der aktuell gültigen Zulassungen und Verwaltungsvorschriften der Länder eingeflossen.

In enger Abstimmung zwischen Herstellern und den obersten Bauaufsichten der Länder - vertreten durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) - wurde so ein nationales Sicherheitsniveau geschaffen, dass dazu führte, dass wenig kritische Brandereignisse an zugelassenen Außenwandbekleidungssystemen in Deutschland auftreten.

Aktuell werden auf europäischer Ebene zwei neue Fassadenbrandprüfverfahren entwickelt ([3], [20]). Ein großskalierter Brandversuch (Large-Exposure-Test) als Fassadenbrandprüfverfahren, das der britischen Fassadenbrandprüfung BS 8414-1 [5] ähnelt und sich von den deutschen Fassadenbrandprüfverfahren unterscheidet. Und ein so genannter mittelskalierter Brandversuch (Medium-Exposure-Test), der dem Brandprüfverfahren nach DIN 4102-20 [12] mit einer 30 kg schweren Holzkrippe ähnelt.

Gemäß Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen MVV TB [39] muss zum Nachweis der Schwerentflammbarkeit *„bei Einwirkung eines Entstehungsbrandes oder eines sich entwickelnden Brandes gewährleistet sein, dass die Teile baulicher Anlagen nur einen begrenzten Beitrag zum Brand leisten und dass nur eine begrenzte Brandausbreitung während und bei Wegfall der Brandeinwirkung vorliegt.“* Dabei dürfen je nach Verwendung des Bauteils eine Entzündung erst nach einer bestimmten Zeit der Flammeneinwirkung, nur eine begrenzte Temperatur der entstehenden Rauchgase, eine begrenzte Freisetzung von Energie, eine definierte Rauchentwicklung, kein selbstständiges Weiterbrennen, kein fortschreitendes Glimmen und/oder Schwelen, soweit erforderlich kein brennendes Abfallen oder Abtropfen auftreten.

Als Brandeinwirkung ist gemäß Abschnitt A 2.1.2.3 MVV TB [39] bei Außenwandbekleidungen mit der Anforderung schwerentflammbar die Brandeinwirkung durch die aus einer Wandöffnung schlagenden Flammen anzunehmen.

Das Brandverhalten von Baustoffen wird aber mit Laborbrandversuchen untersucht, die die Brandphasen des Entstehungsbrands abbilden. D.h. es wird kein voll entwickelter Brand abgebildet. Flammen schlagen aber erst mit Beginn der Vollbrandphase in einem Raum über Fenster und Türen auf die davor liegende Fassade. Es ist daher notwendig zur Bewertung einer schwerentflammbaren Außenwandwandbekleidung die Untersuchung über die Entstehungsbrandphase hinaus zu untersuchen. Die Begrenzung der Brandausbreitung in und auf Außenwandbekleidungen wird daher mit dem Fassadenbrandprüfverfahren DIN 4102-20 [12] untersucht, zumindest immer dann, wenn nicht durch andere Laboruntersuchungen abschließend geklärt werden kann, ob die Schutzziele der Schwerentflammbarkeit erreicht werden.

Im Weiteren müssen zumindest bei WDVS mit expandiertem Polystyrol (EPS) und der Anforderung schwerentflammbar zusätzlich auch die Auswirkungen durch einen Brand von außen angrenzend zur Fassade berücksichtigt werden. Hierzu wurde in den 2010er Jahren die Sockelbrandprüfung entwickelt, die in Anhang 5 MVV TB [39] bauaufsichtlich eingeführt wurde. Dieses Brandszenario ist im Zusammenhang mit den europäischen Fassadenbrandprüfungen hinsichtlich der ausreichenden Berücksichtigung nicht eindeutig identifizierbar und macht eine genauere Untersuchung im Vergleich zu den geplanten europäischen Fassadenbrandprüfverfahren notwendig.

1.2 Umsetzung und Zielstellung

Das Forschungsvorhaben „Zum Sicherheitsniveau der deutschen Fassadenbrandprüfverfahren“ beinhaltet die wesentlichen Themenabschnitte „schwerentflammbare Außenwandbekleidungen“ und nationale Fassadenbrandprüfverfahren im Vergleich mit den aktuell europäisch entwickelten Fassadenbrandprüfverfahren die zu der wesentlichen Fragestellung führt: „Wie kann dieses Sicherheitsniveau beschrieben werden und könnte es auch mit anderen aktuell diskutierten Fassadenbrandprüfverfahren sichergestellt werden?“

Es soll hierzu im Rahmen des Forschungsvorhabens erläutert werden unter welchen Umständen DIN 4102-20 [12] ein kritisches Raumbrandszenarios abgebildet wird. Außerdem soll das geplante alternative europäische Fassadenbrandprüfverfahren mit dem nationalen Sockelbrandprüfverfahren anhand experimenteller Daten verglichen und bewertet werden.

Diese Untersuchungen sollen somit darlegen, ob mit den europäischen Fassadenbrandprüfverfahren die bauaufsichtlichen Schutzziele nachgewiesen werden können.

Als experimentelle Grundlage für das Forschungsvorhaben werden nachfolgend aufgeführte Fassadenbrandprüfungen am gleichen Prüfstand durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen werden durch ein Kleinforschungsvorhaben der Ingenieurgesellschaft für das Brandverhalten von Bauarten Hauswaldt mbH (Brandversuchsreihe V1 bis V3) ergänzt:

1. Brandversuche V1 bis V3: Europäisch geplanter Medium-Exposure-Test mit einer ca. 30 kg Holzkrippe ([3], [20]),
2. Brandversuche V4 bis V6: Medium-Exposure-Test nach DIN 4102-20 [12] mit Gasbrenner,
3. Brandversuche V7 bis V9: Europäisch geplanter Large-Exposure-Test mit einer ca. 350 kg Holzkrippe ([3], [20]),
4. Brandversuche V10 bis V12: Large-Exposure Sockelbrandprüfung mit einer ca. 200 kg Holzkrippe nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand 2021-11) [13].

Bei den Fassadenbrandprüfungen wird für die Medium-Exposure-Tests und Large-Exposure-Tests jeweils eine identische Messinstrumentierung verwendet. Die Standard-Instrumentierung mit Mantel-Thermoelementen wird 20 mm vor Oberfläche der Prüfwand angeordnet. Zusätzlich wird ein räumliches Messraster angeordnet, um die räumliche Flammenausbildung in den einzelnen Brandversuchen zu erfassen.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Einführung

Nachfolgend wird der Stand der Technik und Forschung im Zusammenhang mit den Themenschwerpunkten des Forschungsvorhabens dargestellt. Dabei wird zunächst ein Überblick zu den Brandbeanspruchungen von Fassaden hinsichtlich der drei möglichen Brandszenarien sowie die daraus möglichen Brandursachen bzw. Brandquellen gegeben. Darauf aufbauend werden die nationalen Schutzziele sowie die nationalen Anforderungen an Außenwandbekleidungssysteme vorgestellt. Zum Abschluss des Kapitels erfolgt eine Gegenüberstellung der nationalen mit den geplanten europäischen Fassadenbrandprüfverfahren.

2.2 Brandbeanspruchungen von Fassaden

Die Brandausbreitung auf der Außenwandbekleidung eines Gebäudes wird im Wesentlichen durch die Art und Intensität sowie den Ort des Entstehungsbrandes beeinflusst. Die Außenwandbekleidung eines Gebäudes kann durch drei auftretende Brandszenarien thermisch beansprucht werden. Dabei wird zwischen folgenden Szenarien unterschieden:

- Brand in einem Nachbargebäude,
- Brand von außen, angrenzend zur Außenwand (u. a. im Sockelbereich und auf Balkonen sowie Loggien),
- Brand in einem Gebäude (Raumbrand).

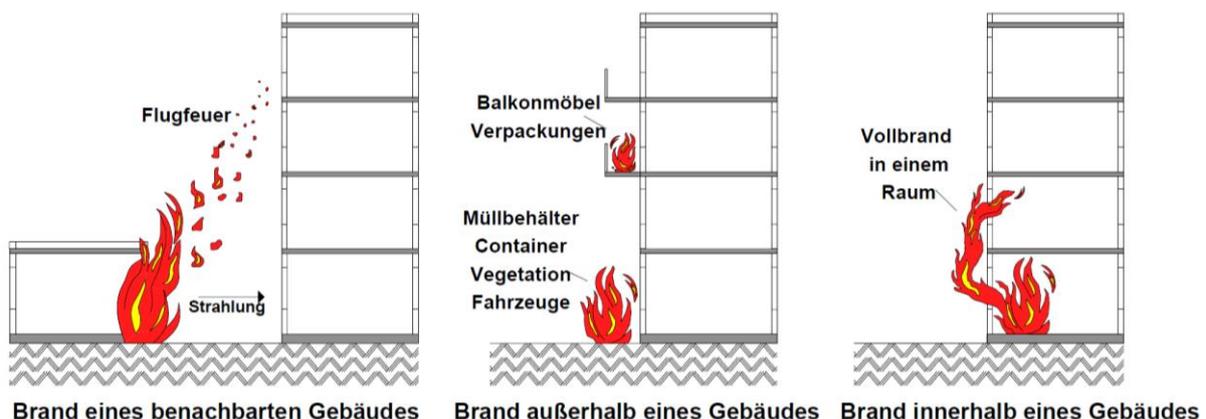


Abbildung 2-1: Mögliche Brandbeanspruchungen durch unterschiedliche Brandszenarien auf die Außenwandbekleidung

Die auftretenden Brandszenarien unterscheiden sich unter anderem im Schadensrisiko und in der Häufigkeit.

2.2.1 Brand in einem Gebäude

Raumbrände sind ein häufiges Brandszenario, welches jedoch nicht immer eine Brandbeanspruchung auf die Außenwand bzw. auf die Außenwandbekleidung zur Folge hat. Bei einem Raumbrand beziehungsweise einem Brand in einer Nutzungseinheit hängt die Brandentwicklung u. a. von der vorhandenen Brandlast und den Ventilationsbedingungen ab. Es muss ein ausreichendes Sauerstoffangebot vorhanden sein, damit ein kritischer Vollbrand entstehen kann. Frühzeitig eingeleitete wirksame Löscharbeiten können das Risiko der Entstehung eines Vollbrandes reduzieren. Bei einem Vollbrand können Fensterscheiben aufgrund der hohen Temperaturbeanspruchungen im Bereich der Lochfassade zerspringen und Flammen in der Folge schlagartig aus dem Gebäude austreten. Auch geöffnete Fenster oder Türen sind ein zu betrachtendes Szenario. Die Flammenhöhe hängt dabei unmittelbar von der Brandleistung aber auch von der Geometrie der Öffnung ab. Die aus der Bauwerksöffnung austretenden Flammen können in Abhängigkeit der Intensität des Brandes im Regelfall eine Höhe bis zu ca. 4,0 m erreichen [14]. Durch die damit erreichte thermische Beanspruchung einer möglichen Öffnung im darüber liegenden Geschoss kann es zu einer geschossweisen Brandweiterleitung zwischen zwei übereinanderliegenden Nutzungseinheiten kommen. Brennbare Fensterelemente oder auch geöffnete Fenster begünstigen die Brandweiterleitung. Aber auch geschlossene Fenster können bei andauernder thermischer Beanspruchung zerbersten und eine Brandweiterleitung in das nächstgelegene Geschoss begünstigen. Des Weiteren ist die Brandausbreitung in und auf der Außenwandbekleidung durch ein sogenanntes „Lauffeuer“ über mehrere Geschosse als äußerst kritisch zu bewerten und unbedingt zu vermeiden.

2.2.2 Brand von außen, angrenzend zur Fassade

Im Jahr 2012 hat eine Projektgruppe der Bauministerkonferenz (IS-Argbau) festgestellt, dass beim Brand von außen, angrenzend zur Fassade, für das mittlerweile so genannte Sockelbrandszenario weitere Forschungsuntersuchungen benötigt werden, die zum Forschungsvorhaben „Brandverhalten von WDVS mit EPS“ (u. a. [27], [28], [29], [30]) geführt haben. Hierzu wurden Untersuchungen an brennenden Müllcontainern, welche als maßgebende Brandquelle für die Brandursache identifiziert wurden, durchgeführt, um die daraus resultierende Brandbeanspruchung in Form eines geeigneten Prüffeuers auf eine Außenwand mit einer Außenwandbekleidung zu definieren. Das Sockelbrandszenario mit der zugrunde gelegten Fassadenbrandprüfung wurde erstmalig im ersten Entwurf der MVV-TB Jahr 2016 bzw. der ersten MVV-TB-Ausgabe im Jahr 2017 veröffentlicht.

Die auftretenden Brandquellen des Brandszenarios „Brand von außen“ sind unterschiedlichen Ursachen zuzuordnen. Dabei spielen insbesondere folgende Brandquellen eine Rolle:

- Müllcontainer,
- Sperrmüll,
- Bauabfälle im Sockelbereich oder auf Baugerüsten (Bauphase),
- abgestellte Fahrzeuge,
- brennbare Carports,
- Vegetation.

Als Brandszenario von außen in höher gelegenen Geschossen auf z. B. Balkonen, Loggien oder Laubengängen sind unter anderem folgende Brandquellen für Außenbrände als Ursache zu identifizieren:

- Möblierung,
- Verpackungsmaterial,
- Lagergut,
- Grillgeräte.

Aufgrund der genannten Brandereignisse ist eine Brandausbreitung auf die Außenwandbekleidung oder auch in das Innere des Gebäudes möglich [14]. Der Sockel- oder Spritzwasserbereich (Balkone, Loggien etc.) ist aus brandschutztechnischer Sicht als konstruktive Risikostelle zu betrachten.

Außenliegende Brände sind überwiegend brandlastgesteuerter Brände, da eine ausreichende Sauerstoffzufuhr gewährleistet ist. Somit hängt die Intensität im Wesentlichen von der Brandlast (u. a. Heizwerte, Zündtemperatur etc.) und den wirksamen Brandflächen der Brandquelle ab. Bauordnungsrechtliche Anforderungen hinsichtlich der Aufstellung oder Vermeidung der genannten Brandquellen sind bisher nicht berücksichtigt und bezüglich der organisatorischen Umsetzung nicht immer realisierbar. Für die Aufstellung von Müllcontainern und Ablagerungen von Sperrmüll oder Bauabfällen gibt es unterschiedliche Hinweispapiere mit Empfehlungen zu einzuhaltenen Abständen oder Einhausungen zur Vermeidung dieser Brandgefahr im Bereich von Außenwänden ([15], [6], [41]). Für das Brandszenario von außen in höher gelegenen Geschossen, wie z. B. auf Balkonen oder Loggien, ist bei schwerentflammbaren Außenwandbekleidungen national der Medium-Exposure-Test gemäß DIN 4102-20 [12] für den Raumbrand maßgebend.

2.2.3 Brand in einem Nachbargebäude

In Deutschland sind aufgrund der bauordnungsrechtlichen Anforderungen Mindestabstände zwischen angrenzenden Gebäuden oder zu Grundstücksgrenzen einzuhalten oder alternativ Gebäude durch Gebäudeabschlusswände (Brandwände beziehungsweise Brandersatzwände) vor einem Brandüberschlag zu schützen (vgl. MBO [35]). Wenn der Abstand zwischen benachbarten Gebäuden bzw. der Grundstücksgrenze entsprechend den bauaufsichtlichen

Anforderungen ausgebildet ist, wird das Risiko eines Brandüberschlages von einem brennenden Gebäude oder Teilen davon über eine direkte Flammeneinwirkung auf die benachbarte Fassade erheblich reduziert. Die maßgebende thermische Beanspruchung resultiert bei diesem Brandszenario dann in der Regel aus der Wärmestrahlung des brennenden Gebäudes auf das Nachbargebäude. Die Intensität der auftreffenden Wärmestrahlung ist wiederum abhängig vom Entwicklungsstadium des Brandes, der Größe der strahlenden Fläche, dem Abstand des Nachbargebäudes sowie der Anordnung der Gebäude untereinander. Durch ungünstige Windverhältnisse kann auch Flugfeuer eine zusätzliche Brandbeanspruchung darstellen. Wirksame Schutzmaßnahmen, ergänzend zu den vorbeugenden baulichen Maßnahmen und den Löscharbeiten am Primärbrand, können dann ausschließlich durch die Feuerwehr mittels Abkühlens durch Löschwasser an der thermisch beanspruchten Fassade des angrenzenden Gebäudes eingeleitet werden. Die Notwendigkeit solcher Maßnahmen ist grundsätzlich als ungünstig anzusehen, da Einsatzkräfte unabhängig vom Primärbrand während eines Löscheinsatzes gebunden werden.

Die Berücksichtigung von Gebäudeabständen in einem Prüfverfahren für Außenwandbekleidungen weist sich grundsätzlich als schwierig auf, da hierbei zu dem geprüften Wandaufbau zusätzlich der Einfluss einer Nachbarbebauung berücksichtigt werden müsste. Dies würde bei einer Brandprüfung durch Ausbildung zusätzlicher Gebäudenachbildungen zu einem erhöhten technischen Aufwand führen, der aufgrund der bisher registrierten Brandereignisse in Deutschland [16] in diesem Zusammenhang nicht gerechtfertigt wäre. In der thematischen Auseinandersetzung von Kunze [24] zum Thema „Herleitung des Gebäudeabstandes unter dem Aspekt der Brandausbreitung“ wird deutlich, dass im konventionellen Wohnungsbau der notwendige Mindestabstand zur Ausführung ohne notwendige Brandschutzmaßnahmen im Bereich der Außenwände bei einem Abstand der Gebäude von ≥ 5 m als ausreichend sicher angesehen werden kann. Insbesondere das frühzeitige Einsetzen von wirksamen Löscharbeiten begünstigt den Ansatz.

2.3 Bauordnungsrechtliche Anforderungen und Schutzziele

Bauordnungsrechtlich werden die allgemeinen Anforderungen an den Brandschutz mit Bezug auf Außenwandbekleidungen im § 14 der Musterbauordnung MBO [35] geregelt. Dort heißt es, dass „bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten sind, 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.“

Für Außenwände wird in § 28 MBO [35] konkretisiert, dass „Außenwände und Außenwandteile [...] so auszubilden sind, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist.“ An Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 unterhalb der Hochhausgrenze müssen „Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen [...] einschließlich ihrer Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein; Unterkonstruktionen aus normalentflammbaren Baustoffen sind zulässig, wenn“ die Brandausbreitung begrenzt ist.

Als schwerentflammbar werden Außenwandbekleidungen gemäß MVV TB: 2020-01 [39] Abschnitt A 2.1.2.3 definiert, wenn bei Einwirkung eines Entstehungsbrandes oder eines sich entwickelnden Brandes nur ein begrenzter Beitrag zum Brand während und bei Wegfall der Brandeinwirkung vorliegt. Dabei dürfen je nach Verwendung des Bauteils

- eine Entzündung erst nach einer bestimmten Zeit der Flammeneinwirkung,
- nur eine begrenzte Temperatur der entstehenden Rauchgase,
- eine begrenzte Freisetzung von Energie,
- eine definierte Rauchentwicklung und
- kein selbstständiges Weiterbrennen,
- kein fortschreitendes Glimmen und/oder Schwelen und
- soweit erforderlich kein brennendes Abfallen oder Abtropfen

auftreten.“

Diese sieben Punkte benennen die Schutzziele der Schwerentflammbarkeit.

Als brandschutztechnischer Nachweis muss die Außenwandbekleidung in Laborprüfungen die Klassifizierung „schwerentflammbar“ B1 gemäß DIN 4102-1 [7] oder C-s2,d2 oder besser nach DIN EN 13501-1 [8] erreichen. Diese Prüfverfahren und die Bewertungskriterien sind eindeutig geregelt, d.h. wenn ein Baustoff „schwerentflammbar“ ist, werden ihm spezifische Brandeigenschaften zugewiesen. Wenn also die Grenzkriterien einer Baustoffklasse eingehalten werden, ist sichergestellt, dass sich der Baustoff bei einem Entstehungsbrand oder einem sich entwickelnden Brand schwerentflammbar verhält.

Soll darüber hinaus sichergestellt werden, dass bei einer Brandeinwirkung durch einen fortentwickelten oder vollentwickelten Brand der Brandausbreitung vorgebeugt wird, so muss dies mit Fassadenbrandprüfverfahren untersucht werden.

Während die Laboruntersuchungen die Baustoffklasse der Außenwandbekleidung beurteilen, muss die Brandausbreitung und in einem größeren Maßstab untersucht werden. Konkret werden bestimmte Außenwandbekleidungen, abhängig z. B. von Dämmstoffart und Dämmstoffdicke, im Rahmen des Zulassungsverfahrens schwerentflammbarer Außenwandbekleidungen, Fassadenbrandversuchen zur weiteren Beurteilung und Verifikation des Brandverhaltens unterzogen. Es handelt sich hierbei um deutlich größere Prüfkörper und deutlich größere Brandbeanspruchungen als bei den Laborbrandprüfungen. Es wird auf diese Weise untersucht, ob die geforderte Beanspruchung, der aus einer Wandöffnung schlagenden Flammen (vgl. Abschnitt A 2.1.2.3 der MVV-TB), so ertragen werden kann, dass dennoch die oben genannten Schutzziele eingehalten werden. Als Brandeinwirkung ist DIN 4102-20: 2017-10, Abschnitt 4.2, zu verwenden. Flammen schlagen aber erst mit Beginn der Vollbrandphase in einem Raum über Fenster und Türen auf die davor liegende Fassade. Mit dem bauaufsichtlich geregelten Begriff der Schwerentflammbarkeit wird also nicht nur eine Klassifizierung des Brandverhaltens, sondern vielmehr auch eine Forderung an die „begrenzte Brandausbreitung“ bei einem fortentwickelten oder vollentwickelten Brand der Brandausbreitung verbunden. Unter diesem Aspekt ist eine gedankliche Unterscheidung der Begriffe „Baustoffklasse“ und „begrenzte Brandausbreitung“ sinnvoll, um die brandschutztechnische Leistungsfähigkeit einer klassifizierten Außenwandbekleidung besser verstehen zu können. [19]

Außenwandbekleidungen von Gebäuden der Gebäudeklasse 1 bis 3 müssen nur normalentflammbar sein. Zur Bewertung dieses Brandverhaltens sind üblicherweise entsprechende Laboruntersuchungen ausreichend. Sollten in Zukunft jedoch normalentflammbare Außenwandbekleidungen in Gebäuden oberhalb der Gebäudeklasse 3 eingesetzt werden, wie durch die Einführung der Musterholzbaurichtlinie [36] geplant (Stand 23.12.2021), wäre es notwendig Fassadenbrandversuche zur Sicherstellung einer begrenzten Brandausbreitung bei einer Brandeinwirkung durch einen fortentwickelten oder vollentwickelten Brand durchzuführen.

Außenwandbekleidungen von Hochhäusern müssen nichtbrennbar sein [37]. Zur Bewertung dieses Brandverhaltens sind entsprechende Laboruntersuchungen ausreichend, da die anzuwendenden Laborbrandprüfverfahren bereits den Vollbrand simulieren.

2.4 Fassadenbrandprüfverfahren national und europäisch

Auf nationaler Ebene werden zwei verschiedene Fassadenbrandprüfverfahren angewendet, um eine begrenzte Brandausbreitung im Sinne der Schwerentflammbarkeit nachzuweisen. Während bei dem Verfahren nach DIN 4102-20 [12] die Flammen aus einem Fenster schlagen, wird bei dem Verfahren nach DIN 4102-24 [13] ein Brand im Sockelbereich der Fassade simuliert.

Auf europäischer Ebene soll nun ebenfalls ein Verfahren zur Beurteilung von Außenwandbekleidungen erarbeitet werden. Bisher haben sich zwei Fassadenbrandprüfverfahren herauskristallisiert, welche sich im Wesentlichen im Brandbeanspruchungsniveau unterscheiden. Während das Verfahren mit der mittleren Brandbeanspruchung (Medium-Exposure-Test) stark an das deutsche Verfahren nach DIN 4102-20 [12] angelehnt ist, orientiert sich das Verfahren mit der großen Brandbeanspruchung (Large-Exposure-Test) eher am Prüfverfahren nach BS 8414-1 [5].

2.4.1 Nationale Verfahren – DIN 4102-20 [12]

Im Prüfverfahren nach der DIN 4102-20 [12] wird modellhaft die Beanspruchung der Außenwandbekleidung durch Flammen, die aus einer Wandöffnung schlagen, untersucht. Bei der Brandbeanspruchung handelt es sich nicht um ein Vollbrandereignis, sondern um einen skalierten Brand, der zum einen die Brandbeanspruchung im Sturzbereich der Außenwandöffnung und zum anderen die Flammenspitze einer Vollbrandbeanspruchung abbildet. Ziel dieser Untersuchungsmethode ist es festzustellen, welchen Beitrag die Außenwandbekleidung zur Brandausbreitung an der Fassade leistet.

Der Prüfstand wird als Gebäudeinnenecke nachgebildet. Unmittelbar in der Innenecke befindet sich die Brandkammer. In der folgenden Abbildung 2-2 ist exemplarisch der Prüfstand nach DIN 4102-20 [12] mit einem applizierten Außenwandbekleidungssystem dargestellt.

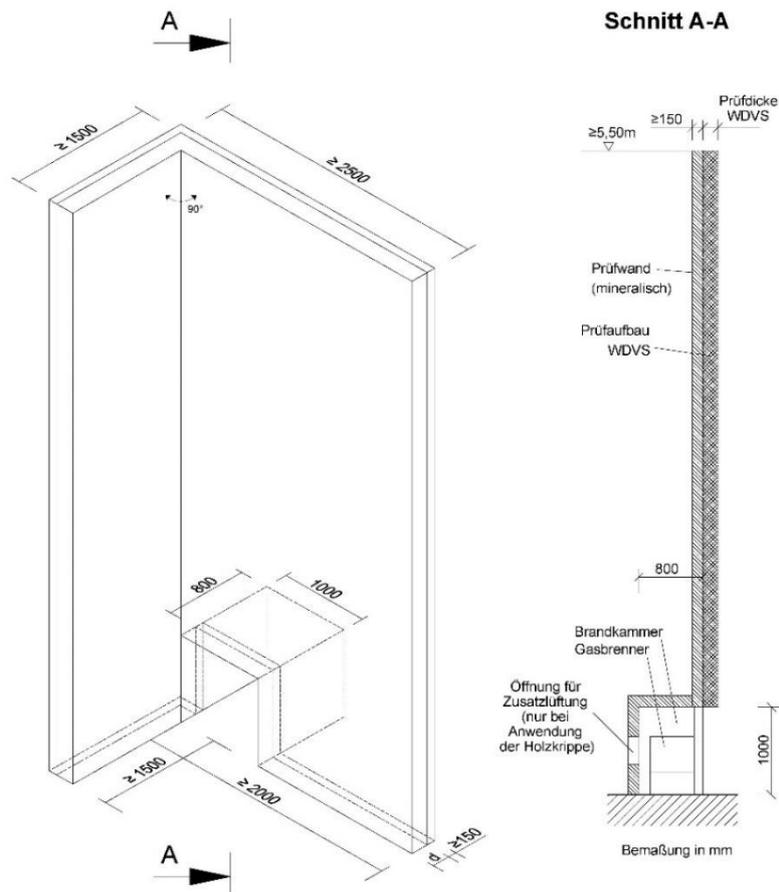


Abbildung 2-2: Versuchsstand mit Prüfkörper [14]

Als Prüffeuer wird üblicherweise ein Gasbrenner mit einer Leistung von ca. 340 kW angewendet. Dieser wird mit einem Abstand von 30 mm zur Innenecke und 100 mm zur Vorderkante der Prüfwand in der Brandkammer platziert. Alternativ besteht aber auch die Möglichkeit als Prüffeuer eine ca. 30 kg schwere Holzkippe vorzusehen.

Die Versuchszeit beträgt mindestens 60 Minuten, wobei die Dauer der Beflammung auf 20 Minuten beschränkt ist. Die sich an die Beflammung anschließende Beobachtungszeit von mindestens 40 Minuten dient unter anderem zur Feststellung, ob das Brandgeschehen am Prüfkörper nach Entfernen der Brandquelle von allein zum Erliegen kommt und zur Beobachtung von eventuell auftretenden Glimm- oder Schwelprozessen für in Abhängigkeit des Außenwandbekleidungssystems auch deutlich längere Beobachtungszeiten ergeben können.

Zur Bewertung der Versuchsergebnisse werden die horizontale und vertikale Brandausbreitung sowohl auf der Oberfläche der Außenwandbekleidung als auch im Inneren des Prüfkörpers dokumentiert. Ebenso wird ein eigenständiges Weiterbrennen der Konstruktion nach Beendigung der Brandbeanspruchung sowie eventuell auftretende Sekundärbrände in die Beurteilung der Schwerentflammbarkeit einbezogen. Die kritische

Brandausbreitung wird an den beiden Außenkanten des Probekörpers sowie 3,5 m über dem Brandkammersturz beobachtet. Weitere Bewertungskriterien siehe Tabelle 7-2.

Die Entscheidung, ob ein Außenwandbekleidungssystem die Kriterien einer begrenzten Brandausbreitung im Sinne der Schwerentflammbarkeit erfüllt, obliegt im Verfahren zur Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen (abZ) und / oder allgemeiner Bauartgenehmigungen (aBg) dem DIBt, das dabei vom zuständigen Sachverständigenausschuss beraten wird.

2.4.2 Nationale Verfahren – DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand 2021-11) [13]

Im Prüfverfahren nach der DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand 2021-11) [13] wird ein Vollbrand am Fuß der Fassadenkonstruktion nachgestellt. Die Brandbeanspruchung ist vergleichbar mit beispielsweise einem brennenden Müllcontainer. Ziel dieser Untersuchungsmethode ist es festzustellen, welchen Beitrag die Außenwandbekleidung zur Brandausbreitung im Bereich der untersten drei Etagen eines Gebäudes leistet.

Der Prüfstand wird ebenfalls als Gebäudeinnenecke nachgebaut. Auf eine Brandkammer wird verzichtet. In der folgenden Abbildung 2-3 ist exemplarisch der Prüfstand mit einem applizierten WDVS dargestellt.

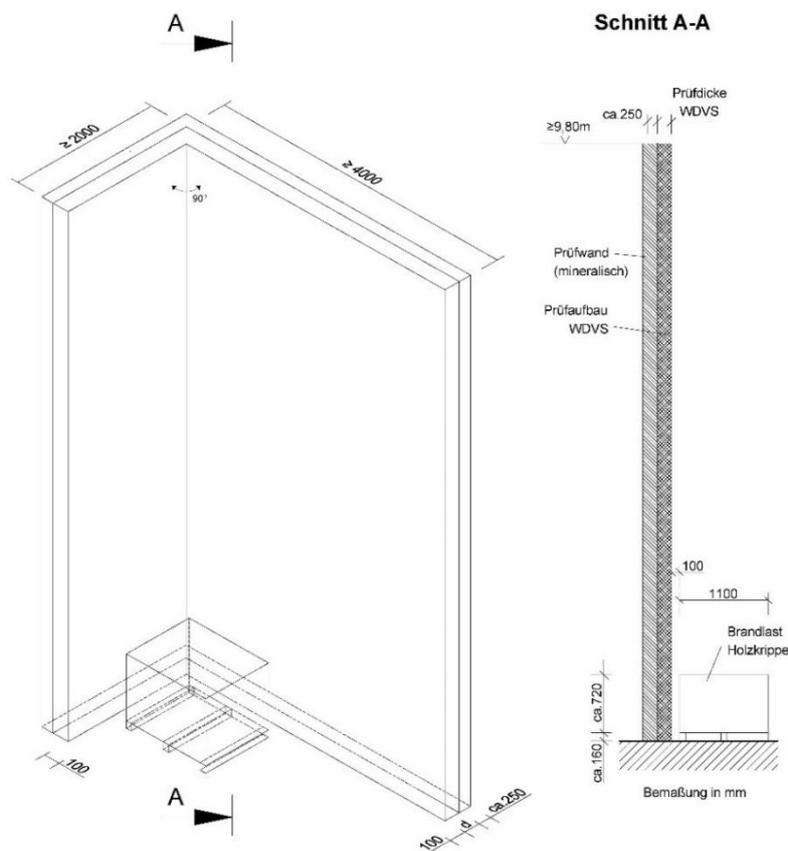


Abbildung 2-3: Exemplarische Darstellung des Prüfstandes mit appliziertem WDVS [14]

Zur Brandbeanspruchung wird eine ca. 200 kg schwere Holzkrippe mit einer Grundfläche von 1,1 m x 1,1 m verwendet. Diese wird mit einem Abstand von 100 mm zur Oberfläche der Außenwandbekleidung unmittelbar in der Innenecke platziert. Zur Belüftung wird die Krippe auf einen Gitterrost gestellt und dieses ca. 200 mm aufgeständert.

Die Versuchszeit beträgt auch bei diesem Prüfverfahren mindestens 60 Minuten, wobei die Dauer der Beflammung nach 25 Minuten endet. Nach Ablauf der 25 Minuten wird die Krippe entweder vom Prüfstand entfernt. In der sich an die Beflammung anschließende Beobachtungszeit von mindestens 35 Minuten wird ebenfalls ein besonderes Augenmerk daraufgelegt, ob das Brandgeschehen am Prüfkörper nach Entfernen der Brandquelle von allein zum Erliegen kommt. Eventuell auftretende Glimm- oder Schwelprozesse können untersucht werden.

Zur Bewertung der Versuchsergebnisse werden auch bei diesem Prüfverfahren die horizontale und vertikale Brandausbreitung sowohl auf der Oberfläche der Außenwandbekleidung als auch im inneren des Prüfkörpers beobachtet und dokumentiert. Ebenso wird ein eigenständiges Weiterbrennen der Konstruktion nach Beendigung der Brandbeanspruchung sowie eventuell auftretende Sekundärbrände in die Beurteilung der Schwerentflammbarkeit einbezogen. Die kritische Brandausbreitung wird an den beiden Außenkanten des Probekörpers sowie in einer Höhe von ca. 8,5 m über dem Prüfraumboden beobachtet. Weitere Hinweise für die notwendige Dokumentation des Brandversuchs siehe Tabelle 7-2.

Die Entscheidung, ob ein Außenwandbekleidungssystem die Kriterien einer begrenzten Brandausbreitung im Sinne der Schwerentflammbarkeit erfüllt, obliegt dem DIBt unter Beratung durch den zuständigen Sachverständigenausschuss.

2.4.3 Europäische Verfahren – Medium-Exposure-Test

Im Medium-Exposure-Test mit Stand vom 23.12.2021 wird, wie im Prüfverfahren nach DIN 4102-20 [12], ein skaliertes Vollbrand in einem Raum nachgestellt. Die Flammen schlagen aus der Wandöffnung vor die Fassade und beanspruchen auf diese Art die Außenwandbekleidung und den Sturzbereich. Ziel dieser Untersuchungsmethode ist es das Gefahrenpotential einer Fassadenkonstruktion unter einer skalierten Brandbeanspruchung zu beurteilen.

Auch im europäischen Verfahren wird der Prüfstand als Gebäudeinnenecke nachgebaut. Die Höhe des Prüfstandes beträgt nach Stand Dezember 2021 mindestens 7,5 m, die Mindestbreite der beiden Wände wurde noch nicht festgelegt. Die Brandkammer befindet sich ebenfalls unmittelbar in der Innenecke des fertigen Prüfkörpers, im Unterschied zur DIN 4102-20 [12] jedoch 500 mm über dem Prüfraumboden. Zusätzlich ist eine zweite Öffnung in der Rückwand angeordnet. Diese soll es ermöglichen, beispielsweise den Einfluss der

Anschlussdetails von Fenstern auf die Brandweiterleitung in der Fassadenkonstruktion zu beurteilen. In der folgenden Abbildung 2-4 ist exemplarisch der Prüfstand dargestellt.

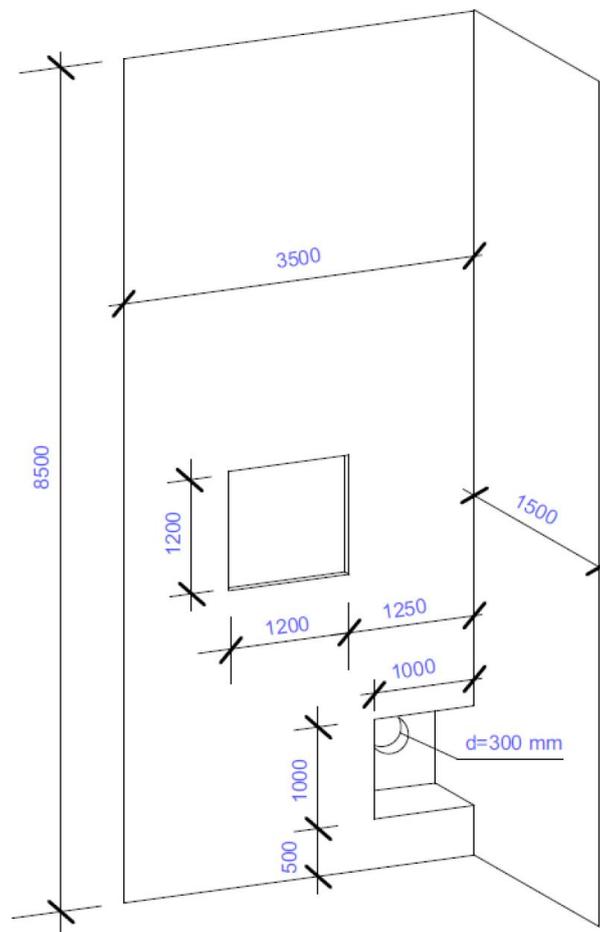


Abbildung 2-4: Exemplarische Darstellung des Prüfstandes [20]

Als Prüffeuer wird eine ca. 30 kg schwere Holzkröpfung mit einer Grundfläche von 0,5 m x 0,5 m benutzt. Diese wird mit einem Abstand von 100 mm zur Vorderkante des Prüfstandes mittig in der Brandkammer platziert und auf einen Gitterrost mit Stahlfüßen mit einer Gesamthöhe von 200 mm gestellt. Zur zusätzlichen Belüftung befindet sich mittig in der Rückwand der Brandkammer eine kreisrunde Öffnung. Durch diese wird ab der 5. Prüfminute mittels Lüfter ein Volumenstrom von ca. 400 m³/h Frischluft zugeführt.

Die Versuchszeit beträgt bei diesem Prüfverfahren nach Stand Dezember 2021 60 Minuten, wobei die Dauer der Beflammung nach 22 Minuten endet. Nach Ablauf der 22 Minuten wird die Kröpfung vorsichtig abgelöscht. An die Beflammungszeit schließt sich eine Beobachtungszeit von 38 Minuten an.

Die Kriterien zur Bewertung der Versuchsergebnisse sind noch nicht endgültig festgelegt. Nach derzeitigem Planungsstand (Ende 2021) ist jedoch eine Temperaturerhöhung über 500 K in einer Höhe von 3,5 m über dem Brandkammersturz sowie in einer Entfernung aus

der fertigen Innenecke von 2,75 m auf der Rückwand bzw. 1,45 m auf der Seitenwand als Grenzkriterium vorgesehen, um die horizontale und vertikale Brandausbreitung bewerten zu können. Weiterhin wird neben dem brennenden Abfallen/ Abtropfen auch das Abfallen nichtbrennender Teile zur Beurteilung des Brandverhaltens herangezogen. Die Beurteilung von Glimm- oder Schwelprozessen ist bisher als Option angedacht. Die genaue Planung der Versuche, insbesondere die Anordnung der Thermoelemente und Auswertung der Ergebnisse stehen noch aus.

Zur Einstufung des Brandverhaltens von Fassadenkonstruktionen sind auf europäischer Ebene vier Klassifizierungsstufen in Überlegung. Sofern alle Kriterien dieser Prüfung erfüllt wären, könnte das System in die Klasse LS3 eingeordnet werden. Sofern nur das Kriterium der begrenzten Brandausbreitung erfüllt wäre, könnte das System nur in die Klasse LS4 eingeordnet werden.

2.4.4 Europäisches Verfahren – Large-Exposure-Test

Im Large-Exposure-Test mit Stand vom 23.12.2021 wird ein Vollbrand in einem Raum nachgestellt. Die Flammen schlagen aus der Wandöffnung vor die Fassade und beanspruchen auf diese Art die Außenwandbekleidung und den Sturzbereich. Ziel dieser Untersuchungsmethode ist es, das Gefahrenpotential einer Fassadenkonstruktion unter einer dem Referenzbrandszenario annähernd 1:1 entsprechenden Brandbeanspruchung zu beurteilen.

Die im Large-Exposure-Test nachgebaute Gebäudeinnenecke hat eine Höhe von mindestens 8,5 m, die Mindestbreite der beiden Wände wurde noch nicht festgelegt. Die Brandkammer hat eine Öffnung von 2,0 m x 2,0 m und befindet sich ebenfalls 500 mm über dem Prüfraumboden. Der Abstand der Brandkammeröffnung zur fertigen Innenecke beträgt 0,25 m. Auch im Large-Exposure-Test ist eine zweite Öffnung zur Beurteilung von Fensteranschlüssen anzuordnen. In der folgenden Abbildung 2-5 ist exemplarisch der Prüfstand dargestellt.

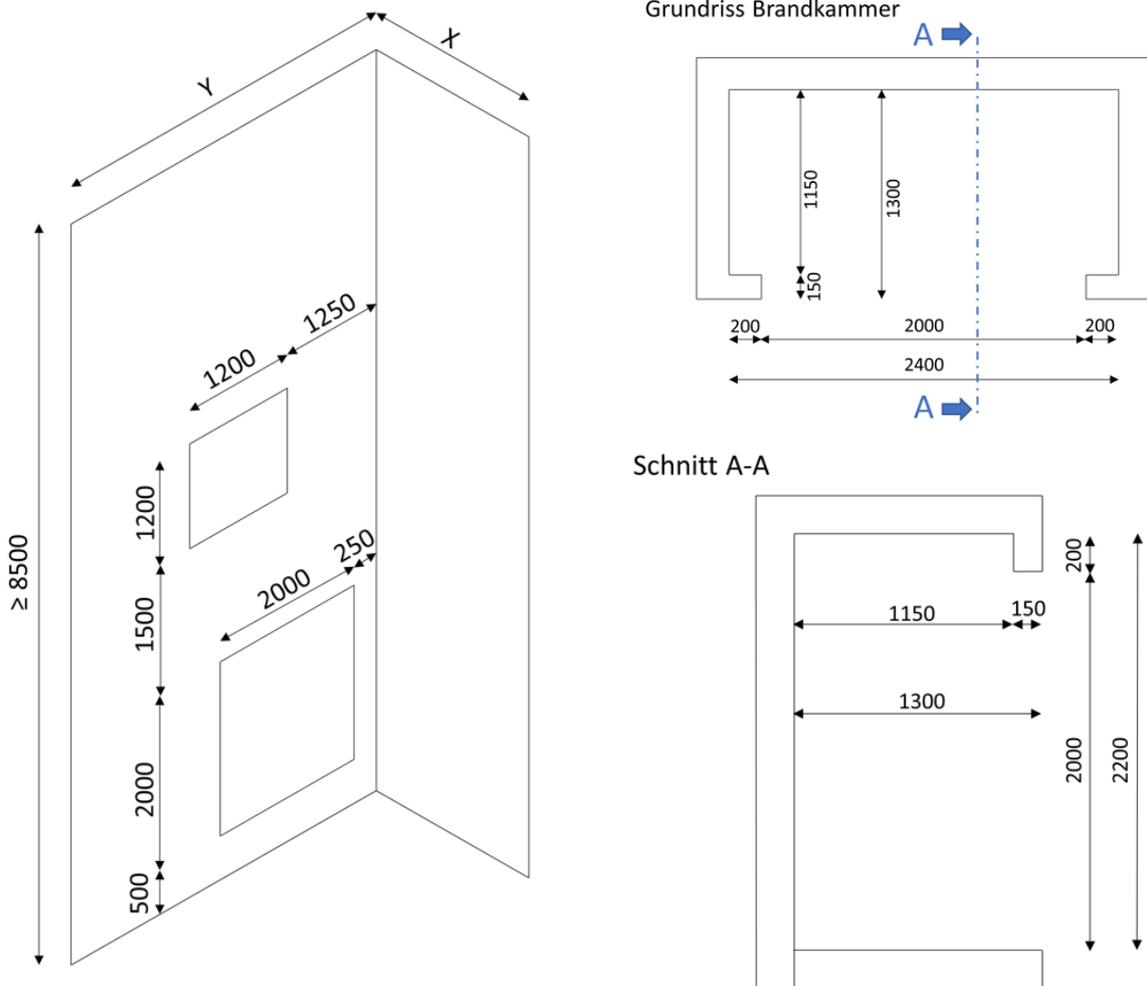


Abbildung 2-5: Exemplarische Darstellung des Prüfstandes

Zur Brandbeanspruchung wird eine ca. 350 kg schwere Holzkippe mit einer Grundfläche von 1,0 m x 1,5 m benutzt. Diese wird mit einem Abstand von 100 mm zur Rückseite mittig in der Brandkammer platziert. Zusätzlich wird die Krippe 400 mm aufgeständert, wobei die Auflagefläche eine massive Platte und kein Gitterrost darstellt.

Die Versuchszeit beträgt zum Stand Dezember 2021 60 Minuten, wobei die Holzkippe nach 30 Minuten vorsichtig abgelöscht wird. An die Beflammungszeit schließt sich eine Beobachtungszeit von 30 Minuten an.

Die Kriterien zur Bewertung der Versuchsergebnisse sind noch nicht endgültig festgelegt. Nach derzeitigem Planungsstand ist jedoch eine Temperaturerhöhung über 500 K in einer Höhe von 4,5 m über dem Brandkammersturz sowie in einer Entfernung aus der fertigen Innenecke von 2,75 m auf der Rückwand bzw. 1,45 m auf der Seitenwand zu vermeiden, um das Kriterium der horizontalen und vertikalen Brandausbreitung sowohl auf der Oberfläche der Außenwandbekleidung als auch im Inneren des Prüfkörpers zu erfüllen. Weiterhin wird neben dem brennenden Abfallen/ Abtropfen auch das Abfallen nichtbrennender Teile zur Beurteilung

des Brandverhaltens herangezogen. Die Beurteilung von Glimm- oder Schwelprozessen ist auch hier bisher nur als Option angedacht.

Zur Einstufung des Brandverhaltens von Fassadenkonstruktionen sind auf europäischer Ebene vier Klassifizierungsstufen in Überlegung. Sofern alle Kriterien dieser Prüfung erfüllt wären, könnte das System in die Klasse LS1 eingeordnet werden. Sofern nur das Kriterium der begrenzten Brandausbreitung erfüllt wäre, könnte das System nur in die Klasse LS2 eingeordnet werden.

2.5 Ausblick

Es sollen diese vier Fassadenbrandprüfverfahren an einem Prüfstand mit ähnlich räumlich angeordneter Messtechnik untersucht und miteinander verglichen werden. Hierzu sollen in einem ersten Schritt so genannte Kalibrierversuche, also nur der Brand der Normbrandquelle ohne einen Prüfkörper, durchgeführt werden.

Die Lage und die Größe der thermisch hoch beanspruchten Bereiche werden festgestellt und darauf geachtet, bei welchen Prüfverfahren die Flammen im Raum stehen und bei welchem sie sich stärker auf die Prüfstandwand legen.

Es sollten die Unterschiede der beiden ähnlichen Medium-Exposure-Tests aufgezeigt werden.

Der Large-Exposure-Test für den Sockelbrand mit dem zugrunde gelegten Sockelbrandszenario und der europäische Large-Exposure-Test für das Raumbrandszenario unterscheiden sich im Aufbau, bei der Lage des Prüffeuers und auch den Bewertungskriterien. Es soll herausgefunden werden, welche Ähnlichkeiten vorliegen und ob eine Übertragung der Ergebnisse von einem Prüfverfahren auf das andere ausgeschlossen werden muss.

3 Brandversuche

3.1 Einführung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sowie auf Grundlage eines ergänzenden Kleinforschungsvorhabens, beauftragt durch IBB Hauswaldt, wurden insgesamt 12 Brandversuche durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse der Brandversuchsreihe V1 bis V3 aus dem Kleinforschungsvorhaben IBB Hauswaldt wurden für die folgenden Ausarbeitungen zur Verfügung gestellt.

Insgesamt wurden vier Brandversuchsreihen mit jeweils drei Brandversuchen durchgeführt. Die Brandversuchsreihen setzten sich dabei wie folgt zusammen:

1. Brandversuche V1 bis V3: Europäisch geplanter Medium-Exposure-Test mit einer ca. 30 kg Holzkrippe [3]
2. Brandversuche V4 bis V6: Medium-Exposure-Test nach DIN 4102-20 [12] mit Gasbrenner
3. Brandversuche V7 bis V9: Europäisch geplanter Large-Exposure-Test mit einer ca. 350 kg Holzkrippe [3]
4. Brandversuche V10 bis V12: Large-Exposure Sockelbrandprüfung mit einer ca. 200 kg Holzkrippe nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand 2021-11) [13].

Die Durchführung der Brandversuche erfolgte an der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH – nachfolgend als MFPA Leipzig GmbH bezeichnet. Die Brandversuche wurden alle an demselben Prüfstand in der Brandversuchshalle C umgesetzt. Dadurch ergeben sich für die Brandversuche die in Tabelle 3-1 dargestellten grundlegenden geometrischen und materialspezifischen Randbedingungen.

Tabelle 3-1: Geometrische und materialspezifischen Randbedingungen bei den Brandversuchsreihen

Geometrische und materialspezifische Randbedingungen			
Bauteil		Innenmaße [m]	Material
Prüfstand	Rückwand B x H	4,0 x 9,8	Porenbetonmauerwerk mineralisch verspachtelt
	Eckwand B x H	2,5 x 9,8	
Prüfhalle	Grundfläche B x L	6,7 x 8,12	Stahlbeton und Kalksandsteinmauerwerk
	Höhe H	10,0	

Ziel der Durchführung der Brandversuche an derselben Brandprüfstelle war es, Unsicherheiten hinsichtlich der Reproduzierbarkeit auszuschließen. Außerdem diente dieser Ansatz zur besseren Vergleichbarkeit der Brandversuchsreihen untereinander. Aufgrund der Durchführung der unterschiedlichen Brandversuchsreihen am selben Prüfstand mussten

teilweise Abweichungen zu den einzelnen Prüfvorgaben toleriert werden, die in den einzelnen nachfolgenden Abschnitten erläutert sind.

Zur Erfassung der Temperaturen wurden NiCr-Ni-Mantelthermoelemente Typ K mit einem Durchmesser von 3 mm gemäß DIN EN 60584 [11] mit einer Messgrenze der Temperaturerfassung von max. 1300 °C verwendet. Dabei wurden die Temperaturmessstellen auf der Oberfläche sowie in einem räumlichen Messgitter vor der Fassade angeordnet. Die genaue Anordnung ist den nachfolgenden Abschnitten zu den einzelnen Brandversuchsreihen zu entnehmen. Als Grundlage für die räumliche Diskretisierung der Messstellenanordnung dienen die Lehrter Brandversuche [21], welche unter anderem für die Verifizierung der Fassadenbrandprüfungen hinsichtlich des Raumbrandszenarios herangezogen werden. Das Messintervall zur Aufzeichnung der Temperaturen wurde mit 10 Sekunden gewählt.

Zur Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate wurden die Abbrandraten der einzelnen Brandversuche mit Holzkrippen V1 bis V3 sowie V7 bis V12 bestimmt. Die Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate erfolgt wiederum mittelbar über den zeitlichen Masseverlust unter Berücksichtigung eines konstanten effektiven Heizwerts von 15,73 MJ/kg gemäß DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand 2021-11) [13].

3.2 Medium-Exposure-Test – Holz (EU)

3.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der europäische Medium-Exposure-Test wurde im Wesentlichen entsprechend dem aktuellen Stand des europäischen Prüfverfahrens gemäß [3] und den ergänzenden Erkenntnissen aus den Steering Group Meetings auf Grundlage nach [20] ausgeführt. Aufgrund von örtlichen baulichen Gegebenheiten befand sich die Öffnung der maschinellen Zuluft in der Brandkammer unmittelbar über dem Brandkammerboden ersatzweise zur mittigen Anordnung in der Rückwand der Brandkammer. Die Brandkammer wurde innenseitig mit einer 20 mm dicken Keramikwolle seitlich und oberhalb ausgekleidet.

Auf die Anordnung einer zusätzlichen Aussparung als simulierte Fensteröffnung im Prüfstand gemäß [3] wurde verzichtet, da ein Einfluss auf die Prüfergebnisse ohne appliziertes Außenwandbekleidungs-system nicht zu erwarten ist. Im Weiteren erhöht der Verzicht auf die Aussparung die Vergleichbarkeit der Brandversuchsreihen untereinander.

Als Prüffeuer wurde eine ca. 30 kg \pm 0,5 kg schwere Holzkrippe aus Fichtenholz eingesetzt. Diese bestand aus 40 mm x 40 mm x 500 mm großen Holzstäben und wurde zu einem Quader mit einer Grundfläche von 500 mm x 500 mm zusammengenagelt. Das Verhältnis von Holz zu Luft betrug ca. 1/1. Je Stab wurden zwei Nägel verwendet. Die Nägel hatten einen Randabstand zu den Enden von ca. 100 mm. Weitere Angaben zum Prüffeuer sind Tabelle 3-3 zu entnehmen.

Die Holzkrippe wurde mittig in der Brandkammer mit einem Abstand von 100 mm hinter der Vorderkante des Prüfstandes platziert. Den Boden der Brandkammer bildete die Wiegeeinrichtung, um den Abbrand der Holzkrippe bestimmen zu können. Da die Wiegeeinrichtung jedoch an der Vorderseite durch ca. 250 mm dicke Porenbetonsteine geschützt wurde, wurde das Gitterrost auskragend hergestellt. Als Zündinitial wurden zwei Blechwannen mit je 200 ml Isopropanol gefüllt und in die zweite Lage von unten eingeschoben. Die Entzündung des Isopropanols erfolgte durch eine offene Flamme. Die Anordnung der Holzkrippe, des Zündinitials sowie des Gitterrostes in der Brandkammer kann Abbildung 3-1 entnommen werden.

Die Brandversuche fanden am 1. und 4. Oktober 2021 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH statt. Die Randbedingungen zu den einzelnen Brandversuchen können der folgenden Tabelle 3-2 entnommen werden. Die Messdaten zu den Brandversuchen wurden über den Zeitraum der eigentlichen Prüfdauer von 22 Minuten hinaus bis ca. zur 30. Prüfminute erfasst. Die Holzkrippen wurden während der Messdatenaufnahme nicht abgelöscht.

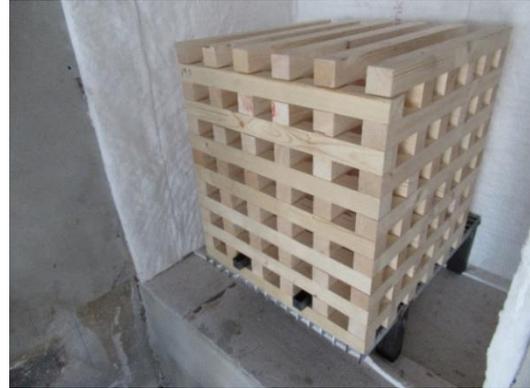


Abbildung 3-1: Gitterrost und Holzkrippe in der Brandkammer sowie Anordnung Zündinitial

Tabelle 3-2: Randbedingungen während der Medium-Exposure-Tests

Klimatische Randbedingungen						
Versuch	Temperatur [°C]		Relative Luftfeuchte [%]		Wind [km/h]	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen
V1_MS_Holz	11	11	71	77	1	18 (S)
V2_MS_Holz	18	18	51	51	1	18 (S)
V3_MS_Holz	16	16	80	87	0	0
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen						
Bauteil		Innenmaße [m]		Material		
Brandkammer	Grundfläche B x L	1,0 x 0,8		Porenbeton		
	Höhe H	1,0				
Lüftungsbedingungen	Zuluft B x H	3,0 x 2,0		-		
	Abluft B x L	1,0 x 2,3				
Prüfdauer						
22 Minuten						

Tabelle 3-3: Angaben zum Prüffeuer

Prüffeuer				
		V1_MS_Holz	V2_MS_Holz	V3_MS_Holz
Maße Krippe b x l x h_c	[m]	0,50 x 0,50 x 0,56	0,50 x 0,50 x 0,60	0,50 x 0,50 x 0,60
Maße Stab D x B x l	[m]	0,04 x 0,04 x 0,50		
Anzahl Stäbe*	[-]	84 + 0	84 + 4	84 + 3
Masse Holz	[kg]	30,47	30,23	30,42
Rohdichte Holz***	[kg/m ³]	453,42	429,40	437,07
Masse Nägel	[kg]	0,32	0,32	0,32
Holzfeuchte** MW (Min + Max)	[%]	8,82 (7,02 + 10,26)	8,4 (6,7 + 10,6)	10,3 (8,5 + 11,3)
Zündinitial	2 x Stahlwanne mit je ca. 200 ml Isopropanol			

* Die Anzahl der Stäbe ergibt sich aus den genagelten + den zusätzlich zur Prüfung aufgelegten Stäben.

** Die Holzfeuchten wurden mit einer GANN gemessen und auf die vorhandenen Rohdichten umgerechnet

*** Die Rohdichte des Holzes soll nach Festlegung der Steering Group (Stand Sept. 2021) 450 bis 500 kg betragen. Dies war bei Bestellung und Annahme des Holzes für diese Brandversuche noch nicht definiert.

Die NiCr-Ni-Mantelthermoelemente Typ K gemäß DIN EN 60584 [11] mit einem Durchmesser von 3 mm wurden in einem Raster von 0,25 m an der Rückwand, 0,5 m an der Eckwand und über die Höhe im Abstand von 0,5 m angeordnet. Die Anordnung der Brandkammer und der Thermoelemente sowie deren Bezeichnung am Prüfstand können Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 entnommen werden.



Abbildung 3-2: Anordnung der Thermoelemente beim Medium-Exposure-Test (Ansicht)

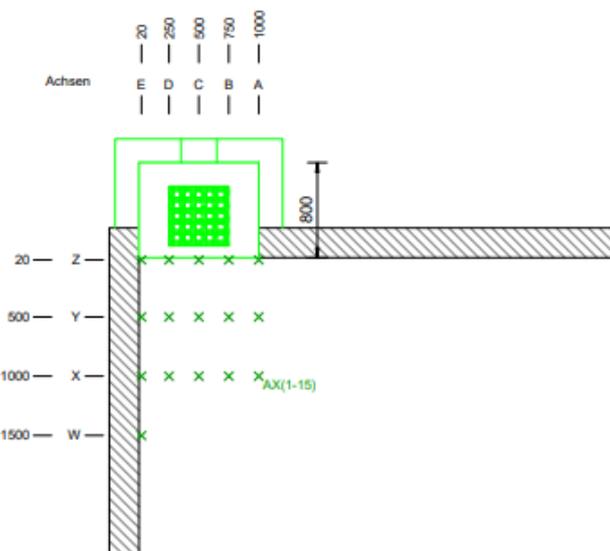


Abbildung 3-3: Anordnung der Thermoelemente beim Medium-Exposure-Test (Draufsicht)

3.2.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Versuchsergebnisse der Brandversuchsreihe V1 bis V3 vorgestellt. Eine ausführliche Vergleichsbetrachtung zwischen den Brandversuchsreihen erfolgt im Abschnitt 4.

In Abbildung 3-4 sind die zeitlichen Verläufe der Abbrandrate – gemessen mit der Wiegeeinrichtung – dargestellt.

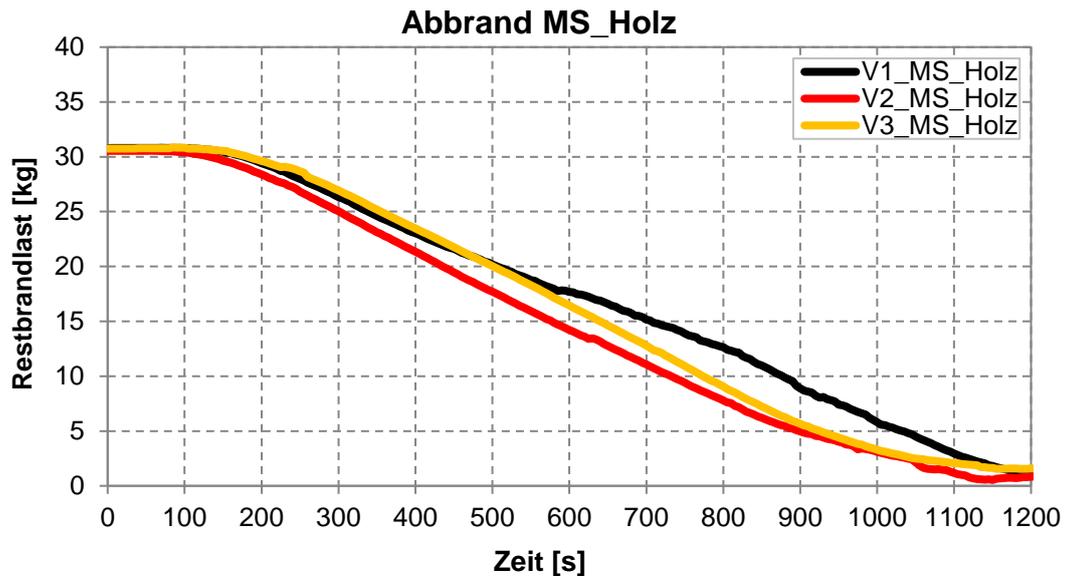


Abbildung 3-4: Gemessene Abbrandrate mit der Wiegeeinrichtung für die Brandversuche V1 bis V3

Der Verlauf der Abbrandrate zeigt zwischen den Brandversuchen V2 und V3 über die Zeit von 1.200 Sekunden eine gute Übereinstimmung. Der Brandversuch V1 folgt dem Verlauf der beiden anderen Brandversuche bis ca. zur 500. Sekunde, nimmt dann aber zunächst deutlich geringer ab und erreicht zur 1.200. Sekunde etwa die Restbrandlast der Brandversuche V2 und V3. Die drei Brandversuche wiesen zum Zeitpunkt der 1.200. Sekunde noch eine Restbrandlast von ca. 0,5 kg bis 1,5 kg auf. Bei den Brandversuchen war zu beobachten, dass die Holzrippen beginnend zwischen der 900. bis 1.050. Prüfsekunde hinsichtlich der Stabilität abnahmen, sowie erste Teile der Holzkrippe auf den Rand und den Boden der Brandkammer abgefallen sind. Im Zusammenhang mit der Messmethodik ergeben sich damit ab dem genannten Zeitpunkt höhere Unsicherheiten bei den erfassten Messdaten hinsichtlich der Abbrandrate und den daraus ermittelten Wärmefreisetzungsraten.

In Abbildung 3-5 sind die aus der Abbrandrate bestimmten Wärmefreisetzungsraten über einen zeitlichen Verlauf von 1.200 Sekunden dargestellt. Die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrates erfolgte über die Masseverlustmethode als Produkt aus dem zeitlichen Abbrand und einem angesetzten effektiven Heizwert von 15,73 MJ/kg gemäß DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand: 2021-11) [13]. Die Wärmefreisetzungsrates wurde dabei über ein

Intervall von 90 Sekunden gemittelt, um damit bei der Darstellung die Unsicherheit aus der Messmethodik zu reduzieren.

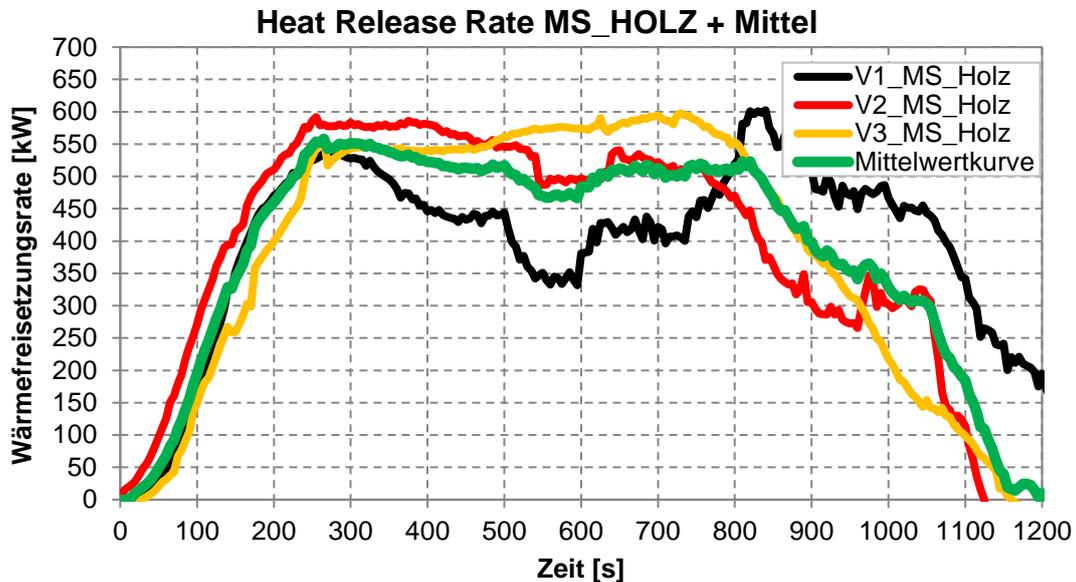


Abbildung 3-5: Ermittelte Wärmefreisetzungsrate aus der Abbrandrate für die Brandversuche V1 bis V3 gemittelt über ein Zeitintervall von 90 Sekunden

Grundsätzlich zeigen die Verläufe der Wärmefreisetzungsrate zwischen den Brandversuchen V2 und V3 eine gute Übereinstimmung. Die maximale Wärmefreisetzungsrate bei den beiden Brandversuchen ergibt sich in der Vollbrandphase mit ca. 600 kW und die mittlere Wärmefreisetzungsrate mit ca. 500 kW. Der Brandversuch V1 weicht gegenüber den Brandversuchen V2 und V3 beginnend ab der 500. Sekunde bereits deutlich ab und ist auf Messunsicherheiten aus dem Verlust der Krippenstabilität und dem Abfall erster Teile der Holzkrippe zurückzuführen.

In Tabelle 3-4 sind die Mittelwerttemperaturen der Brandversuche V1 bis V3 an der Oberfläche gemittelt über einen Zeitraum 300 Sekunden bis 900 Sekunden dargestellt.

Tabelle 3-4: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300. Sekunde bis 900. Sekunde
(Brandversuche V1 bis V3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	27,55	47,70	91,67	137,86	121,81	103,81	86,94	73,54
	7,20	25,40	46,40	91,85	147,25	137,91	107,58	93,74	76,09
	6,70	24,81	44,39	95,53	147,45	139,23	118,42	95,99	84,93
	6,20	23,32	37,03	102,21	176,62	159,19	141,09	111,10	90,71
	5,70	23,46	40,69	100,86	170,22	178,53	149,27	123,18	87,97
	5,20	23,85	34,54	104,15	217,32	203,91	158,06	136,32	100,08
	4,70	24,68	34,38	91,39	258,04	227,72	158,73	207,16	106,81
	4,20	25,96	34,77	102,75	258,68	276,18	255,26	183,64	119,74
	3,70	27,75	35,96	102,52	272,22	325,95	323,90	235,04	123,11
	3,20	29,26	38,22	92,85	376,35	401,88	418,08	291,65	136,79
	2,70	33,62	47,30	95,20	450,74	555,66	657,47	395,57	143,25
	2,20	35,53	48,55	95,20	546,00	695,78	830,51	558,65	159,97
	1,70	38,86	54,66	98,47	430,02	764,39	783,25	619,34	156,73
1,20	35,09	48,48	95,72	190,36	Brandkammer				
0,70	34,16	47,20	67,97	87,20					

Das Zeitintervall von der 300. bis 900. Sekunde ist dabei repräsentativ für die Vollbrandphase der Holzkippen, was auch aus den Flammenbildern zu den unterschiedlichen Zeitpunkten in Abbildung 3-6 deutlich wird.

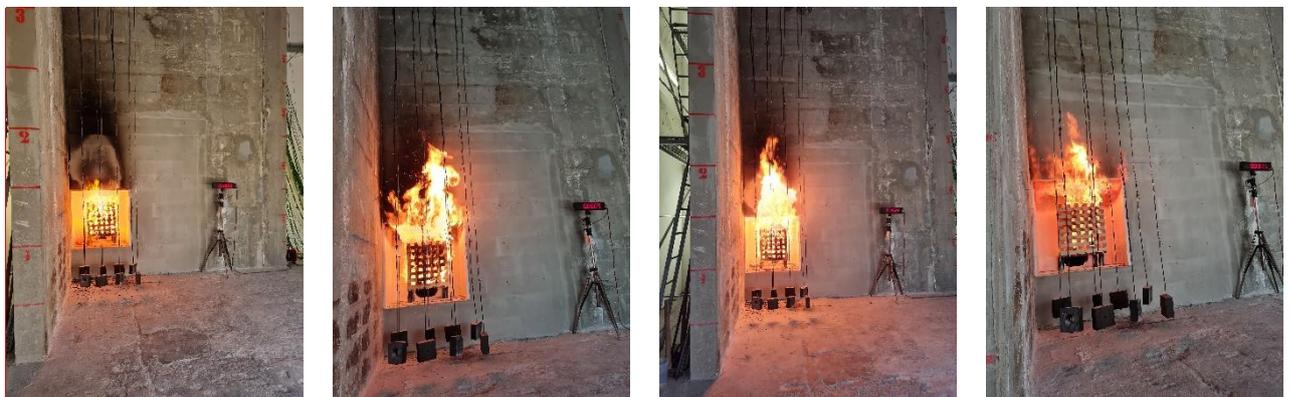


Abbildung 3-6: Exemplarische Brandbeanspruchung in der 3., 7., 16. und 18. Prüfminute

Die Darstellung in Tabelle 3-4 zeigt, dass sich die Flamme oberhalb der Brandkammer geringfügig in die Innenecke neigt. Die Flammenhöhen während der Vollbrandphase waren bei allen drei Brandversuchen mit ca. 1,5 m Höhe über der Brandkammeröffnung zu beobachten, was somit gut mit den dargestellten Mittelwerttemperaturen mittig oberhalb der Brandkammeröffnung während der Vollbrandphase des Prüffeuers übereinstimmt.

Bei den drei Brandversuchen war zu beobachten, dass sich die Flamme erst ab einer gewissen Höhe oberhalb der Brandkammer an die Rückwand des Prüfstandes angelehnt hat (vgl.

Abbildung 3-7). Dies wird auch durch den Vergleich der Mittelwerttemperaturen in Tabelle 3-4 zwischen den Höhenachsen 1,7 m mit ca. 783 °C und 2,2 m mit ca. 830 °C über dem Prüf-raumboden deutlich.



Abbildung 3-7: Exemplarische Darstellung der Flammenausbildung oberhalb der Brandkammern auf der Rückwand

3.3 Medium-Exposure-Test – DIN 4102-20 Gas (DE)

3.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der Versuch nach DIN 4102-20 [12] wurde im Wesentlichen entsprechend den normativen Vorgaben ausgeführt. Abweichend davon befand sich die Brandkammer jedoch in einer Höhe von 0,5 m über dem Prüfraumboden um eine bessere Vergleichbarkeit mit dem europäischen Medium-Exposure-Test zu erzielen. Zusätzlich wurde die Brandkammer mit 20 mm dicker Keramikwolle ausgekleidet.

Als Prüffeuer wurde der Gasbrenner nach DIN 4102-20 [12] eingesetzt und mit ca. 7,4 g/s Propangas und 24 m³/h Luft bei einem Überdruck von 4 bar betrieben. Zur Zündung wurde ein Bengalo verwendet.

Der Gasbrenner wurde in der Brandkammer mit einem Abstand von 30 mm zur Innenecke und 100 mm hinter der Vorderkante des Prüfstandes platziert. Die prinzipielle Anordnung des Prüffeuers in der Brandkammer ist Abbildung 3-8 dargestellt.



Abbildung 3-8: Anordnung des Brenners in der Brandkammer

Die NiCr-Ni-Mantelthermoelemente Typ K gemäß DIN EN 60584 [11] mit einem Durchmesser von 3 mm wurden in einem Raster von 0,25 m an der Rückwand, 0,5 m an der Eckwand und alle 0,5 m über die Höhe verteilt. Die Anordnung der Brandkammer und der Thermoelemente sowie deren Bezeichnung erfolgte äquivalent zur Darstellung in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 zum europäischen Medium-Exposure-Test mit der Holzkrippe.

Die drei Brandversuche fanden am 6. Oktober 2021 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH statt. Die Randbedingungen zu den einzelnen Versuchen können der folgenden Tabelle 3-5 entnommen werden.

Die Messdaten zu den Brandversuchen wurden über den Zeitraum der eigentlichen Prüfdauer von 20 Minuten hinaus bis ca. zur 30. Prüfminute erfasst.

Tabelle 3-5: Randbedingungen während der Brandversuche nach DIN 4102-20 [12]

Klimatische Randbedingungen						
Versuch	Temperatur [°C]		Relative Luftfeuchte [%]		Wind [km/h]	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen
V4_DIN_Gas	12	10	79	81	1	14 (SW)
V5_DIN_Gas	14	12	78	78	1	15 (SW)
V6_DIN_Gas	15	14	71	71	1	22 (SW)
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen						
Bauteil		Innenmaße [m]	Material			
Brandkammer	Grundfläche B x L	1,0 x 0,8	Porenbeton			
	Höhe H	1,0				
Lüftungsbedingungen	Zuluft B x H	3,0 x 2,0	-			
	Abluft B x L	1,0 x 2,3				
Prüffeuer						
	Massestrom Propangas [g/s]	Volumenstrom Luft [m³/h]	Überdruck [bar]	Zündinitial		
Propangasbrenner	7,4	24	4	1 x Bengalo		
Prüfdauer						
20 Minuten						

3.3.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Versuchsergebnisse der Brandversuchsreihe V4 bis V6 vorgestellt. Eine ausführliche Vergleichsbetrachtung zwischen den Brandversuchsreihen erfolgt im Abschnitt 4.

In Abbildung 3-8 ist die ermittelte Wärmefreisetzungsrate aus dem vorgebenden Gasdurchsatz mit 7,4 g/s und einem zugrunde gelegten effektiven Heizwert für Propan von 48,65 MJ/kg [14] dargestellt. Die Wärmefreisetzungsrate ist über die definierte Prüfzeit von 1.200 Sekunden näherungsweise als konstant angesetzt. Die mittlere und damit gleichzeitig auch maximale Wärmefreisetzungsrate ergibt sich somit zu ca. 360 kW.

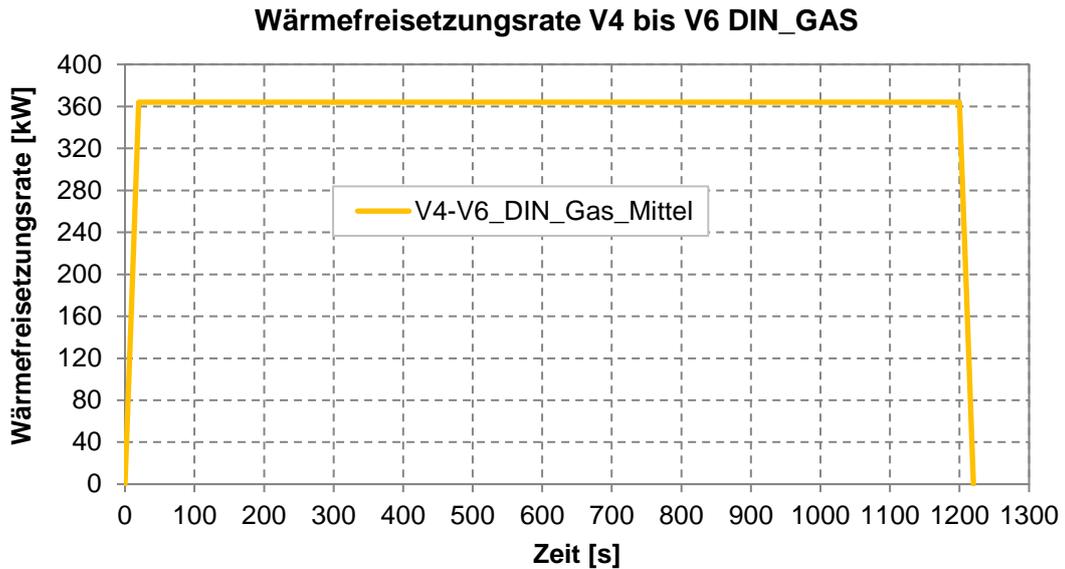


Abbildung 3-9: Ermittelte Wärmefreisetzungsrate aus dem vorgegebenen Gasdurchsatz für den Gasbrenner

In Tabelle 3-6 sind die Mittelwerttemperaturen der Brandversuche V4 bis V6 an der Oberfläche gemittelt über einen Zeitraum bis zur 1.200. Sekunde dargestellt.

Tabelle 3-6: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 0 s–1200 s (Brandversuche V4 bis V6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	23,69	40,52	74,50	111,96	98,90	85,08	71,56	60,33
	7,20	21,98	39,22	75,01	118,39	110,68	88,81	77,12	61,90
	6,70	21,57	37,20	77,57	117,39	112,36	98,08	79,50	68,33
	6,20	20,80	31,75	82,14	138,89	128,22	116,41	91,89	72,63
	5,70	21,28	32,61	81,54	132,55	143,42	124,60	101,42	70,68
	5,20	22,27	28,62	83,17	165,45	163,63	129,78	112,60	79,48
	4,70	23,58	28,65	73,90	192,13	183,58	131,21	173,24	84,84
	4,20	25,29	29,77	79,05	190,75	222,28	216,86	151,95	94,29
	3,70	27,45	32,76	75,88	199,59	265,73	280,87	195,25	96,87
	3,20	30,22	38,21	73,40	275,94	339,53	368,97	245,31	104,98
	2,70	35,81	52,21	85,70	340,07	508,88	601,62	331,23	113,51
	2,20	38,28	52,76	100,23	475,96	653,55	765,64	492,25	135,34
	1,70	41,63	59,91	121,11	663,87	874,75	851,88	603,89	135,07
	1,20	37,13	51,19	102,29	184,49	Brandkammer			
0,70	35,86	47,13	60,37	54,05					

Das Zeitintervall bis zur 1.200. Sekunde ist dabei repräsentativ für die Vollbrandphase des Gasbrenners, was auch aus den Flammenbildern zu den unterschiedlichen Zeitpunkten in Abbildung 3-10 deutlich wird.



Abbildung 3-10: Brandbeanspruchung in der 1., 6., 15. und 20. Prüfminute

Die Darstellung in Tabelle 3-6 zeigt, dass sich die Flamme oberhalb der Brandkammer geringfügig in die Innenecke neigt. Die Flammenhöhen während der Vollbrandphase waren bei allen drei Brandversuchen mit ca. 1,5 m Höhe über der Brandkammeröffnung zu beobachten.

Bei den drei Brandversuchen war zu beobachten, dass sich die Flamme unmittelbar oberhalb der Brandkammer an die Rückwand des Prüfstandes angelehnt hat (vgl. Abbildung 3-7). Dies wird auch durch den Vergleich der Mittelwerttemperaturen in Tabelle 3-6 zwischen den Höhenachsen 1,7 m mit ca. 851 °C und 2,2 m mit ca. 765 °C über dem Prüfraumboden deutlich.



Abbildung 3-11: Exemplarische Darstellung der Flammenausbildung oberhalb der Brandkammern auf der Rückwand

3.4 Large-Exposure-Test – Holz (EU)

3.4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Der europäische Large-Exposure-Test musste aufgrund der örtlichen Gegebenheiten im Aufbau etwas vom bisherigen Planungsstand des Prüfverfahrens abweichen. Insbesondere musste die Brandkammer in den Abmessungen reduziert werden. Während die Brandkammer im europäischen Large-Exposure-Test nach [20] mit einer Breite von 2,40 m, einer Tiefe von 1,30 m und einer Höhe von 2,20 m vorgesehen ist, wurden die Brandversuche im Forschungsvorhaben aufgrund der örtlichen Gegebenheiten mit einer Brandkammer mit den Abmessungen 2,4 m x 1,15 m x 2,15 m ausgeführt. Somit rückt das Prüffeuer geringfügig um 15 cm näher an die Brandkammeröffnung gegenüber den Vorgaben nach [20], wodurch eine moderate Erhöhung der thermischen Beanspruchung der Prüfwand demgegenüber möglich ist.

Die Brandkammeröffnung war 2,0 m hoch und 2,0 m breit und war mittig auf Höhe des Brandkammerbodens ausgerichtet. Auf diese Weise bildeten sich an den Seiten 200 mm dicke und 200 mm breite Mauerwerksvorsprünge sowie an der Decke ein 200 mm dicker und 150 mm hoher Sturz. Entsprechend dem derzeitigen Planungsstand soll der Sturz eine Höhe von 200 mm und eine Dicke von 150 mm aufweisen. Die Mauervorsprünge sind ebenfalls mit einer Breite von 200 mm und einer Dicke von 150 mm geplant. Die Auskleidung der Brandkammer erfolgte mit 50 mm dicker Keramikwolle an den Umfassungswänden und 20 mm dicker Keramikwolle an der Decke entsprechend dem Stand nach [20] und reduzierten entsprechend des genannten Innenmaßes der Brandkammer.

Die Brandkammer wurde so in der Rückwand angeordnet, dass die Öffnung einen Abstand von 500 mm zum Prüfraumboden und 250 mm zur Innenecke besaß. Auf die Anordnung einer zusätzlichen Aussparung als simulierte Fensteröffnung im Prüfstand gemäß [3] wurde verzichtet, da ein Einfluss auf die Prüfergebnisse ohne appliziertes Außenwandbekleidungs-system nicht zu erwarten ist. Im Weiteren erhöht der Verzicht auf die Aussparung die Vergleichbarkeit der Brandversuchsreihen untereinander.

Als Prüffeuer wurde eine ca. 350 kg schwere Holzkrippe aus Fichtenholz eingesetzt. Die exakten Angaben zum Prüffeuer zu den einzelnen Brandversuchen sind der Tabelle 3-8 zu entnehmen. Die Holzkrippe bestand aus Holzstäben mit den Abmessungen 47 mm x 47 mm x 1500 mm in Brandkammerquerrichtung bzw. 47 mm x 47 mm x 1000 mm in der Brandkammertiefe und wurde zu einem Quader mit einer Grundfläche von 1500 mm x 1000 mm zusammengenagelt. Das Verhältnis von Holz zu Luft betrug ca. 1/1. Je Stab wurden vier Nägel verwendet. Es wurde je ein Nagel an den Enden und 2 Nägel gleichmäßig über die Länge verteilt angeordnet.

Der Holzkrippe wurde mittig in der Brandkammer mit einem Abstand von 100 mm zur Rückseite der Brandkammer platziert. Den Boden der Brandkammer bildete die Wiegeeinrichtung zur Bestimmung der Abbrandrate der Holzkrippe. Auf der Wiegeeinrichtung wurden 6 Porenbetonsteine und 12 Kalksandsteine aufgestellt. Darauf wurden zwei 20 mm dicke Kalziumsilikatplatten aufgelegt, auf welche die Holzkrippe aufgestellt wurde. Die Positionierung der Holzkrippe in der Brandkammer sowie die Anordnung des Zündinitials kann Abbildung 3-12 entnommen werden.



Abbildung 3-12: Anordnung der Holzkrippe in der Brandkammer beim Large-Exposure-Test (links) sowie Holzweichfaserplattenstreifen als Zündinitial (rechts)

Als Zündinitial wurden 16 Streifen Holzweichfaserplatte (MDF-Platte) in Terpentinersatz getränkt und anschließend 14 Streifen jeweils in die Zwischenräume der zweiten unteren Lage der Holzkrippe eingeschoben. Die übrigen beiden Streifen wurden oberhalb auf die in die Holzkrippe eingeschobenen 14 Streifen gelegt. Die Zündung der Holzkrippe erfolgte durch Entzündung der beiden querliegenden Holzweichfaserplattenstreifen mittels einer offenen Flamme.

Die NiCr-Ni-Mantelthermoelemente Typ K gemäß DIN EN 60584 [11] mit einem Durchmesser von 3 mm wurden in einem Raster von 0,5 m an der Rückwand, 0,5 m an der Eckwand und alle 0,5 m über die Höhe verteilt. Die Anordnung der Brandkammer und der Thermoelemente sowie deren Bezeichnung können der folgenden Abbildung 3-13 und Abbildung 3-14 entnommen werden.

Die Messdaten zu den Brandversuchen wurden über den Zeitraum der eigentlichen angenommenen Prüfdauer von 30 Minuten hinaus bis ca. zur 60. Prüfminute erfasst. Die Holzkrippen wurden während der Messdatenaufnahme nicht abgelöscht.

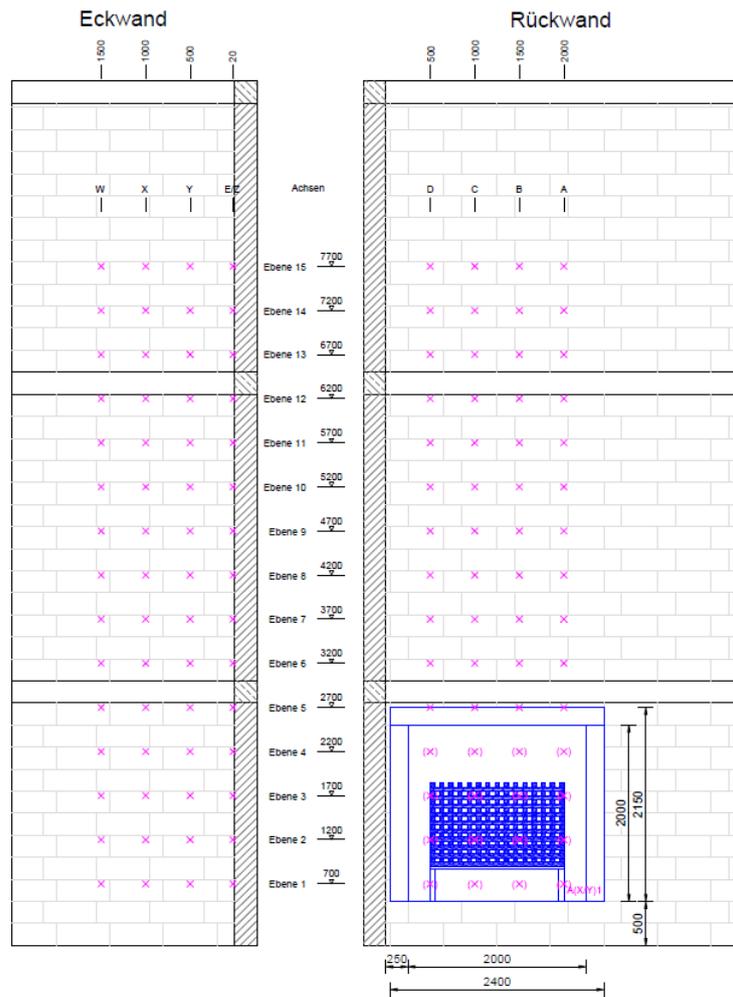


Abbildung 3-13: Anordnung der Thermoelemente beim Large-Exposure-Test (Ansicht)

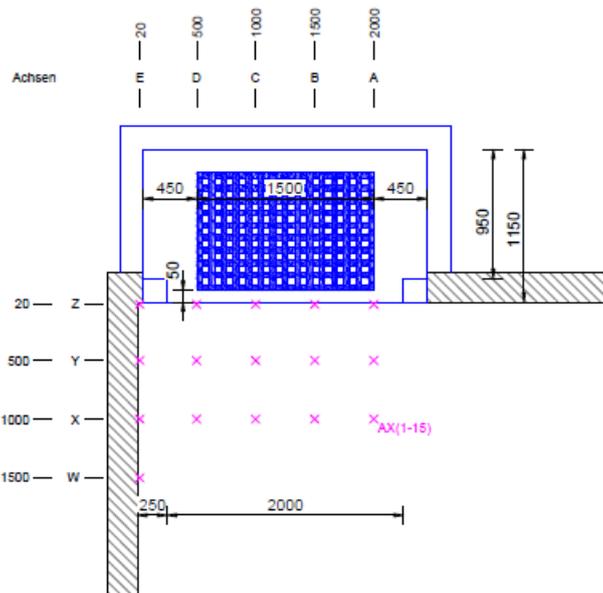


Abbildung 3-14: Anordnung der Thermoelemente beim Large-Exposure-Test (Horizontalschnitt mittig Brandkammer)

Die Brandversuche fanden am 20., am 21. und 25. Oktober 2021 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH statt. Die Randbedingungen zu den einzelnen Brandversuchen können der folgenden Tabelle 3-7 entnommen werden.

Tabelle 3-7: Randbedingungen während der Large-Exposure-Test

Klimatische Randbedingungen						
Versuch	Temperatur [°C]		Relative Luftfeuchte [%]		Wind [km/h]	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen
V7_LS_Holz	18	19	58	59	1	25-28 (SW)
V8_LS_Holz	14	14	63	63	1,4 – 3,9	46, Böen 88 (SW)
V9_LS_Holz	8	7	75	78	0,7	11, Böen 24 (SW)
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen						
Bauteil		Innenmaße [m]		Material		
Brandkammer	Grundfläche B x L	2,4 x 1,15		Porenbeton		
	Höhe H	2,15				
	Öffnung B x H	2,0 x 2,0		–		
Lüftungsbedingungen	Zuluft B x H	3,0 x 2,0		–		
	Abluft B x L	1,0 x 2,3*				
Prüfdauer						
Noch unbekannt: Annahme 30 Minuten						

* Bei den Versuchen 8 und 9 wurden jeweils zwei Schlotte geöffnet, wodurch sich die Ablufffläche verdoppelt.

Tabelle 3-8: Angaben zum Prüffeuer

Prüffeuer					
		V7_LS_Holz	V8_LS_Holz	V9_LS_Holz	
Maße Krippe b x l x h _c	[m]	1,50 x 1,00 x 1,08	1,50 x 1,00 x 1,13	1,50 x 1,00 x 1,08	
Maße Stab D x B x l	[m]	0,047 x 0,047 x 1,5 und 0,047 x 0,047 x 1,0			
Anzahl Stäbe*	[-]	165 + 0 (Länge 1,0 m) 120 + 0 (Länge 1,5 m)	180 + 0 (Länge 1,0 m) 120 + 0 (Länge 1,5 m)	165 + 0 (Länge 1,0 m) 120 + 0 (Länge 1,5 m)	
Masse Holz	[kg]	338,7	353,1	348,9	
Rohdichte Holz	[kg/m ³]	444,43	444,02	457,81	
Masse Nägel	[kg]	2,66	2,80	2,66	
Holzfeuchte ** MW (Min + Max)	[%]	10,53 (8,5 + 11,4)	10,53 (8,82 + 11,8)	10,22 (8,13 + 11,17)	
Zündinitial	16 x MDF-Streifen in Terpentinersatz getränkt				

* Die Anzahl der Stäbe ergibt sich aus den genagelten + den zusätzlich zur Prüfung aufgelegten Stäben.

** Die Holzfeuchten wurden mit einer GANN gemessen und auf die vorhandenen Rohdichten umgerechnet.

3.4.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Versuchsergebnisse der Brandversuchsreihe V7 bis V9 vorgestellt. Eine ausführliche Vergleichsbetrachtung zwischen den Brandversuchsreihen erfolgt im Abschnitt 4.

In Abbildung 3-15 sind die Verläufe der Abbrandrate über die Zeit – gemessen mit der Wiegeeinrichtung – dargestellt.

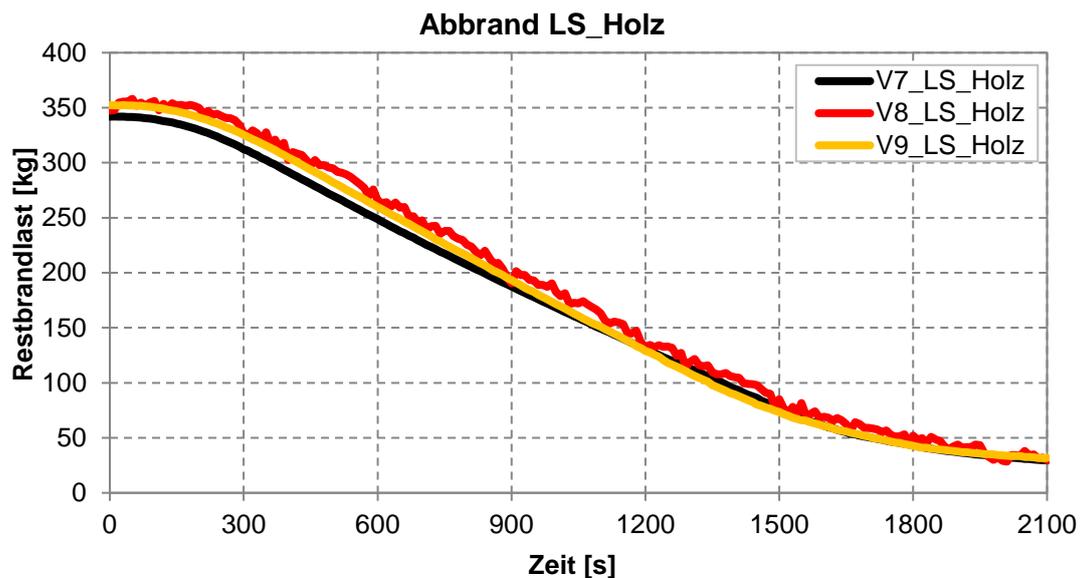


Abbildung 3-15: Gemessene Abbrandraten mit der Wiegeeinrichtung für die Brandversuche V7 bis V9

Der Verlauf der Abbrandraten zeigt zwischen den Brandversuchen V7 und V9 über die Zeit von 1.800 Sekunden eine gute Übereinstimmung. Während des Brandversuchs V8 herrschten außen starke Windböen, welche sich durch den zum Teil nicht monotonen Kurvenverlauf widerspiegeln. Die drei Brandversuche wiesen zum Zeitpunkt der 1.500. Sekunde noch eine Restbrandlast von ca. $75 \text{ kg} \pm 1,5 \text{ kg}$ auf. Bei den Brandversuchen war zu beobachten, dass in Abhängigkeit des Brandversuchs beginnend, zwischen der 960. und der 1.080. Prüfsekunde die Stabilität der Holzkippen abnahmen, sowie erste Teile der Holzkippe auf den Rand und dem Boden der Brandkammer abgefallen waren. Im Zusammenhang mit der Messmethodik ergeben sich daraus ab dem genannten Zeitpunkt höhere Unsicherheiten bei den erfassten Messdaten.

In Abbildung 3-5 sind die aus der Abbrandrate bestimmten Wärmefreisetzungsraten über einen zeitlichen Verlauf von 2.100 Sekunden dargestellt. Die Ermittlung der Wärmefreisetzungsraten erfolgt über die Masseverlustmethode als Produkt aus dem zeitlichen Abbrand und einem angesetzten effektiven Heizwert von $15,73 \text{ MJ/kg}$ gemäß DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand: 2021-11) [13]. Die Wärmefreisetzungsraten sind dabei über ein Intervall von 180 Sekunden gemittelt um damit die Unsicherheiten aus der Messmethodik,

insbesondere zur Krippenstabilität und zum Brandversuch V8 mit vorherrschenden starken Windböen, zu reduzieren.

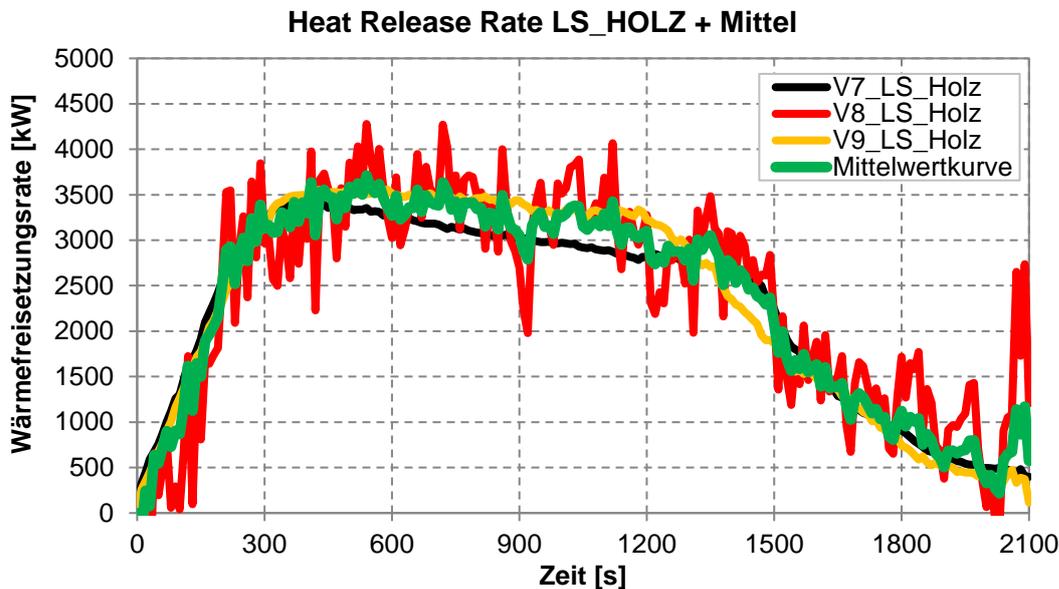


Abbildung 3-16: Ermittelte Wärmefreisetzungsrate aus der Abbrandrate für die Brandversuche V7 bis V9 gemittelt über ein Zeitintervall von 180 Sekunden

Qualitativ zeigen die Verläufe der Wärmefreisetzungsraten zwischen den Brandversuchen V7 bis V9 eine gute Übereinstimmung. Die maximale Wärmefreisetzungsrate bei den Brandversuchen V7 und V9 ergibt sich in der Vollbrandphase von der 300. bis 1.200 Prüfsekunde mit ca. 3.500 kW und die mittlere Wärmefreisetzungsrate mit ca. 3.250 kW. Der Brandversuch V8 weicht hinsichtlich der Wärmefreisetzungsrate gegenüber den Brandversuchen V7 und V9 trotz der Mittelwertbildung deutlich ab.

In Tabelle 3-10 bis Tabelle 3-11 sind die Mittelwerttemperaturen der Brandversuche V7 bis V9 auf der Oberfläche und in den Ebenen Y sowie X dargestellt. Nach Auswertung der Temperaturmessdaten wird für den maßgebenden thermischen Beanspruchungszeitraum bei den Brandversuchen der Zeitraum von der 300. Sekunde bis zur 1.500. Sekunde bestimmt. Der Zeitraum weicht dabei vom Verlauf der Vollbrandphase auf Grundlage der ermittelten Wärmefreisetzungsrate ab, bei welcher die Abklingphase bereits zwischen der 1.200. und 1.500. Sekunde erreicht wird. Der Ansatz wird im Weiteren auch durch die repräsentative Bilderdokumentation bzgl. der Flammenbilder zu unterschiedlichen Zeiträumen in Abbildung 3-17 deutlich.

In der X-Ebene sind während des ersten Large-Exposure-Test V7 eine sehr hohe Anzahl an Thermoelementen ausgefallen. Aus diesem Grund können für die X-Ebene keine Mittelwerte über alle drei Versuche gebildet werden. Exemplarisch werden die Mittelwerte des

Brandversuchs V7 dargestellt. Die Messwerte der Messstellen, die in der X-Ebene nach Auskunft der MFPA Leipzig defekt waren, sind rot markiert.

Tabelle 3-9: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Brandversuche V7 bis V9)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]								
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00	
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	92,83	125,02	179,96	205,52	236,77	377,48	360,07	253,44	
	7,20	90,10	123,10	178,63	209,18	296,91	361,89	400,31	270,95	
	6,70	84,42	118,16	184,75	204,33	316,55	485,77	484,97	294,82	
	6,20	83,70	124,28	191,60	230,88	331,76	557,16	552,54	317,30	
	5,70	86,30	122,48	200,89	244,06	357,37	600,47	624,87	330,87	
	5,20	89,93	132,29	212,18	259,46	391,15	696,46	697,19	357,93	
	4,70	103,42	141,47	235,60	277,78	379,87	743,44	709,11	379,44	
	4,20	104,43	131,40	236,01	277,51	461,73	862,89	858,32	415,37	
	3,70	95,76	129,78	231,67	246,11	496,09	908,53	918,35	438,56	
	3,20	85,66	130,17	208,67	224,71	509,99	898,32	905,75	477,18	
	2,70	88,75	144,18	159,56	151,20	430,97	713,66	693,10	405,53	
	2,20	90,75	106,88	136,49	89,61	Brandkammer				
	1,70	82,08	106,50	138,36	73,28					
	1,20	70,42	77,15	113,58	65,63					
	0,70	65,91	75,71	84,19	56,91					

Tabelle 3-10: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Brandversuche V7 bis V9)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				179,96	180,96	256,40	238,10	208,37
	7,20				178,63	227,26	284,97	252,75	199,12
	6,70				184,75	224,78	313,70	267,78	213,98
	6,20				191,60	244,42	328,63	376,86	239,69
	5,70				200,89	287,54	337,46	426,12	296,29
	5,20				212,18	277,37	398,92	479,01	321,99
	4,70				235,60	238,49	438,98	470,65	302,70
	4,20				236,01	353,25	370,97	539,16	322,39
	3,70				231,67	329,69	404,44	459,97	310,31
	3,20				208,67	244,96	443,26	456,81	308,92
	2,70				159,56	204,59	332,09	350,89	217,30
	2,20				136,49	214,12	180,72	173,34	93,70
	1,70				138,36	80,61	143,32	112,51	123,86
	1,20				113,58	68,14	89,99	132,58	176,16
	0,70				84,19	56,38	62,17	81,87	96,53

Im Vergleich zwischen den Mittelwerttemperaturen auf der Oberfläche der Prüfwand in der Z-Ebene zu den Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene wird deutlich, dass das Erscheinungsbild

der Flamme nahe der Prüfwand lag. Lediglich auf einer Höhe von 4,2 m wurden Mittelwerttemperaturen über 500 °C festgestellt, die ein kontinuierliches Flammenbild in der Höhe und der Ebene annehmen lassen (vgl. exemplarisch auch Abbildung 3-18). Im Bereich der X-Ebene in einem Abstand von 1 m vor der Prüfwand sind sämtliche Temperaturmesswerte unter 300 °C sowie überwiegend sogar unter 200 °C erfasst worden, sodass diese Messebene für die Auswertung der resultierenden thermischen Beanspruchung der Prüfwand im Weiteren unwesentlich ist.

Tabelle 3-11: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Brandversuch V7)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				145,71	136,44	209,74	175,98	170,90
	7,20				136,17	163,45	181,23	164,88	170,01
	6,70				123,22	144,38	176,56	158,38	125,49
	6,20				125,98	193,12	150,52	151,33	114,16
	5,70				121,37	227,62	179,89	164,77	130,77
	5,20				134,12	229,38	147,00	177,25	128,07
	4,70				145,85	198,42	212,00	126,03	166,68
	4,20				134,07	263,78	289,18	148,64	189,24
	3,70				140,23	273,62	248,26	248,58	155,69
	3,20				146,09	201,71	290,52	205,96	195,82
	2,70				162,01	187,74	142,54	232,23	134,07
	2,20				120,15	186,98	143,77	280,20	153,82
	1,70				118,79	158,42	144,00	198,26	118,03
	1,20				84,53	73,81	188,58	171,27	126,48
0,70				84,31	96,67	190,67	138,17	142,04	

Die Darstellung in Tabelle 3-9 zeigt, dass sich die Flamme oberhalb der Brandkammer nicht in die Innenecke neigt, sondern sich vielmehr glockenförmig ausbildet (vgl. exemplarisch auch Abbildung 3-17). Die kontinuierlichen Flammenhöhen während der Vollbrandphase waren bei allen drei Brandversuchen mit ca. 4,0 m Höhe über der Brandkammeröffnung zu beobachten, was somit in guter Übereinstimmung mit den dargestellten Mittelwerttemperaturen oberhalb der Brandkammeröffnung steht.



Abbildung 3-17: Brandbeanspruchung in der 3., 6., 16. und 22. Prüfminute

Bei den drei Brandversuchen war zu beobachten, dass sich die Flamme unmittelbar oberhalb der Brandkammer an die Rückwand des Prüfstandes anlehnte (vgl. Abbildung 3-18). Dies wird auch durch den Vergleich der Mittelwerttemperaturen in zwischen den Höhenachsen 2,7 m mit ca. 713 °C und 3,2 m mit ca. 905 °C über dem Prüfraumboden deutlich.



Abbildung 3-18: Exemplarische Darstellung der Flammenausbildung oberhalb der Brandkammern auf der Rückwand

3.5 Large-Exposure-Test - Sockelbrandprüfung (DE)

3.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Sockelbrandprüfung wurde auf Grundlage der DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand 2021-11) [13] durchgeführt. Um die Wiegeeinrichtung zur Bestimmung der Abbrandrate zu ergänzen, wurde die Holzkippe inklusive des Gitterrostwagens um 250 mm erhöht vor dem Prüfstand aufgestellt. Eine Brandkammer ist entsprechend Versuchsordnung nicht vorhanden.

Als Prüffeuer wurde eine ca. 200 kg \pm 1 kg schwere Holzkippe aus Fichtenholz eingesetzt. Die Holzkippe aus Holzstäben mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 1100 mm wurde zu einem Quader mit einer Grundfläche von 1100 mm x 1100 mm zusammengenagelt. Das Verhältnis von Holz zu Luft betrug ca. 1/1. Je Stab wurden sieben Nägel verwendet. Es wurde je ein Nagel an den Enden und fünf Nägel gleichmäßig über die Länge verteilt angeordnet. Weitere Angaben zur Holzkippe sind der Tabelle 3-13 zu entnehmen.

Der Holzkippe wurde mittig auf einem 200 mm hohen Gitterrostwagen mit einem Abstand von 100 mm zum Prüfstand in der Innenecke platziert. Eine exemplarische Darstellung der Holzkippe, des Gitterrostwagens sowie der Wiegeeinrichtung kann Abbildung 3-19 entnommen werden. Als Zündinitial wurden vier Blechwannen mit je 400 ml Isopropanol gefüllt und in die zweite Lage von unten eingeschoben. Die Entzündung des Isopropanols erfolgte durch eine offene Flamme.



Abbildung 3-19: Aufbau Wiegeeinrichtung (links) und Anordnung Zündinitial (rechts) Wiegeeinrichtung für das Prüffeuer bei den Brandversuche V10 bis V12

Die NiCr-Ni-Mantelthermoelemente Typ K gemäß DIN EN 60584 [11] mit einem Durchmesser von 3 mm wurden in einem Raster von 0,5 m an der Rückwand, 0,5 m an der Eckwand und aller 0,5 m über die Höhe verteilt. Die Anordnung der Holzkippe und der Thermoelemente sowie deren Bezeichnungen können Abbildung 3-20 und Abbildung 3-21 entnommen werden.

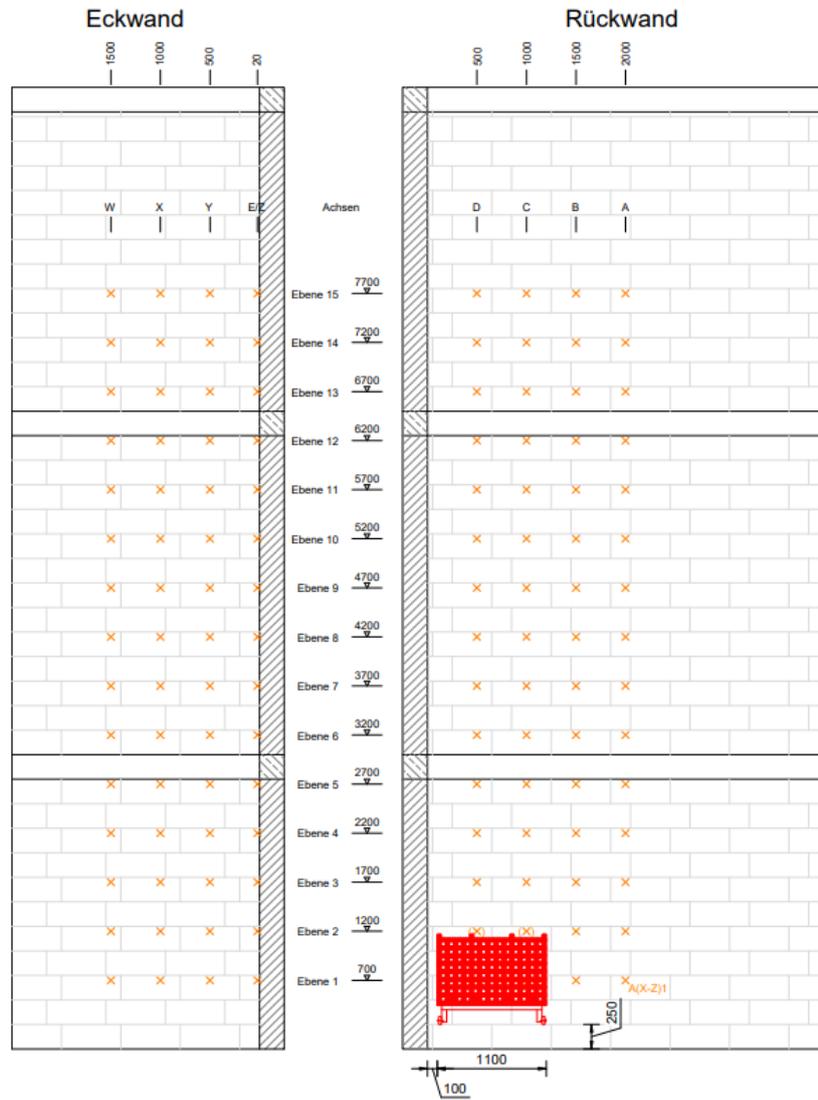


Abbildung 3-20: Anordnung der Thermoelemente beim Sockelbrandversuch (Ansicht)

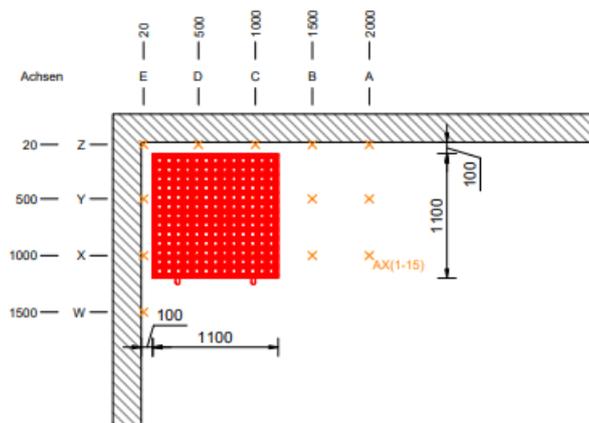


Abbildung 3-21: Anordnung der Thermoelemente beim Sockelbrandversuch (Horizontalschnitt mittig Holzkippe)

Die Brandversuche fanden am 1., 3. und 5. November 2021 in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH statt. Die Randbedingungen zu den einzelnen Versuchen können der folgenden Tabelle 3-12 entnommen werden. Bei den Brandversuchen V10 und V11 wurden auf Wunsch der Prüfstelle jeweils zwei Abluftschlote mit den Abmessungen 1,0 m x 2,3 m geöffnet. Im Versuch V12 hingegen wurde die Abluftfläche auf die üblicherweise verwendete eine Abluftöffnung reduziert.

Die Messdaten zu den Brandversuchen wurden über den Zeitraum der eigentlichen Prüfdauer von 25 Minuten hinaus bis ca. zur 60. Prüfminute erfasst. Die Holzkippen wurden während der Messdatenaufnahme nicht abgelöscht.

Tabelle 3-12: Randbedingungen während der Sockelbrandversuche

Klimatische Randbedingungen						
Versuch	Temperatur [°C]		Relative Luftfeuchte [%]		Wind [km/h]	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Innen	Außen
V10_SB_Holz	13	12	79	82	0,4	16 (SW)
V11_SB_Holz	10	9	72	74	2	6 (SW)
V12_SB_Holz	10	8	89	93	1	13 (SW)
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen						
Bauteil		Innenmaße [m]	Material			
Lüftungsbedingungen	Zuluft B x H	3,0 x 2,0	-			
	Abluft B x L	1,0 x 2,3*				
Prüfdauer						
25 Minuten						

* Bei den Brandversuchen V10 und V11 wurden jeweils zwei Schlote geöffnet, wodurch sich die Abluftfläche verdoppelt.

Tabelle 3-13: Angaben zum Prüffeuere

		Prüffeuere		
		V10_SB_Holz	V11_SB_Holz	V12_SB_Holz
Maße Krippe b x l x h _c	[m]	1,10 x 1,10 x 0,76	1,10 x 1,10 x 0,76	1,10 x 1,10 x 0,76
Maße Stab D x B x l	[m]	0,04 x 0,04 x 1,10		
Anzahl Stäbe*	[-]	236 + 21	260 + 5	245 + 16
Masse Holz	[kg]	199,5	199,5	200,2
Rohdichte Holz	[kg/m ³]	441,06	427,74	435,82
Masse Nägel	[kg]	3,85	4,24	4,00
Holzfeuchte** MW (Min + Max)	[%]	10,16 (9,34 + 11,25)	10,57 (9,63 + 11,41)	11,29 (10,9 + 11,75)
Zündinitial		4 x Stahlwanne mit je ca. 400 ml Isopropanol		

* Die Anzahl der Stäbe ergibt sich aus den genagelten + den zusätzlich zur Prüfung aufgelegten Stäben.

** Die Holzfeuchten wurden mit einer GANN gemessen und auf die vorhandenen Rohdichten umgerechnet.

3.5.2 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die wesentlichen Versuchsergebnisse der Brandversuchsreihe V10 bis V12 vorgestellt. Eine ausführliche Vergleichsbetrachtung zwischen den Brandversuchsreihen erfolgt im Abschnitt 4.

In Abbildung 3-22 sind die Verläufe der Abbrandrate über die Zeit – gemessen mit der Wiegeeinrichtung – dargestellt.

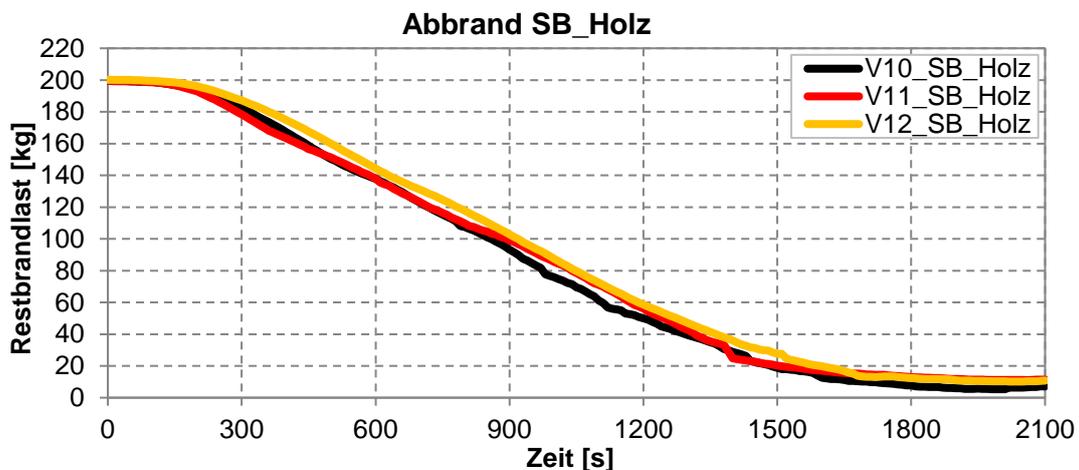


Abbildung 3-22: Gemessene Abbrandraten mit der Wiegeeinrichtung für die Brandversuche V10 bis V12

Der Verlauf der Abbrandraten zeigt zwischen den Brandversuchen V10 bis V12 über die Zeit von 1.800 Sekunden eine gute Übereinstimmung. Die drei Brandversuche wiesen alle zum Zeitpunkt der 1.500. Sekunde noch eine Restbrandlast von ca. 23 kg \pm 4 kg auf. Bei den Brandversuchen war zu beobachten, dass die Stabilität der Holzkrippen zwischen der 1.080 und der 1.300. Prüfsekunde abnahm, sowie erste Teile der Holzkrippe auf den Rand und den Prüfraumboden abgefallen sind. Im Zusammenhang mit der Messmethodik ergeben sich daraus ab dem genannten Zeitpunkt höhere Unsicherheiten bei den erfassten Messdaten.

In Abbildung 3-23 sind die aus den Abbrandraten bestimmten Wärmefreisetzungsrate über einen zeitlichen Verlauf von 2.100 Sekunden dargestellt. Die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate erfolgt über die Masseverlustmethode als Produkt aus dem zeitlichen Abbrand und einem angesetzten effektiven Heizwert von 15,73 MJ/kg gemäß DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand: 2021-11) [13]. Die Wärmefreisetzungsrate wird dabei über ein Intervall von 120 Sekunden gemittelt um damit die Unsicherheiten aus der Messmethodik, insbesondere zur Krippenstabilität, zu reduzieren.

Grundsätzlich zeigen die Verläufe der Wärmefreisetzungsrate zwischen den Brandversuchen V10 bis V12 eine gute Übereinstimmung. Die maximale Wärmefreisetzungsrate bei den Brandversuchen V10 bis V12 ergibt sich in der Vollbrandphase von der 300. Bis 1.200 Prüfsekunde mit ca. 2.500 kW und die mittlere Wärmefreisetzungsrate mit ca. 2.250 kW. Auf Grundlage der Wärmefreisetzungsrate beginnt die Vollbrandphase der Holzkrippe ab ca. der 300. Sekunde. Der Beginn der Abklingphase liegt in Abhängigkeit des Brandversuchs zwischen der 1.050. bis 1.350. Sekunde.

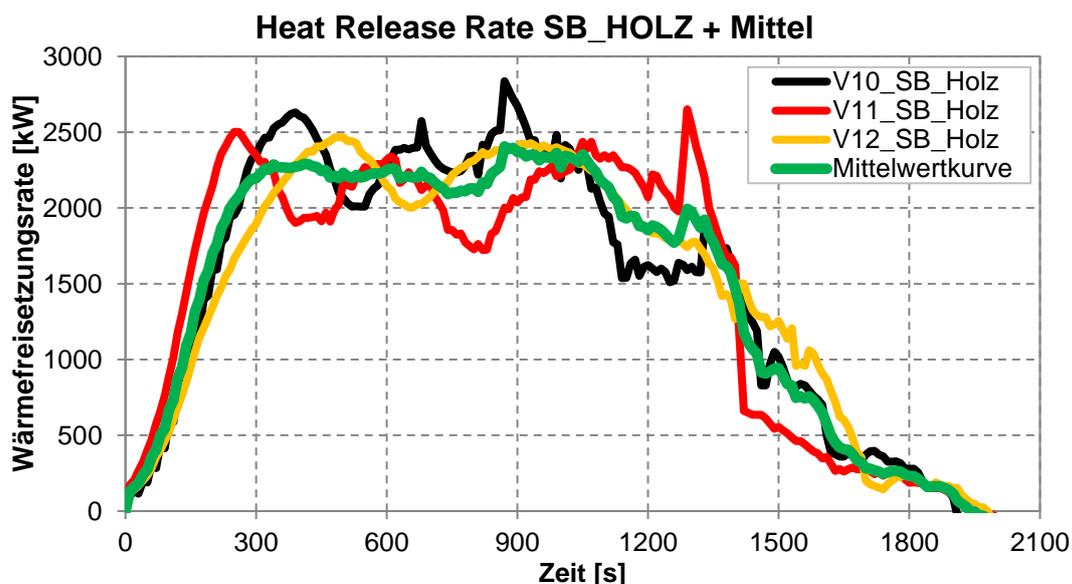


Abbildung 3-23: Ermittelte Wärmefreisetzungsrate aus der Abbrandrate für die Brandversuche V10 bis V12 gemittelt über ein Zeitintervall von 120 Sekunden

In Tabelle 3-14 bis Tabelle 3-16 sind die Mittelwerttemperaturen der Brandversuche V10 bis V12 auf der Oberfläche und in der Y- sowie X-Ebene dargestellt. Nach Auswertung der Temperaturmessdaten wird für den maßgebenden thermischen Beanspruchungszeitraum bei den Brandversuchen der Zeitraum von der 300. Sekunde bis 1.500. Sekunde festgestellt. Der Zeitraum der maßgebenden thermischen Beanspruchung weicht dabei zum Verlauf der Vollbrandphase der Wärmefreisetzungsrate ab. Der Ansatz wird im Weiteren auch durch die repräsentative Bilderdokumentation in Abbildung 3-17 deutlich.



Abbildung 3-24: Brandbeanspruchung in der 5., 9., 18. Und 21. Prüfminute

Tabelle 3-14: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300. Sekunde bis 1500 Sekunde (Brandversuche V10 bis V12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	98,89	147,00	213,83	256,66	225,83	222,53	163,03	117,03
	7,20	94,56	150,70	221,55	266,07	283,20	223,61	161,07	112,09
	6,70	95,84	154,16	247,02	260,88	310,17	250,35	172,68	109,35
	6,20	92,60	150,33	263,28	297,50	331,44	270,77	175,05	104,65
	5,70	92,19	179,05	281,02	268,51	366,02	265,75	180,28	96,71
	5,20	89,19	177,96	312,72	310,40	412,20	298,94	172,16	89,91
	4,70	82,81	186,32	304,05	338,36	381,68	215,18	179,81	83,29
	4,20	81,76	192,85	372,01	328,91	459,18	330,55	168,16	80,28
	3,70	79,91	187,23	408,21	314,59	437,66	308,67	154,47	78,34
	3,20	79,41	177,04	411,63	357,74	426,03	264,69	144,14	72,43
	2,70	89,76	162,13	403,50	361,37	408,06	244,16	142,95	79,44
	2,20	100,15	149,87	391,08	379,54	402,22	240,03	129,67	73,85
	1,70	98,20	174,10	376,12	383,21	433,61	270,76	139,74	79,17
	1,20	116,44	253,24	464,87	372,62	513,58	256,25	111,67	66,42
0,70	120,29	336,19	447,14	374,87	519,72	406,04	89,32	65,02	

Die Mittelwerttemperaturen in Tabelle 3-15 zeigen, dass sich die Flamme oberhalb der Holzkrippe parallel zur Prüfwand ausbildet (vgl. exemplarisch auch Abbildung 3-25). Die

kontinuierlichen Flammenhöhen während der Vollbrandphase waren bei allen drei Brandversuchen mit ca. 4,0 m Höhe über der Holzkrippe zu beobachten, was somit in guter Übereinstimmung mit den dargestellten Mittelwerttemperaturen auf der Oberfläche und der Y-Ebene steht.

Tabelle 3-15: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300. Sekunde bis 1500 Sekunde (Brandversuche V10 bis V12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				213,83	199,48	182,58	133,23	100,70
	7,20				221,55	240,72	204,13	117,01	79,90
	6,70				247,02	246,12	221,60	115,72	69,00
	6,20				263,28	278,74	224,22	155,43	69,77
	5,70				281,02	340,32	219,63	147,23	77,25
	5,20				312,72	392,75	325,10	127,53	76,67
	4,70				304,05	486,36	369,93	144,02	65,16
	4,20				372,01	562,72	387,96	207,42	48,61
	3,70				408,21	668,81	399,45	175,63	59,17
	3,20				411,63	722,96	473,22	235,76	89,55
	2,70				403,50	773,85	595,40	242,85	105,48
	2,20				391,08	763,68	649,68	151,58	103,77
	1,70				376,12	747,40	699,16	101,58	65,14
	1,20				464,87	Holzkrippe		118,14	85,26
0,70				447,14	Holzkrippe		76,90	58,40	

Tabelle 3-16: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300. Sekunde bis 1500 Sekunde (Brandversuche V10 bis V12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				147,00	140,44	132,53	86,85	79,50
	7,20				150,70	126,45	115,70	80,92	73,44
	6,70				154,16	169,11	104,87	70,75	42,62
	6,20				150,33	141,88	98,81	66,82	40,55
	5,70				179,05	169,96	130,52	78,25	43,79
	5,20				177,96	189,70	139,01	73,12	54,86
	4,70				186,32	182,51	155,48	111,86	76,85
	4,20				192,85	201,24	158,67	107,90	89,22
	3,70				187,23	350,61	145,77	117,31	74,01
	3,20				177,04	264,14	246,02	107,31	85,37
	2,70				162,13	324,54	154,62	101,54	74,69
	2,20				149,87	301,55	179,20	65,61	92,18
	1,70				174,10	296,46	240,12	108,20	88,16
	1,20				253,24	Holzkrippe		110,15	40,59
0,70				336,19	Holzkrippe		112,08	40,06	

Bei Betrachtung der Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene in Tabelle 3-16 wird deutlich, dass beim Sockelbrandversuch der Flammenkörper in der Ebene visuell nicht mehr in Erscheinung tritt und damit für die thermische Brandbeanspruchung der Prüfwand unwesentlich ist.



Abbildung 3-25: Exemplarische Darstellung der Flammenausbildung oberhalb der Holzkippe parallel zur Rückwand

4 Vergleichsauswertungen und -betrachtungen

4.1 Freigesetzte Wärmeenergie und Wärmefreisetzungsrate

Nachfolgend werden die freigesetzten Wärmeenergien (Total Heat Release – THR) und die Wärmefreisetzungsraten (Heat Release Rate – HRR) für die Brandversuchsreihen V1-V3 bis V10-V12 vorgestellt.

Die freigesetzte Wärmeenergie der einzelnen Prüffeuer wird aus der Summe des Produkts der Abbrandraten und dem effektiven Heizwert über die Zeit ermittelt. In Abbildung 4-1 sind die zeitlichen Verlaufskurven dargestellt.

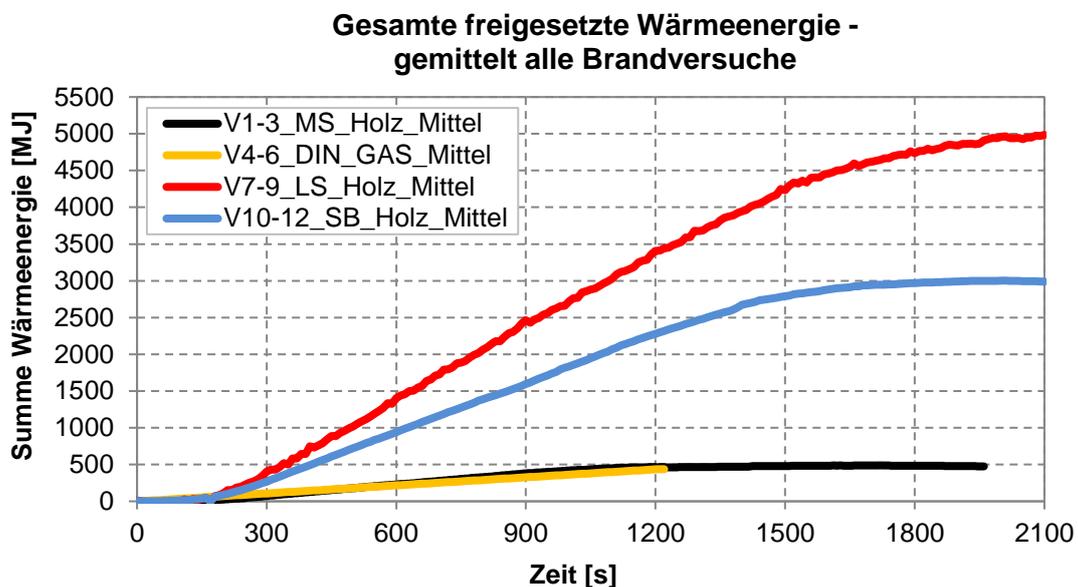


Abbildung 4-1: Ermittelte freigesetzte Wärmeenergie (THR) des Prüffeuers für die einzelnen gemittelten Brandversuchsreihen V1 bis V3, V4 bis V6, V7 bis V9 und V10 bis V12

Für die Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 ergibt sich zur 1.320. Sekunde eine gemittelte freigesetzte Wärmeenergie von ca. 464 MJ. Für die Medium-Exposure-Tests V4 bis V6 ergibt sich zur 1.200. Sekunde eine gemittelte freigesetzte Wärmeenergie von ca. 436 MJ. Die freigesetzten Wärmeenergien über den maßgebenden Prüfzeitraum zeigen für die beiden Medium-Exposure-Tests somit eine gute Übereinstimmung.

Für die Large-Exposure-Tests V7 bis V9 ergibt sich zur 1.500. Sekunde eine gemittelte freigesetzte Wärmeenergie von ca. 4232 MJ sowie zur 1.800. Sekunde eine gemittelte freigesetzte Wärmeenergie von ca. 4737 MJ. Für die Large-Exposure-Tests V10 bis V12 ergibt sich zur 1.500. Sekunde eine gemittelte gesamte freigesetzte Wärmeenergie von ca. 2791 MJ sowie zur 1.800. Sekunde eine gemittelte gesamte freigesetzte Wärmeenergie von ca. 2968 MJ. Die freigesetzten Wärmeenergien zeigen für den europäischen Large-Exposure-Test somit eine höhere freigesetzte Wärmeenergie für das Prüffeuer nach Beendigung der

Prüfzeit gegenüber der Sockelbrandprüfung, was im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Massen der Holzkrippen (Large-Exposure-Test EU mit ca. 350 kg gegenüber dem Large-Exposure-Test der Sockelbrandprüfung mit ca. 200 kg) zurückzuführen ist. Die insgesamt freigesetzte Wärmeenergie für das Prüffeuerelement in der Sockelbrandprüfung mit ca. 2791 MJ steht wiederum mit den Vorgaben aus DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand: 2021-11) [13], bei dem mindestens 2.674 MJ Wärmeenergie zur 1.500 Sekunde freigesetzt sein muss, im Einklang.

In Abbildung 4-2 sind die gemittelten Wärmefreisetzungsraten der Brandversuchsreihen gegenüber gestellt. Für die Medium-Exposure-Tests wird deutlich, dass bei den Brandversuchen V4 bis V6 mit dem Gasbrenner die mittlere Wärmefreisetzungsrate mit ca. 360 kW gegenüber den Brandversuchen V1 bis V3 mit einer mittleren Wärmefreisetzungsrate von 500 kW geringer ausfällt. Gleichzeitig herrscht aber bei den Brandversuchen V4 bis V6 mit dem Gasbrenner eine näherungsweise max. Leistung über die komplette Prüfzeit von 1200 Sekunden vor, welche bei den Brandversuchen V1 bis V3 mit der Holzkrippe lediglich von ca. der 300. Sekunde bis ca. zur 900 Sekunde vorherrschend ist. Somit ergeben sich die über den gesamten Prüfzeitraum ähnlichen freigesetzten Wärmeenergien für beide Brandversuche.

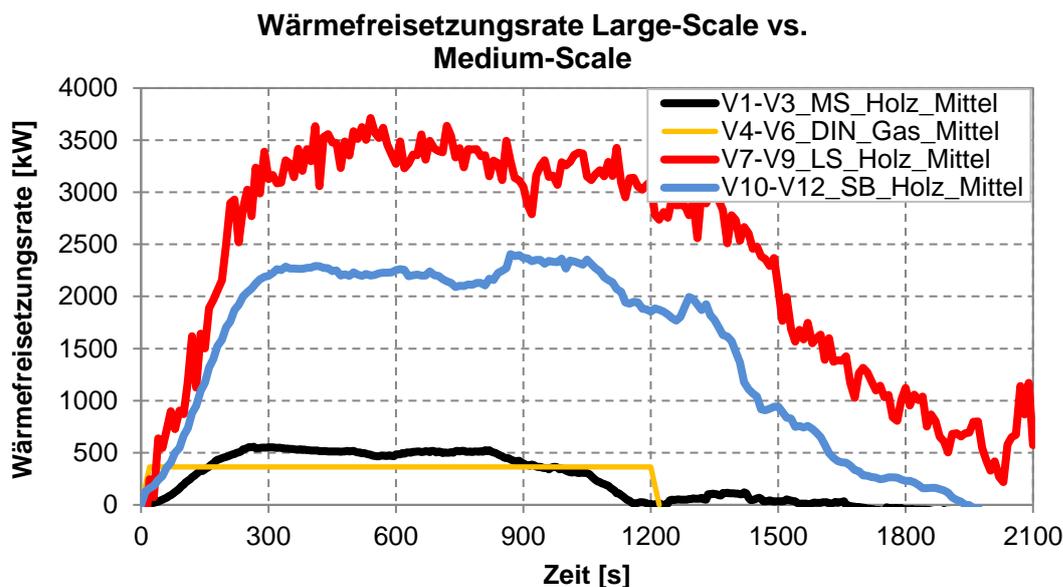


Abbildung 4-2: Ermittelte Wärmefreisetzungsraten des Prüffeuerelementes für die einzelnen gemittelten Brandversuchsreihen V1 bis V3, V4 bis V6, V7 bis V9 und V10 bis V12

Aufgrund der höheren Brandlast und den größeren wirksamen Brandflächen im europäischen Large-Exposure-Test gegenüber dem Large-Exposure-Test für die Sockelbrandprüfung fällt die gemittelte Wärmefreisetzungsraten mit ca. 3.250 kW gegenüber der Sockelbrandprüfung mit einer gemittelten Wärmefreisetzungsraten von ca. 2.250 kW während der Vollbrandphase der Holzkrippen höher aus. Gleichzeitig wird jedoch durch die unterschiedliche Positionierung der Holzkrippen in der Brandkammer im europäischen Large-Exposure-Test und vor dem

Prüfstand im Eckbereich in der nationalen Sockelbrandprüfung eine unterschiedliche lokale thermische Brandbeanspruchung erzeugt, die in den nachfolgenden Abschnitten genauer untersucht wird. Im Weiteren wird bereits bei Betrachtung der freigesetzten Wärmeenergie und der ermittelten Wärmefreisetzungsraten der deutliche Unterschied zwischen den Medium-Exposure- und den Large-Exposure-Tests deutlich.

4.2 Wärmestromdichten

Nachfolgend werden zur Vergleichsbetrachtung bei den Medium-Exposure- und Large-Exposure-Tests die Netto-Wärmestromdichten auf Grundlage nachfolgender Gleichung Gl. (4-1) nach DIN EN 1991-1-2 [10] mittels der gemessenen Temperaturen angrenzend zur Prüfwandoberfläche der Rückwand in Achse Z und der Eckwand in Achse E ermittelt. Die ermittelten Netto-Wärmestromdichten werden im ersten Schritt auf eine idealisierte Fläche (Surface integral) einzeln bestimmt, jede über die Fläche errechnete Netto-Wärmestromdichte aufsummiert, sowie über die Zeit integriert. Ziel des gewählten Ansatzes ist die Bestimmung von quantitativen brandphysikalischen Kenngrößen zur besseren Vergleichbarkeit der Brandversuchsreihen untereinander. Als maßgebende wirksame Fläche jedes einzelnen Messpunktes wird das Flächeneinzugsgebiet bis zur halben Wegstrecke zum nächstgelegenen Messpunkt angesetzt.

Die Ermittlung der Netto-Wärmestromdichten erfolgt unter einem vereinfachten Ansatz der Eingangsparameter für die wirksame Strahlungstemperatur des Brandes θ_r sowie dem Konfigurationsfaktors ϕ . Für die wirksame Strahlungstemperatur des Brandes θ_r wird idealisiert die Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils θ_g (hier gemessene Temperaturen an der Oberfläche) angenommen. Der Konfigurationsfaktors ϕ wird idealisiert zu 1 angesetzt. Die weiteren Annahmen der Eingangsparameter sind nachfolgend dargestellt.

$$\dot{h}_{\text{net}} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) + \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad \text{Gl. (4-1)}$$

Dabei ist

\dot{h}_{net}	die Netto-Wärmestromdichte	[W/m ²]
α_c	der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion (= 25 gemäß Ansatz Außenbrandkurve nach EC 1-1-2 [10])	[W/(m ² ·K)]
θ_g	die Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils	[°C]
θ_m	die Oberflächentemperatur des Bauteils (= 20 °C)	[°C]

ϕ	der Konfigurationsfaktor (= 1 vereinfachte Einnahme)	[-]
ε_m	die Emissivität der Bauteiloberfläche (= 0,8 gemäß EC 1-1-2 [10])	[-]
ε_f	die Emissivität des Feuers (= 0,9 gemäß BiR [42])	[-]
σ	die Stephan-Boltzmann-Konstante (= $5,67 \cdot 10^{-8}$)	[W/(m ² ·K ⁴)]
Θ_r	die wirksame Strahlungstemperatur des Brandes	[°C]

In Abbildung 4-3 sind die Verläufe für die einwirkenden Wärmestromdichten der beanspruchten Prüfwand für die Brandversuche V1 bis V6 dargestellt.

Aus den Kurvenverläufen wird deutlich, dass die thermische Beanspruchung der Prüfwand bei den Brandversuchen V1 bis V3 während der Vollbrandphase von ca. der 300. Sekunde bis zur 900. Sekunde am höchsten liegt. Mit Beginn der Abklingphase der Wärmefreisetzungsrates ab ca. der 900. Sekunde nimmt die thermische Brandbeanspruchung kontinuierlich ab.

Aus den Kurvenverläufen bei den Brandversuchen V4 bis V6 ist wiederum zu erkennen, dass die thermische Beanspruchung der Prüfwand nahezu über die vollständige Prüfzeit von 1.200 Sekunden konstant verläuft. Dies steht im Einklang mit dem angenommenen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates für die Brandversuchsreihe V4 bis V6.

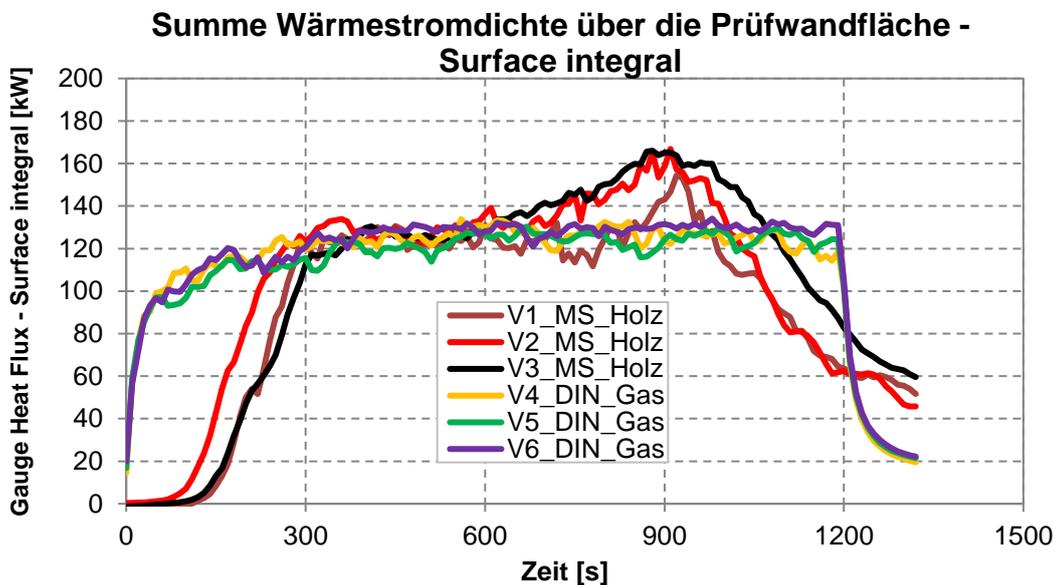


Abbildung 4-3: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten der beanspruchten Prüfwand für die Brandversuche V1 bis V6

In Abbildung 4-4 ist die einwirkende Wärmeenergie über die Prüfzeit von 1.320 Sekunden bei den Brandversuchen V1 bis V3 sowie 1.200 bei den Brandversuchen V4 bis V6 auf die Prüfwand dargestellt. Dabei ergibt sich bei den Brandversuchen V1 bis V3 eine maximale

einwirkende Wärmeenergie von 121 MJ sowie im Mittel der drei Brandversuche ein Wert von 115 MJ. Bei den Brandversuchen V4 bis V6 ergibt sich eine maximale einwirkende Wärmeenergie von 132 MJ sowie im Mittel der drei Brandversuche ein Wert von 130 MJ.

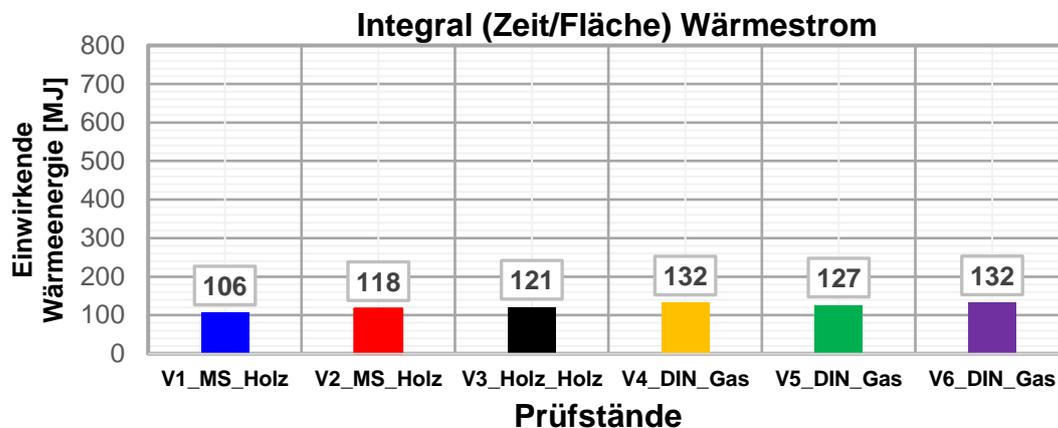


Abbildung 4-4: Integral der einwirkenden Wärmestromdichte auf die Prüfwandfläche über die Prüfzeit in MJ für die Brandversuche V1 bis V6

Daraus resultiert, unabhängig der zeitlich unterschiedlichen thermischen Brandbeanspruchung der Prüfwände insgesamt eine näherungsweise ähnliche thermische Brandbeanspruchung für die Medium-Exposure-Tests nach dem europäischen Prüfverfahren ([3], [20]) und dem nationalen Prüfverfahren nach DIN 4102-20 [12] mit etwa 10 % höheren Werten Brandprüfung mit dem Gasbrenner.

In Abbildung 4-5 sind die Verläufe für die einwirkenden Wärmestromdichten für die Brandversuche V7 bis V12 dargestellt. Aus dieser wird deutlich, dass die thermische Beanspruchung bei den Brandversuchen zwischen V7 bis V9 und V10 bis V12 deutlich unterschiedlich verlaufen. Die Brandversuche V7 bis V9 erreichen eine konstante Brandbeanspruchung ca. zur 400. Sekunde und nehmen kurz vor Erreichen der Abklingphase des Prüffeuers zur 1.200 Sekunde nochmal zu. Mit Beginn der Abklingphase nimmt die thermische Brandbeanspruchung der Prüfwand kontinuierlich ab.

Bei den Brandversuchen V10 und V11 nimmt die thermische Brandbeanspruchung der Prüfwand bis ca. zur 1.400. Sekunde zu und nimmt dann erst kontinuierlich ab. Bei Brandversuch V12 erfolgt eine Abnahme der thermischen Brandbeanspruchung der Prüfwand erst mit Beginn der ca. 1.600. Sekunde. Auf Grundlage der Versuchs- und Videoauswertungen ist dieser Effekt insbesondere auf das Anlehnen der Holzkrippe an die Prüfwand ab ca. der 1.500. Prüfsekunde zurückzuführen, was lokal zu einer erhöhten thermischen Brandbeanspruchung gegenüber den anderen zwei Brandversuchen V10 und V11 führte. Somit zeigt sich hier der Einfluss der Krippenstabilität auf die Einwirkung auf die Prüfwandfläche. Einen Zusammenhang mit den Lüftungsbedingungen zwischen V10 und V11 mit V12 konnte sowohl

auf Grundlage der Messdatenauswertung als auch den visuellen Versuchsbeobachtungen nicht festgestellt werden.

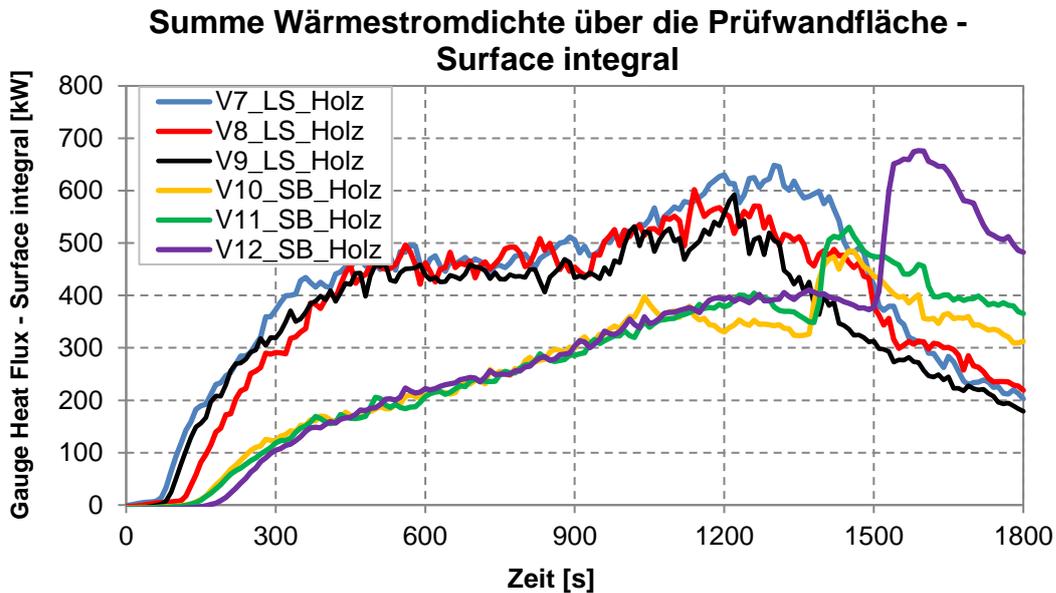


Abbildung 4-5: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten der beanspruchten Prüfwan für die Brandversuche V7 bis V12

In Abbildung 4-6 ist die einwirkende Wärmeenergie über eine Zeit von 1.800 Sekunden bei den Brandversuchen V7 bis V12 auf die Prüfwan dargestellt. Dabei ergibt sich bei den Brandversuchen V7 bis V9 eine maximal einwirkende Wärmeenergie von 746 MJ sowie im Mittel der drei Brandversuche ein Wert von 694 MJ. Bei den Brandversuchen V10 bis V12 ergibt sich eine maximale einwirkende Wärmeenergie von 532 MJ sowie im Mittel der drei Brandversuche ein Wert von 497 MJ.

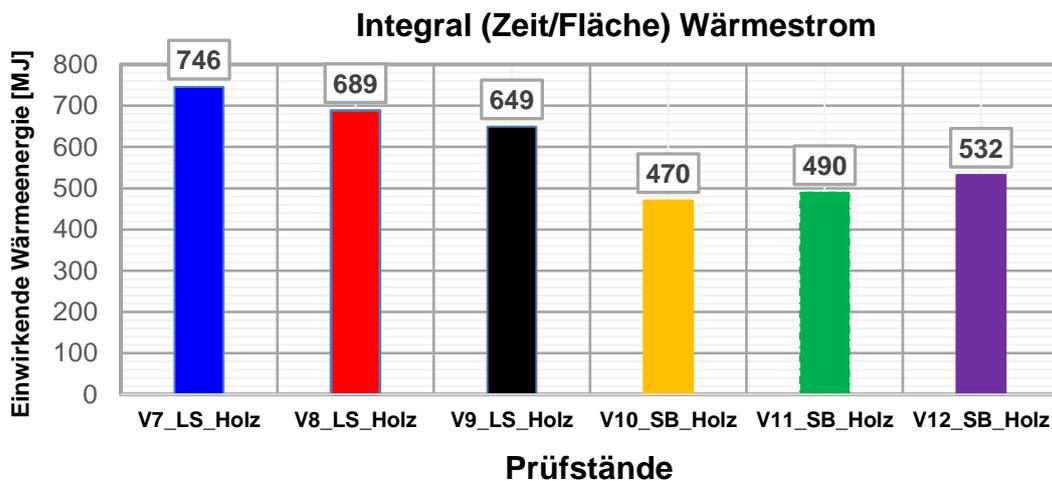


Abbildung 4-6: Integral der einwirkenden Wärmestromdichte auf die Prüfwanfläche über die Prüfzeit in MJ für die Brandversuche V7 bis V12

Der wesentliche Unterschied zwischen dem europäischen Large-Exposure-Test und der nationalen Large-Exposure Sockelbrandprüfung ist die Ausbildung der Prüflamme entlang der Prüfwand. Bei dem europäischen Large-Exposure-Test schlagen die Flammen unmittelbar aus der Brandkammer und lehnen sich oberhalb der Öffnung ab einer gewissen Höhe an die Prüfwand an. Bei der nationalen Sockelbrandprüfung verlaufen die Flammen im Brandversuch parallel zur Prüfwand. Bei einer Brandprüfung mit einem mitbrennenden Außenwandbekleidungssystem ist zu erwarten, dass sich die Flamme aus dem Prüffeuer in der Sockelbrandprüfung deutlich mehr an die Prüfwand anlehnt und somit auch eine deutlich höhere thermische Brandbeanspruchung als in den hier durchgeführten Brandversuchen erzeugt. Dies ist auf die fehlende und trennende Luftebene beim Mitbrennen einer Außenwandbekleidung als kühlende und frischlufteinmengende Barriere zurückzuführen.

4.3 Isothermen und Temperaturen

Im Folgenden sind die durchschnittlichen und maximalen Temperaturen, gemessen mit Mantelthermoelementen 20 mm vor dem Prüfstand, als Isothermen dargestellt. Es werden jeweils zwei Arten von Prüfmethode auf die gleiche Weise ausgewertet und nebeneinander dargestellt, um die Ähnlichkeiten und Unterschiede visuell miteinander vergleichen zu können.

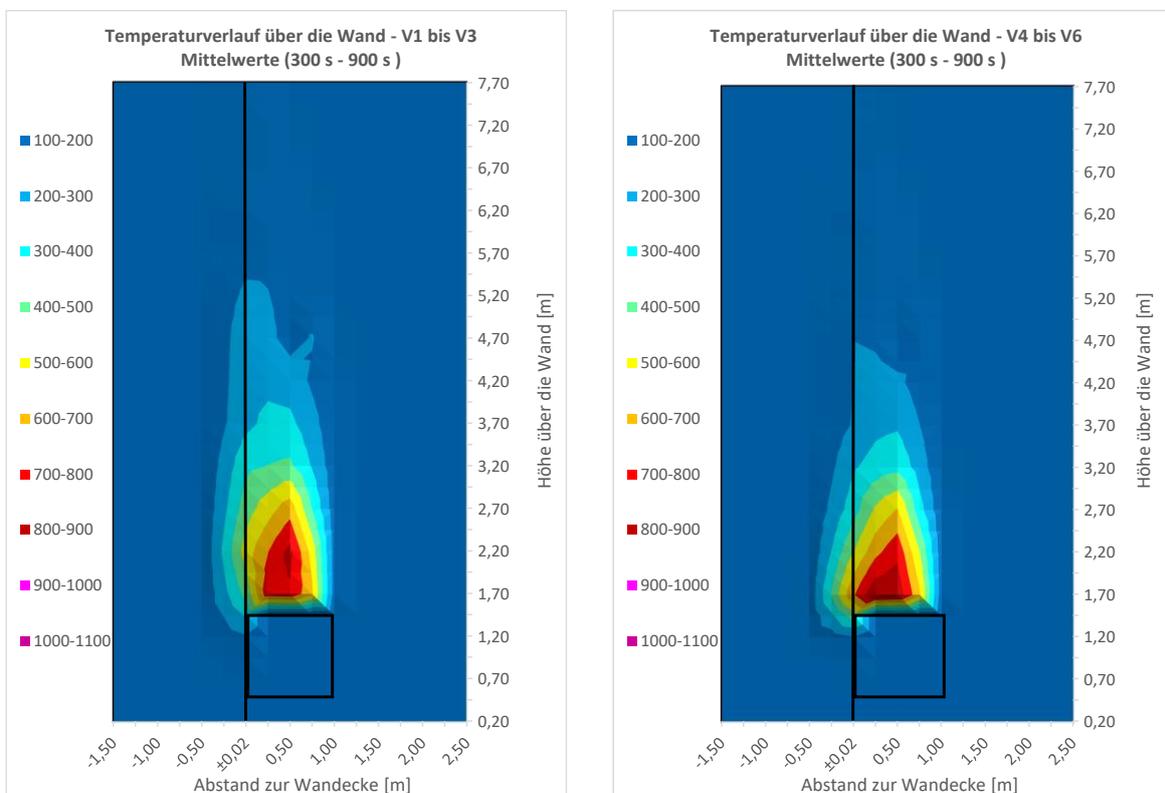


Abbildung 4-7: Oberflächentemperaturen der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 und V4 bis V6 – Mittelwerte 300 s bis 900 s

In Abbildung 4-7 werden die beiden Medium-Exposure Prüfverfahren miteinander verglichen. Es ist zu erkennen, dass sich die Beanspruchung der Holzkrippe und des Gasbrenners erwartungsgemäß stark ähneln. D.h. die Isothermen neigen sich bei beiden Prüfverfahren leicht in die Innenecke. Aufgrund seiner Position in der Brandkammer ist die Wärmeeinwirkung des Gasbrenners im Bereich der Innenecke höher. Auch erzeugt der Gasbrenner im Sturzbereich etwas höhere Mittelwert-Temperaturen.

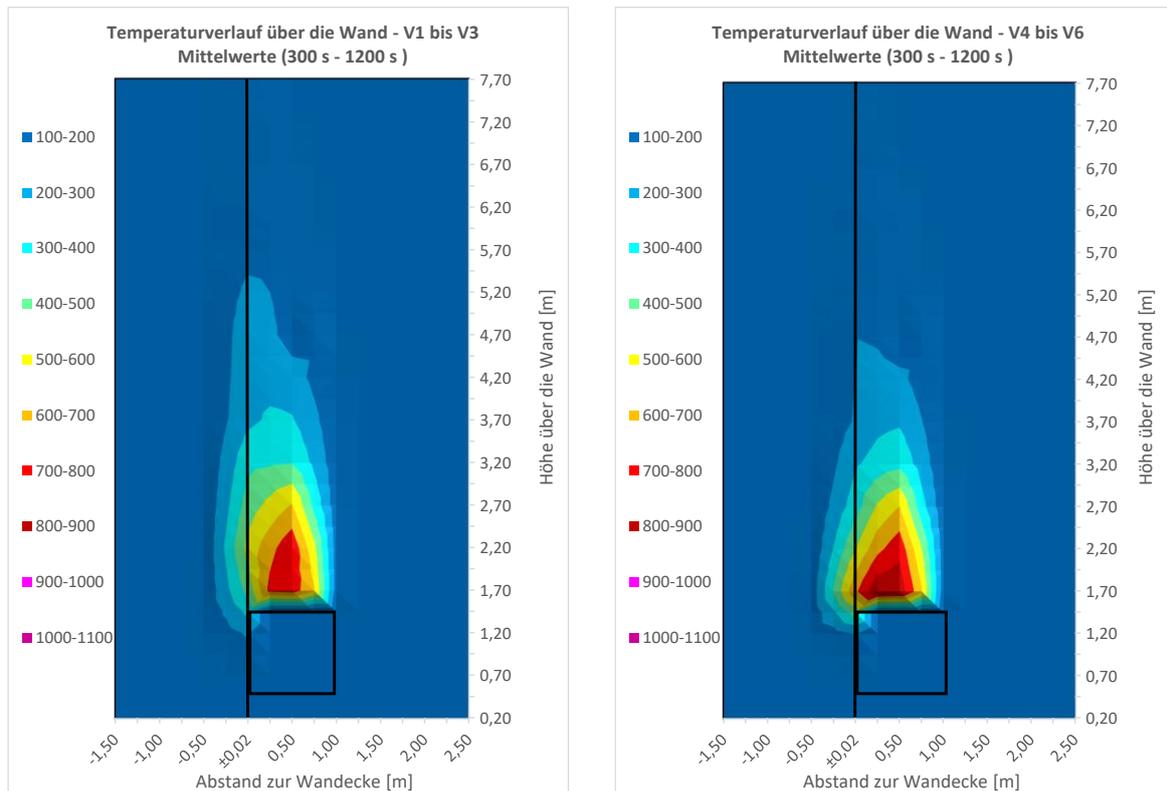


Abbildung 4-8: Oberflächentemperaturen der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 und V4 bis V6 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Ähnliches zeigt Abbildung 4-8 und die Auswertung bis zum Ende der Prüfung nach 1200 Sekunden. Die Mittelwert-Temperaturen der Holzkrippe waren jedoch ein wenig niedriger, so dass der Unterschied der Sturztemperaturen deutlicher sichtbar ist.

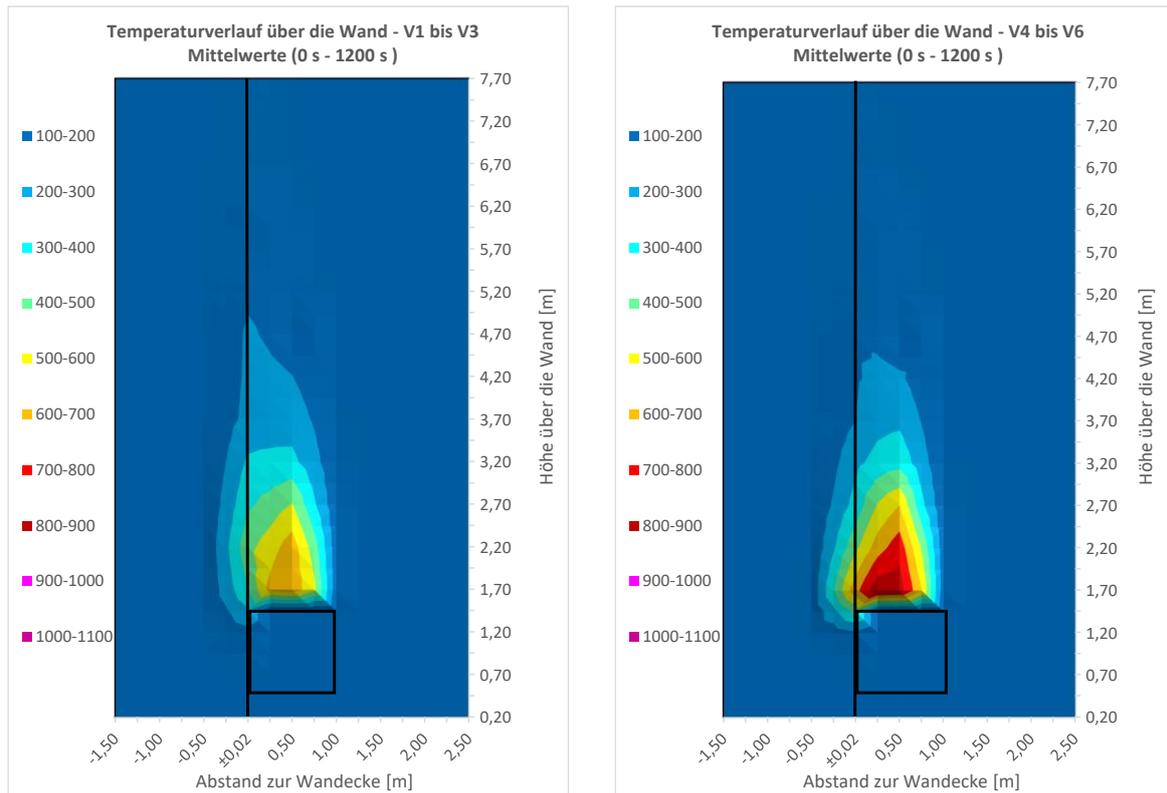


Abbildung 4-9: Oberflächentemperaturen der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 und V4 bis V6 – Mittelwerte 0 s bis 1200 s

Wird, wie in Abbildung 4-9 dargestellt, ein Prüfzeitraum von 0 bis 1200 Sekunden ausgewertet, wird der Unterschied noch deutlicher, da die Holzkrippe zu Beginn des Brandversuchs langsamer in den Vollbrand übergeht, wohingegen der Gasbrenner schlagartig zündet und über die gesamte Prüfzeit kontinuierlich brennt. D.h. in dieser Auswertung liegen die Durchschnittstemperaturen der Holzkrippe unterhalb derer des Gasbrenners.

Ein anderes Bild stellt sich dar, wenn nur die an jedem Messpunkt erreichten Maximaltemperaturen als Isothermen visualisiert werden, wie in Abbildung 4-10 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass auf einer größeren Fläche hohe Temperaturen erreicht werden. Die Höhe der 500°Grad Isotherme reicht bis ca. 1,5 m über dem Brandkammersturz und zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Flammenhöhe der Prüfstände.

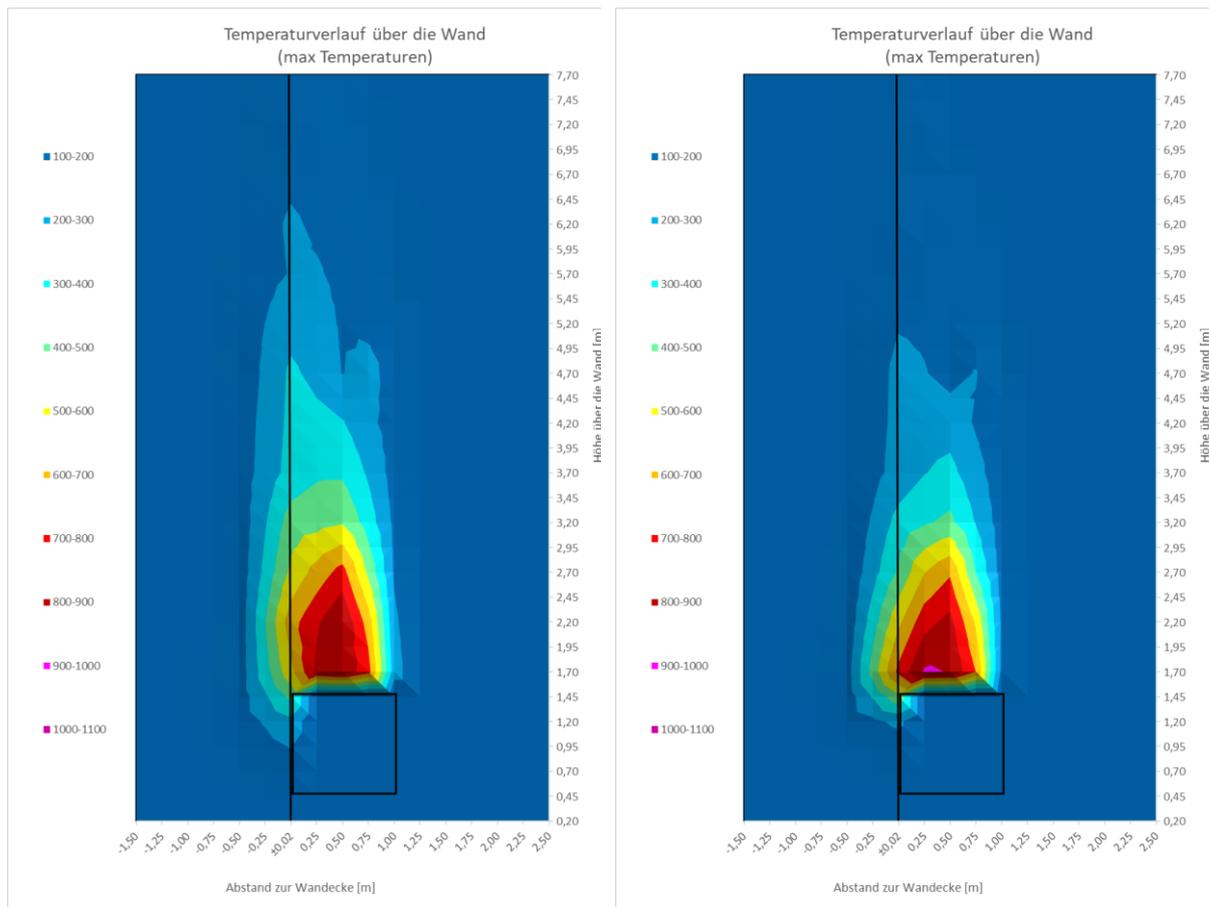


Abbildung 4-10: Oberflächentemperaturen der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 und V4 bis V6 – Maximaltemperaturen

Der Vergleich der Isothermen der beiden Large-Exposure Prüfverfahren zeigt wesentliche Unterschiede auf. In Abbildung 4-11 wurden die Mittelwerte der Temperaturen der beiden Large-Exposure Prüfverfahren 20 mm vor dem Prüfstand visualisiert. Es fällt auf, dass bei dem europäischen Large-Exposure-Test gegenüber der nationalen Large-Exposure Sockelbrandprüfung deutlich höhere Mittelwerttemperaturen erreicht werden. Die Fläche auf denen Temperaturen von 300 °C erreicht werden, sind zwar ähnlich groß, jedoch erreichen die Mittelwerttemperaturen des nationalen Large-Exposure Sockelbrands 500°C an keiner Stelle. Der Bereich in denen ein bereits unter 300°C schmelzbarer Dämmstoff wie EPS thermisch verändert werden kann, ist bei der Large-Exposure Sockelbrandprüfung dennoch ähnlich groß wie bei dem europäischen Large-Exposure-Test. Die Isothermen des europäischen Large-Exposure-Tests zeichnen sich hingegen wesentlich dadurch aus, dass mittig oberhalb des Sturzes über eine Dauer von 900 Sekunden im Mittelwert über 900°C gemessen werden.

Diese Maximaltemperaturen werden erst am zweiten Messpunkt oberhalb das Sturzes erreicht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Flammen sich erst ein Stück oberhalb des Brandkammersturzes wieder an den Prüfstand lehnen. Dieser Effekt ist stärker als bei den

Medium-Exposure Prüfverfahren und führt dazu, dass die Temperaturbeanspruchung im Bereich direkt über dem Sturz bei dem europäischen Large-Exposure-Test sogar ein wenig niedriger ist als bei den Medium-Exposure-Tests.

Die thermische Beanspruchung der Fassadenoberfläche ist dennoch bei dem europäischen Large-Exposure-Test auf den Bereich oberhalb des Sturzes konzentriert. Die größte Wärme wirkt mittig über der Brandkammer, die Wärmeeinwirkung in der Innenecke des Prüfstands sind geringer als bei der Large-Exposure Sockelbrandprüfung, bei der beide Prüfwandschenkel und auch die Innenecke dazwischen ähnlich beansprucht werden.

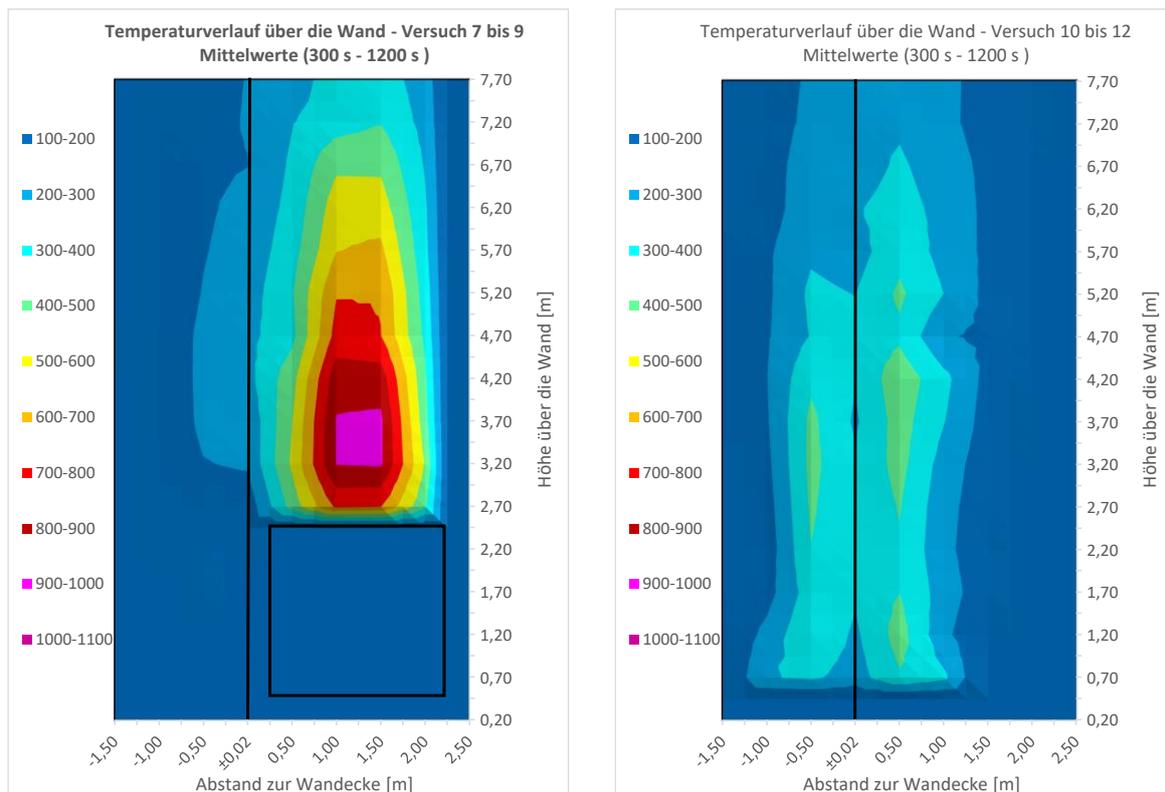


Abbildung 4-11: Oberflächentemperaturen der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 und V10 bis V12 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Die Analyse der Temperaturmittelwerte von 300 bis 1500 Sekunden zeigt qualitativ die gleichen Effekte auf. Jedoch werden bei der nationalen Large-Exposure Sockelbrandprüfung punktuell 500°C im Bereich der Holzkrippe erreicht, siehe Abbildung 4-12.

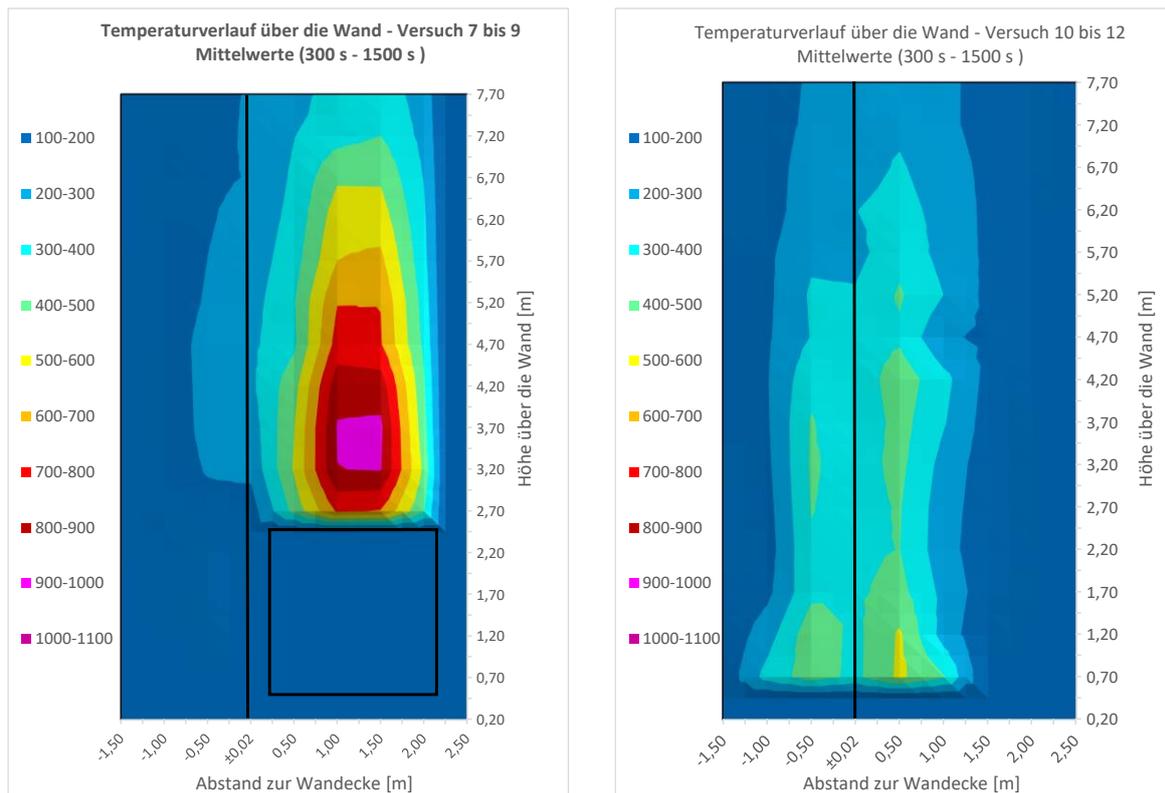


Abbildung 4-12: Oberflächentemperaturen der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 und V10 bis V12 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

In der Darstellung der Maximalwerte in Abbildung 4-13 werden naturgemäß überall höhere Temperaturen sichtbar.

Die Höhe der 500°Grad Isotherme reicht beim europäischen Large-Exposure-Test bis ca. 5 m über den Brandkammersturz und beim Sockelbrandprüfstand bis in ca. 5 m Höhe und entsprechen der beobachteten Flammenhöhe.

Die Maximalwerte erreichen gegenüber den Mittelwerten beim europäischen Large-Exposure-Test eine 100-Grad Isotherme mehr. Ansonsten sehen die Maximalisothermen, den Mittelwerten (vgl. Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12) aber ähnlich. Dies ist auf das hohe und stabile Flammenbild über einen langen Prüfzeitraum zurückzuführen. Die Holzkrippe im Brandraum kann hingegen nicht direkt auf die Fassade strahlen.

Ein anderes Bild ergibt sich bei der nationalen Large-Exposure Sockelbrandprüfung. Hier erreichen die Maximalisothermen im unteren Bereich des Prüfstands deutlich höhere Temperaturen.

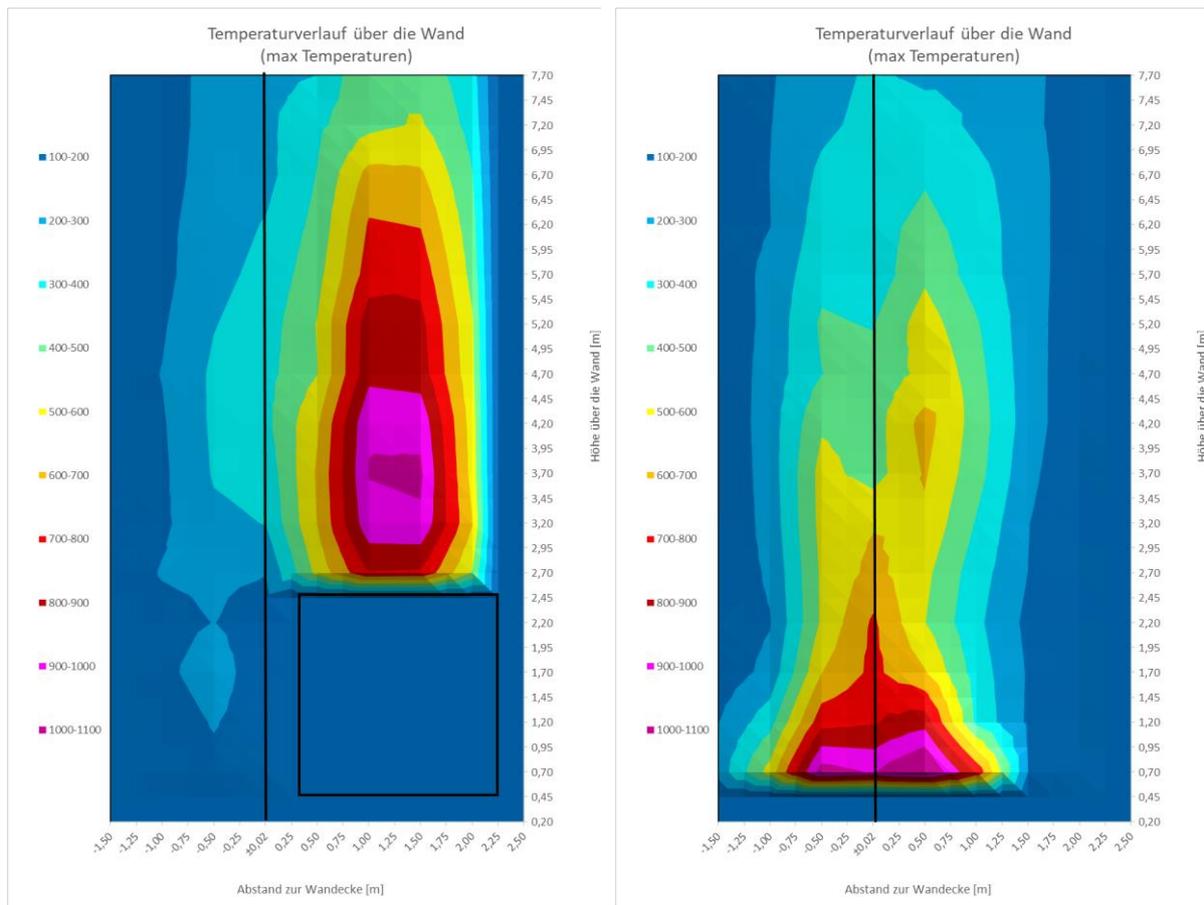


Abbildung 4-13: Oberflächentemperaturen der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 und V10 bis V12 – Maximalwerte

In Abbildung 4-14 wurden die Messwerte der beiden Large-Exposure Prüfverfahren 50 cm vor der Prüfstandwand als Isothermen dargestellt. Es wird deutlich, dass die Temperaturen in diesem Bereich bei dem europäischen Large-Exposure-Test niedriger als 20 mm vor der Prüfstandwand sind und bei der nationalen Large-Exposure Sockelbrandprüfung höher als 20 mm vor Prüfstandwand sind. Diese beiden Unterschiede sind so signifikant, dass die Temperaturen der Sockelbrandprüfung höher als die des europäischen Large-Exposure-Tests sind.

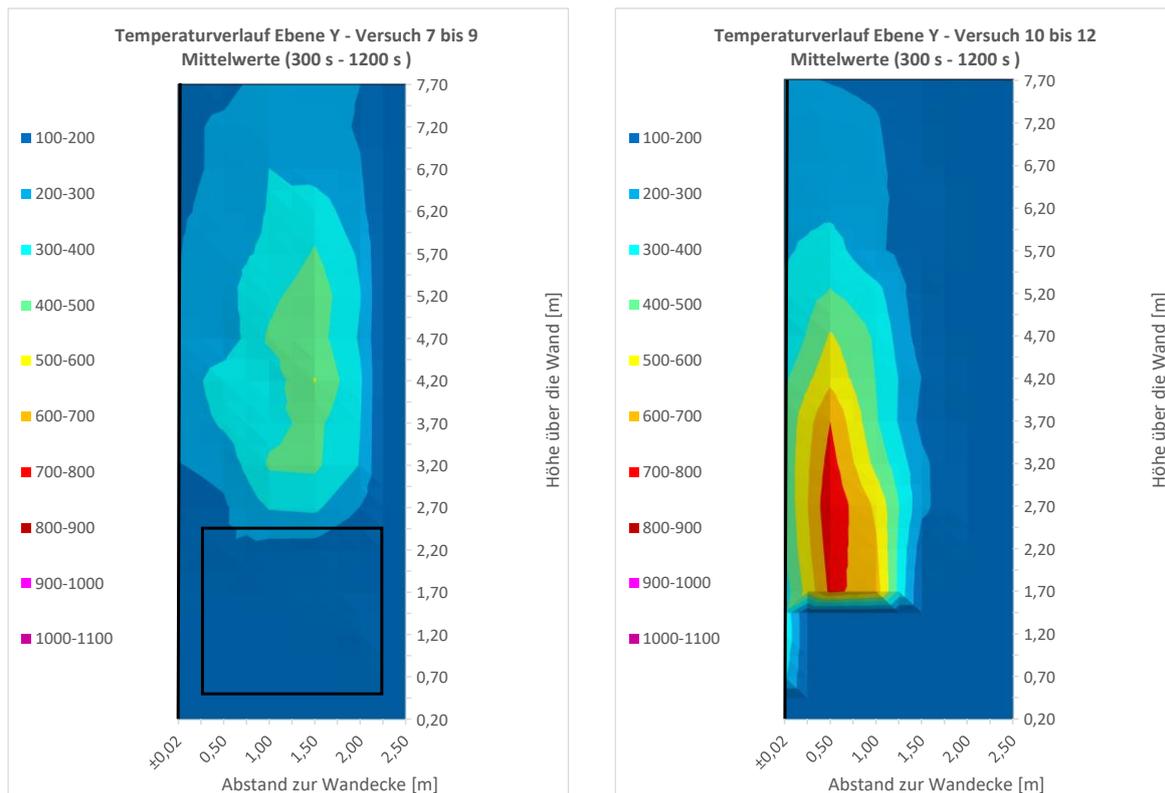


Abbildung 4-14: Temperaturen in der Y-Ebene der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 und V10 bis V12– Mittelwerte 300 s bis 1200 s

In der in Abbildung 4-15 ausgewerteten Messebene X, einen Meter vor der Prüfstandwand sind die Temperaturen ähnlich, wobei bei der Sockelbrandprüfung im Gegensatz zum europäischen Prüfverfahren punktuell Temperaturen von 300°C erreicht wurden.

In Abbildung 4-16 sind die mittleren Temperaturen über einen Zeitraum von der 300. Sekunde bis zur 1.500. Sekunde an der Oberfläche der Prüfstandwand für die Brandversuche V11 und V12 gegenübergestellt. Im Brandversuch V12 war gegenüber dem Brandversuch V11 nur eine Abluftöffnung oberhalb des Prüfstandes geöffnet. Die Temperaturdarstellung zeigt, dass durch die Öffnung nur einer Abluftöffnung im Brandversuch V12 der Heißgasstrom gegenüber dem Brandversuch V11 mit zwei Abluftöffnungen in der Höhe höhere Temperaturen erzeugt und eine konzentrierte Beanspruchung entlang der Rückwand nahe zur Innenecke ausbildet.

4 Vergleichsauswertungen und -betrachtungen

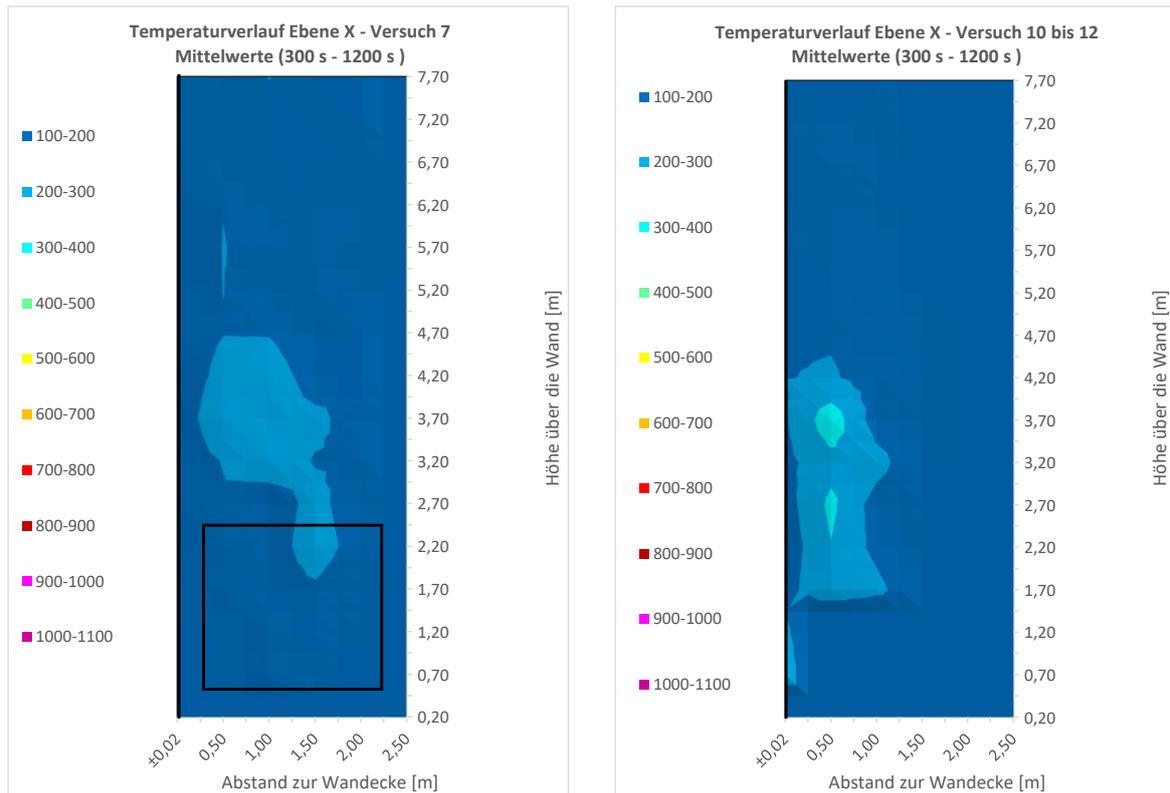


Abbildung 4-15: Temperaturen in der X-Ebene des Large-Exposure-Tests V7 und der Brandversuche V10 bis V12 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

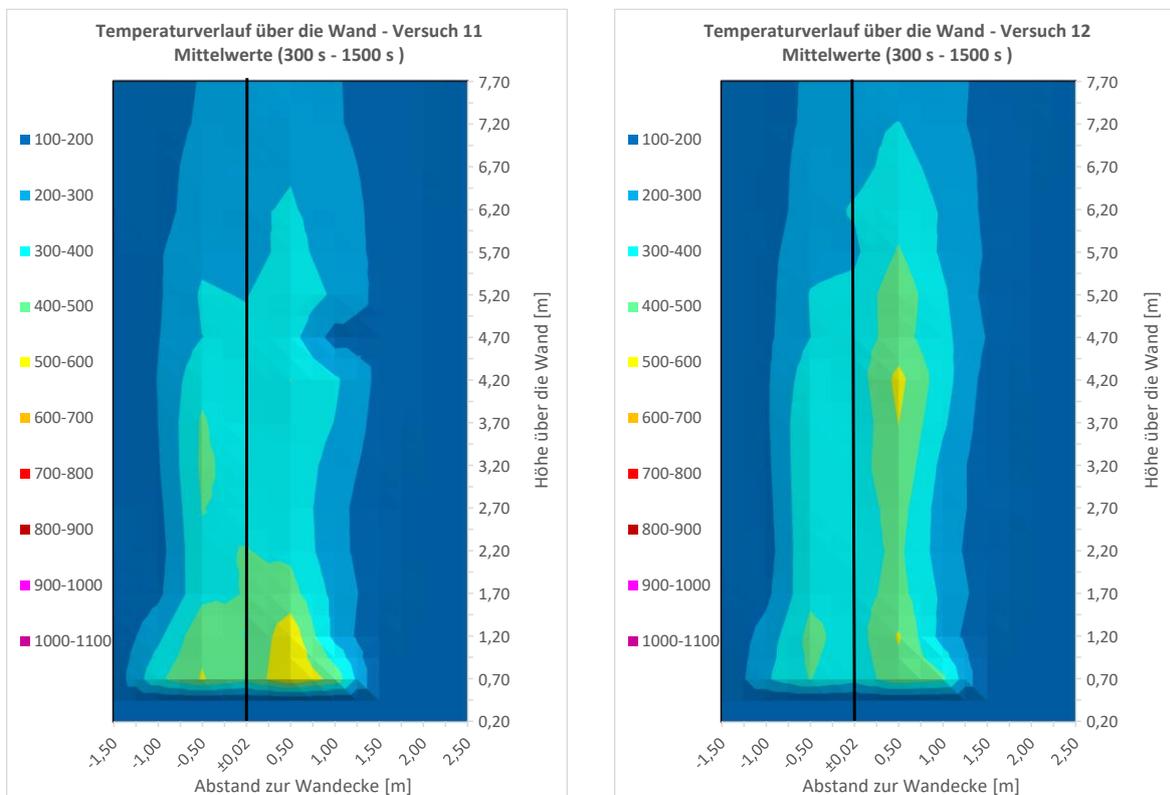


Abbildung 4-16: Temperaturen an der Oberfläche des Large-Exposure-Tests V11 (links) und V12 (rechts) – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

4.4 Vergleich Medium-Exposure- und Large-Exposure-Tests mit dem Raumbrandszenario

4.4.1 Einführung

Die thermische Beanspruchung von Fassaden infolge von Raumbränden wurde über die letzten Jahrzehnte experimentell untersucht. Die Ergebnisse zu den Brandversuchen wurden im Wesentlichen in folgenden Forschungsberichten und Veröffentlichungen publiziert:

- Artikelreihe „Der Brand in Räumen“ nach ([42], [43]),
- Forschungsbericht zur Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen nach [26],
- Lehrter Brandversuche nach [21].

Auf Grundlage der genannten experimentellen Untersuchungen sowie ergänzenden wissenschaftlichen Erkenntnissen wurden analytische Ansätze zur Bestimmung der Längen sowie der Temperaturen der Flammen vor einer Brandraumöffnung entwickelt, die den Stand der Technik und der Forschung widerspiegeln. Im Wesentlichen sind hier die Erkenntnisse aus den Veröffentlichungen der Artikelreihe „Der Brand in Räumen“ von Wilk et. al. ([42], [43]) sowie im Weiteren die analytischen Rechenverfahren nach DIN EN 1991-1-2 [10] und dem dazugehörigen nationalen Anhang DIN EN 1991-1-2/NA [9] zu benennen.

4.4.2 Medium- und Large-Exposure Holz (EU) vs. Raumbrand

Die genannten analytischen Ansätze in Abschnitt 4.4.1 sind nachfolgend Bestandteil für den Ansatz der Vergleichsbetrachtung zwischen einem kritischen Raumbrandszenario und den Medium- und Large-Exposure-Tests für den Raumbrand. Im Weiteren werden die Erkenntnisse aus den Lehrter Brandversuchen [21] zu Räumbränden zur thermischen Brandbeanspruchung von Fassaden herangezogen.

Als maßgebendes Raumbrandszenario für die thermische Beanspruchung einer Außenwand infolge einer einzelnen Brandraumöffnung wurde in [14] eine Brandraumgröße mit einer Grundfläche von 25 m² und einer Brandraumöffnung mit den Abmessungen B x H = 2,0 m x 1,625 m im Rahmen einer Parameterstudie bestimmt. Zur Bestimmung der Brandlastdichte und der daraus resultierenden Branddauer nach [9] wurde der kritische Wohnungsbrand (Wohnnutzung) auf Grundlage der AGBF [40] zugrunde gelegt. Die Branddauer ohne Berücksichtigung wirksamer Löscharbeiten durch die Feuerwehr ist dabei in der Vollbrandphase mit ca. 40 Minuten zu erwarten. Der gewählte analytische Ansatz zur Bestimmung der zu erwartenden mittleren Flammen- und Heißgastemperaturen in [14] beruht

auf die Untersuchungen nach Wilk et al., welche in der Artikelreihe „Brand in Räumen“ in ([42], [43]) veröffentlicht wurde. Im Weiteren schließt der analytische Ansatz auch die durch Kotthoff in [26] untersuchten Raumbrände am Versuchsstand der MFPA Leipzig GmbH bis zum Jahr 2000 in Teilen mit ein. Der Ansatz für das maßgebende Raumbrandszenario unter Berücksichtigung nur einer einzelnen Brandraumöffnung, stützt sich dabei u. a. auf die in Frankreich durchgeführten Untersuchungen nach [2].

In Abbildung 4-17 sind die gemittelten Temperaturverläufe mittig oberhalb der Brandkammer für die definierte Vollbrandphase auf Grundlage Kapitel 3 zu den Medium- und Large-Exposure-Tests für den Raumbrand abgebildet. Für die Large-Exposure-Tests V7 bis V9 sind dabei die Achsen B und C gemäß Abbildung 3-13 berücksichtigt, da eine exakte mittige Anordnung beim Messraster nicht vorgesehen wurde. Dem gegenübergestellt ist der Temperaturverlauf entlang der Flammenachse für den kritischen Wohnraumbrand mit einer Grundfläche von 25 m².

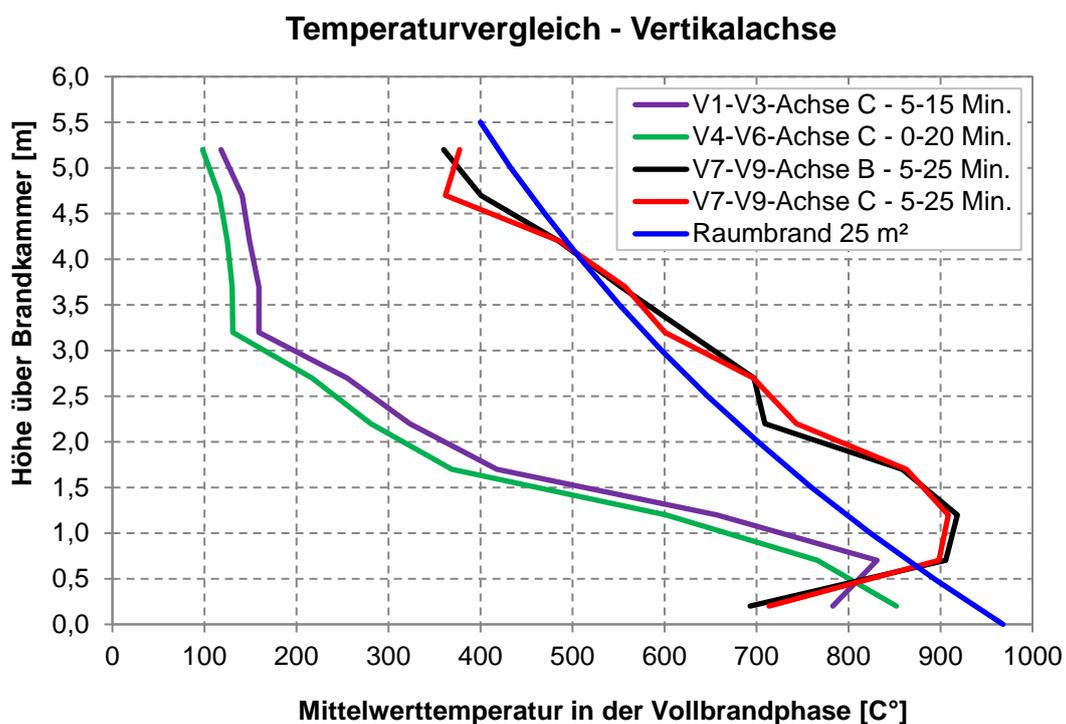


Abbildung 4-17: Vergleich des Temperaturverlaufs zwischen Naturbrandkurven und den Brandversuchsreihen V1 bis V3, V4 bis V6 und V7 bis V9 vertikal entlang der Mittelachsen oberhalb der Brandkammeröffnung

Auf Grundlage der gegenübergestellten Temperaturverläufe wird deutlich, dass die Medium-Exposure-Tests die Temperaturen für den ausgewiesenen kritischen Raumbrand nicht erreichen. Hinzukommt, dass bei den Medium-Exposure-Tests die Öffnungsbreite lediglich 1,0 m beträgt und somit auch eine deutlich geringere thermische Beanspruchung entlang der

Brandraumöffnung, als beim kritischen Raumbrand mit einer Öffnungsbreite von 2,0 m erreicht wird. Bereits ab einer Höhe von 1,5 m oberhalb der Brandkammeröffnung liegen die Temperaturen bei den Medium-Exposure Brandversuchen bei ca. 500°C und damit ca. 250 °C unterhalb der ermittelten Temperaturen für das kritische Raumbrandszenario und ca. 400°C unterhalb der gemittelten Temperaturen der Large-Exposure-Tests. Im Weiteren ist zu erkennen, dass die Temperaturen bei den Medium-Exposure-Tests über die Höhe überproportional schnell abnehmen und somit kein vergleichbares Brandszenario mit dem kritischen Raumbrand und dem Large-Exposure Brandversuch erzeugen.

Der Large-Exposure-Test erzeugt gegenüber dem gewählten kritischen Raumbrandszenario eine höhere thermische Beanspruchung oberhalb der Brandkammer. Ausgenommen ist der vertikale Sturzbereich unmittelbar oberhalb der Öffnung. Hier zeigt sich im Large-Exposure Brandversuch, dass sich die Prüf Flamme beim Austritt aus der Brandkammeröffnung erst ab einer gewissen Höhe dauerhaft auf die Prüfwand lehnt (vgl. Abschnitt 3.4.2) und somit zu einer geringeren thermischen Brandbeanspruchung im vertikalen Sturzbereich führt. Untersuchungen von Kotthoff [23] zum britischen BS 8414-1 [4] haben gezeigt, dass diese Effekte durch eine Modifizierung der Brandkammer (z. B. Verzicht des Brandkammersturzes) möglicherweise reduziert werden können. Grundsätzlich zeigt die Gegenüberstellung in Abbildung 4-17, dass das kritische Wohnraumbrandszenario mit einer Grundfläche des Brandraums von 25 m² und einer Brandraumöffnung mit den Abmessungen B x H = 2,0 m x 1,625 m durch den Large-Exposure Brandversuch ausreichend abgedeckt wird.

In Abbildung 4-18 sind die max. Temperaturen oberhalb der Brandraumöffnung an einer geraden Wand für einen repräsentativen Wohnraumbrand mit einer Grundfläche von ca. 18 m² und einer Fensteröffnung mit den Abmessungen B x H = 1,8 m x 1,5 m auf Grundlage der Lehrter Brandversuche nach [21] in Form von Isothermen (links) und durch eine Temperaturkurve über die Höhe (rechts) dargestellt. Daraus resultierend wird deutlich, dass die Temperaturen über die Höhe durch die allseitig vorliegende Frischluftbeimengung schneller abnehmen, als dies bei den Large-Exposure Brandversuchen mit Eckwandausbildung und begrenzter Prüfhallengeometrie der Fall ist. Der europäische Large-Exposure Brandversuch für den Raumbrand deckt somit auch Raumbrandszenarios mit kleinerer Grundfläche ausreichend sicher ab. Für die Medium-Exposure-Tests wird wiederum deutlich, dass auf der einen Seite keine gleichwertigen thermischen Brandbeanspruchungen über die Höhe und durch die reduzierte Brandkammeröffnung auf 1 m auch bzgl. der Breite für den repräsentativen Raumbrand nachweisbar sind. Die Anwendung des Medium-Exposure-Tests bedarf daher in Abhängigkeit von der Art der zu prüfenden Außenwandbekleidung einer vorherigen Validierung, wie sie beispielsweise in [26] erfolgt ist.

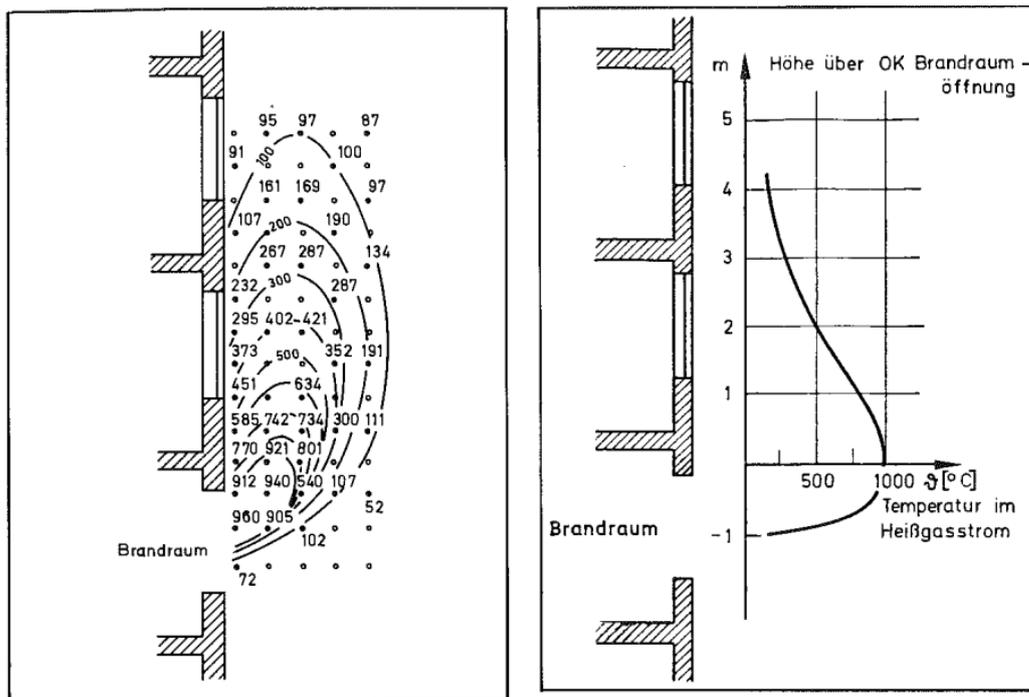


Abbildung 4-18: Darstellung der max. Temperaturen für einen repräsentativen Wohnraumbrand mit einer Grundfläche von ca. 18 m² und einer Fensteröffnung mit den Abmessungen B x H = 1,8 m x 1,5 m auf Grundlage der Lehrter Brandversuche nach [21]

4.5 Fazit

Die Auswertungen zu den Medium-Exposure-Tests haben gezeigt, dass die geplante europäische Fassadenbrandprüfung mit einer 30 kg Holzkippe nach ([3], [20]) im Vergleich zur Fassadenbrandprüfung mit Gasbrenner nach DIN 4102-20 [12], zum Teil Abweichungen aufzeigen. Bezüglich der freigesetzten Wärmeenergie sowie die auf den Prüfstand wirkende Wärmeenergie für die Gesamtprüfzeit sind sich die beiden Prüfverfahren sehr ähnlich. Auch der Einfluss durch die Innenecke auf die Flammenausbildung am Prüfstand war bei beiden Fassadenprüfverfahren erkennbar und ähnlich.

Die jeweiligen max. Leistungen der Prüffeuer in den Brandversuchen unterscheiden sich jedoch. Die Fassadenbrandprüfung nach DIN 4102-20 [12] weist über die komplette Prüfzeit von 20 Minuten eine Leistung im Mittel von ca. 360 kW sowie die europäische Fassadenbrandprüfung ([3], [20]) von ca. 300. Sekunde bis zur 900. Sekunde eine Leistung im Mittel von ca. 500 kW auf.

Zusammenfassend erscheint es plausibel, dass mit der 30 kg Holzkippe an Außenwandbekleidungssystemen ein ähnliches Schädigungsbild wie mit dem Gasbrenner nach DIN 4102-20 [12] erzeugt werden kann. Da die Untersuchungen mit dem Gasbrenner

nach DIN 4102-20 [12] ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungsmethoden zum Nachweis der nationalen Schutzziele darstellen, wird dies mit der 30 kg Holzkrippe in der Regel auch möglich sein. Diese Aussage muss aber vor dem Hintergrund gesehen werden, wie sich die Brandwirkung dieser beiden Prüffeuer ähnelt und wie nicht. Insbesondere die längere Beanspruchungsdauer mit max. Leistung über die vollständige Prüfzeit mittels Gasbrenner könnte bei einigen Außenwandbekleidungs-systemen zu einem anderen Schädigungsbild führen als bei der Holzkrippe.

Beim Vergleich des kritischen Raumbrandszenarios und den Medium-Exposure-Tests konnte keine Gleichwertigkeit hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Fassade festgestellt werden, sodass beide Prüffeuer in den Medium-Exposure-Tests nur als skalierte Brandbeanspruchung einzustufen sind. Die Anwendung des Medium-Exposure-Tests bedarf daher in Abhängigkeit von der Art der zu prüfenden Außenwandbekleidung einer vorherigen Validierung, wie sie beispielsweise in [26] erfolgt ist.

Bei den Large-Exposure Brandversuchen zeigten sich große Unterschiede zwischen der europäisch geplanten Fassadenbrandprüfung nach ([3], [20]) und der Sockelbrandprüfung nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand: 2021-11) [13]. Die thermische Beanspruchung der Prüfwand ist in der Sockelbrandprüfung deutlich ausgeprägter im Bereich der Innenecke, der Eckwand und im Sockelbereich gegenüber der europäischen Large-Exposure Fassadenbrandprüfung. Diese wiederum zeigt eine deutlich ausgeprägte thermische Beanspruchung auf der Rückwand oberhalb der Brandkammeröffnung. Ein erhöhter ECKEINFLUSS auf die Innenecke und Eckwand konnte in der europäischen Large-Exposure Fassadenbrandprüfung nicht festgestellt werden.

Die gesamtthermische Beanspruchung fällt bei der europäischen Large-Exposure Fassadenbrandprüfung im Vergleich zur Large-Exposure Sockelbrandprüfung höher aus. Dies ist auf die zwei unterschiedlichen Flammenbilder und die verwendeten unterschiedlichen Holzkrippen einschließlich der Anordnung der Prüffeuer in den Prüfmethoden zurückzuführen. Beim europäischen Large-Exposure Brandversuch lehnt sich die Flamme ab einer gewissen Höhe oberhalb der Brandkammer an die Rückwand an. Bei der Large-Exposure Sockelbrandprüfung verlaufen die Flammen oberhalb der Holzkrippe nahezu parallel zur Rück- und Eckwand. Dies ist wiederum auf die günstigen Strömungsverhältnisse der aufgeständerten Holzkrippe auf einem luftdurchlässigen Gitterrost und dem Abstand zur Prüfwand von 10 cm zurückzuführen.

Bei Brandprüfungen mit brennbaren Außenwandbekleidungen ist bei Sockelbrandprüfungen zu erwarten, dass durch das mögliche Mitbrennen der Außenwandbekleidung die Flammen des Prüffeuers sich mit den Flammen der brennenden Außenwandbekleidung vereinen und so zu einer deutlich höheren thermischen Beanspruchung der Außenwandbekleidung führen,

als dies im Brandversuch an der unbekleideten Prüfwand beobachtet wurde. Dies ist beim Mitbrennen einer Außenwandbekleidung auf die fehlende bzw. reduzierte Luftschicht als kühlende und frischlufteinmengende Barriere zwischen den Flammenkörpern des Prüffeuers und des Prüfkörpers zurückzuführen.

Die Brandversuche für die geplante europäische Large-Exposure Fassadenbrandprüfung nach ([3], [20]) haben gezeigt, dass ein kritisches Raumbrandszenario hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Fassade durch dieses ausreichend abgedeckt wird.

Das Sockelbrandprüfverfahren untersucht das Brandverhalten von Außenwandbekleidungen am Fuß des Gebäudes oder ähnlichen örtlichen Gegebenheiten. Die Brandbeanspruchung erfolgt daher ausschließlich außerhalb des Gebäudes an der Oberfläche der Außenwand.

Der geplante europäische Large-Exposure-Test hingegen simuliert die Brandbeanspruchung einer Außenwandbekleidung infolge eines Raumbrandes. Infolgedessen schlagen die Flammen unmittelbar über den Sturzbereich auf die Außenwandbekleidung. Somit erfolgt die maßgebliche Flammenbeanspruchung in unterschiedlichen Fassadenbereichen. Ein Vergleich der Beanspruchungen im betrachteten lokalen Bereich lässt daher keinen eindeutigen Vergleich zu, wobei im Gegensatz die Gesamtbeanspruchung auf der Oberfläche ein Vergleichswert liefert.

5 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben „Zum Sicherheitsniveau der deutschen Fassadenbrandprüfverfahren“ beinhaltet die wesentlichen Themenabschnitte „schwerentflammbare Außenwandbekleidungen“ und nationale Fassadenbrandprüfverfahren im Vergleich mit den aktuell europäisch entwickelten Fassadenbrandprüfverfahren.

Zunächst wurde der Stand der Technik und Forschung ausgearbeitet. Dabei wurden die drei wesentlichen Brandszenarien, die zu einer Brandbeanspruchung der Fassade führen, dargestellt. Es wurden die nationalen bauordnungsrechtlichen Anforderungen und Schutzziele sowie die nationalen und europäisch geplanten Fassadenbrandprüfungen erläutert. Auf Grundlage der nationalen Fassadenbrandprüfverfahren werden die bauordnungsrechtlichen Anforderungen und Schutzziele momentan nachgewiesen. Die Untersuchungen des Forschungsvorhabens und dessen Ergebnisse sollen eine Grundlage für die weitere Diskussion bilden, ob und wie weit die künftigen europäischen Prüfverfahren die derzeit national angewandten Verfahren ersetzen oder zumindest ergänzen können.

Die vier Fassadenbrandprüfverfahren im Überblick:

1. Europäisch geplanter Medium-Exposure-Test mit einer ca. 30 kg Holzkrippe ([3], [20])
2. Nationaler Medium-Exposure-Test nach DIN 4102-20 [12] mit Gasbrenner
3. Europäisch geplanter Large-Exposure-Test mit einer ca. 350 kg Holzkrippe ([3], [20])
4. Nationale Large-Exposure Sockelbrandprüfung mit einer ca. 200 kg Holzkrippe nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand: 2021-11) [13]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden so genannte Kalibrierversuche, also nur der Brand der Normbrandquelle ohne einen Prüfkörper, durchgeführt. Bei den Fassadenbrandprüfverfahren wurde für die Medium-Exposure- und Large-Exposure-Prüfverfahren jeweils die identische Messinstrumentierung verwendet. Die Standard-Instrumentierung mit Mantel-Thermoelementen wurde 20 mm vor der Oberfläche der Prüfstandwand angeordnet. Zusätzlich wurde ein räumliches Messraster angeordnet, auf dessen Grundlage die räumliche Flammenausbildung in den einzelnen Brandversuchen erfasst wurde.

Die Einwirkung der Laboruntersuchungen der DIN 4102-1 [7] sowie der Fassadenbrandprüfverfahren der DIN 4102-20 [12] und der DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand 2021-11) [13] beschreiben das Vorgehen zum Erreichen des deutschen Sicherheitsniveaus von Außenwandbekleidung.

Die Auswertungen zu den Medium-Exposure-Prüfverfahren haben gezeigt, dass sich das geplante europäische Fassadenbrandprüfverfahren mit einer 30 kg Holzkrippe nach ([3], [20]) und die Fassadenbrandprüfung mit Gasbrenner nach DIN 4102-20 [12] hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Prüfwand sehr ähneln, wobei die Gasbrennerversuche

insgesamt geringfügig höhere Beanspruchungen über die Zeit aufgezeigt haben und die maximale Wärmefreisetzung der Holzkrippe höher ist.

Zusammenfassend erscheint es plausibel, dass mit der 30 kg Holzkrippe an Außenwandbekleidungssystemen ein ähnliches Schädigungsbild wie mit dem Gasbrenner nach DIN 4102-20 [12] erzeugt werden kann. Da die Untersuchungen mit dem Gasbrenner nach DIN 4102-20 [12] ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungsmethoden zum Nachweis der nationalen Schutzziele darstellen, wird dies mit der 30 kg Holzkrippe in der Regel auch möglich sein. Diese Aussage muss aber vor dem Hintergrund gesehen werden, wie sich die Brandwirkung dieser beiden Brandquellen ähnelt und wie nicht. Insbesondere die längere Beanspruchungsdauer mit max. Leistung über die vollständige Prüfzeit mittels Gasbrenner kann bei einigen Außenwandbekleidungssystemen zu einem anderen Schädigungsbild führen als bei der Holzkrippe.

Das häufiger auftretende Brandereignis an Fassaden ist ein Brand im Gebäude mit aus einem Fenster schlagender Flamme. In der Regel treten Flammen bei einem Raumbrand nur in der Vollbrandphase aus dem Fenster aus. Ein Vollbrand und die entsprechende thermische Beanspruchung der Fassadefläche werden aber mit den Medium-Exposure-Prüfverfahren nicht abgebildet. Die thermische Beanspruchung nimmt bei den Medium-Exposure-Test, gegenüber einem Raumbrand, über die Höhe deutlich schneller ab. Es wird jedoch eine hohe thermische Beanspruchung des Sturzbereichs abgebildet, der durchaus einer realen Sturzbeanspruchung bei einer Fensteröffnung von 1 m Breite ähnelt.

Die Medium-Exposure-Prüfverfahren genügen aber nicht, um die Brandsicherheit einer flächigen Außenwandbekleidung mit unbekanntem Materialverhalten zu untersuchen sowie ein kritisches Raumbrandszenario zu simulieren. Über die Beanspruchung hinaus ist entscheidend, dass auch die Bewertungskriterien gleich sind. Die Anwendung des Medium-Exposure-Prüfverfahrens bedarf daher in Abhängigkeit von der Art der zu prüfenden Außenwandbekleidung einer vorherigen Validierung, wie sie beispielsweise in [26] zu bestimmten Außenwandbekleidungssystemen erfolgt ist.

Die Beanspruchung des europäischen Large-Exposure-Tests ist gegenüber den Medium-Exposure-Test wesentlich höher, sowohl am Sturz als auch in der Maximalbeanspruchung, also auch in der Größe der Fläche der moderaten Beanspruchung. Bei identischen Bewertungskriterien deckt ein europäischer Large-Exposure-Test die erreichte Schädigung und damit die untersuchte Sicherheit gegenüber einem Medium-Exposure-Test ab.

Die Brandversuche für den geplanten europäischen Large-Exposure-Test nach ([3], [20]) haben gezeigt, dass auch ein kritisches Raumbrandszenario hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Fassade durch dieses ausreichend abgedeckt wird.

Mit der Prüfung nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung – Stand 2021-11) [13] wird eine

begründbare Brandbeanspruchung für das Sockelbrandszenario und ihre thermische Einwirkung auf die Fassadenkonstruktionen untersucht. Das hierdurch erreichte Schutzniveau ist für dieses Brandereignis sicher [17].

Die Untersuchungen mit dem Large-Exposure Fassadenbrandprüfverfahren haben gezeigt, dass das europäische Large-Exposure-Prüfverfahren und das nationale Large-Exposure Sockelbrandprüfverfahren grundsätzlich zwei unterschiedliche Brandszenarien simulieren und somit auch zwei unterschiedliche thermische Beanspruchungen der Prüfwand erzeugen.

Das Sockelbrandprüfverfahren untersucht das Brandverhalten von Außenwandbekleidungen am Fuß des Gebäudes oder ähnlichen örtlichen Gegebenheiten. Die Brandbeanspruchung erfolgt daher ausschließlich außerhalb des Gebäudes an der Oberfläche der Außenwand. Der geplante europäische Large-Exposure-Test hingegen simuliert die Brandbeanspruchung einer Außenwandbekleidung infolge eines Raumbrandes. Infolgedessen schlagen die Flammen unmittelbar über den Sturzbereich auf die Außenwandbekleidung. Somit erfolgt die maßgebliche Flammenbeanspruchung in unterschiedlichen Fassadenbereichen. Eine Gegenüberstellung der Beanspruchungen im betrachteten lokalen Bereich lässt daher keinen eindeutigen Vergleich zu, wobei im Gegensatz die Gesamtbeanspruchung auf der Oberfläche ein Vergleichswert liefert.

Die gesamtthermische Beanspruchung fällt bei der europäischen Large-Exposure Fassadenbrandprüfung gegenüber der Large-Exposure Sockelbrandprüfung höher aus. Dies ist auf die zwei unterschiedlichen Flammenbilder und die verwendeten unterschiedlichen Holzkippen einschließlich der Anordnung der Prüffeuer in den Prüfmethoden zurückzuführen. Beim europäischen Large-Exposure Brandversuch lehnt sich die Flamme ab einer gewissen Höhe oberhalb der Brandkammer an die Rückwand an. Bei der Large-Exposure Sockelbrandprüfung verlaufen die Flammen oberhalb der Holzkippe nahezu parallel zur Rück- und Eckwand der Prüfwand. Dies ist wiederum auf die günstigen Strömungsverhältnisse der aufgeständerten Holzkippe auf einem luftdurchlässigen Gitterrost und dem Abstand zur Prüfwand von 10 cm zurückzuführen.

Bei einer Brandprüfung mit einem mitbrennenden Außenwandbekleidungs-systems ist zu erwarten, dass sich die Flamme aus dem Prüffeuer in der Sockelbrandprüfung deutlich mehr an die Prüfwand anlehnt und resultierend eine höhere thermische Brandbeanspruchung als in den durchgeführten Brandversuchen erzeugt. Somit würde sich die flächige Gesamtbeanspruchung der nationalen Large-Exposure Sockelbrandprüfung bei Brandversuchen mit brennenden Außenwandbekleidungen, gegenüber dem europäischen Large-Exposure-Test, bei dem das Prüffeuer schon auf der Prüfwand anliegt, nochmal erhöhen. Die Gesamtbeanspruchung auf der Oberfläche zwischen der europäischen Large-Exposure Fassadenbrandprüfung und der Large-Exposure Sockelbrandprüfung würde sich

zunehmend annähern. Zurückzuführen ist dies beim Mitbrennen einer Außenwandbekleidung auf die fehlende bzw. reduzierte Luftschicht als kühlende und frischlufteinmengende Barriere zwischen den Flammenkörpern des Prüfgebers und des Prüfkörpers.

Der viel diskutierte Ansatz, dass die europäische Large-Exposure Fassadenbrandprüfung auch die Large-Exposure Sockelbrandprüfung abdeckt, konnte auf Grundlage der durchgeführten Brandversuche und deren Vergleichsauswertungen nicht nachgewiesen werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Abschlussbericht: Brandverhalten von Wärmedämm-Verbundsystemen mit Polystyrol-Dämmstoff Untersuchung des Brandverhaltens von WDVS bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich, DIBt-Geschäftszeichen: P-52-5-4.192-1461/14, 1. Ausfertigung vom 09.08.2016
- [2] Arrêté du 24 mai 2010 portant approbation de diverses dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public, Journal officiel de la République Française du 6 juillet 2010, texte 31
- [3] Assessment of fire performance of facades Draft revision 2, Date: November 2020
- [4] BS 8414-1:2015-04: Fire performance of external cladding systems – Part 1: Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building
- [5] BS 8414-1:2020-04: Fire performance of external cladding systems – Part 1: Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt: Bauministerkonferenz Merkblatt, Empfehlungen zur Sicherstellung der Schutzwirkung von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) aus Polystyrol; Stand 18.06.2015
- [7] DIN 4102-1: 1998-05: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [8] DIN EN 13501-1:2019-05: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten
- [9] DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke
- [10] DIN EN 1991-1-2:2010-12: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009
- [11] DIN EN 60584-1:2014-07: Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen
- [12] DIN 4102-20:2017-10 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen

- [13] DIN 4102-24:2021-11 Arbeitsfassung (nicht veröffentlicht): Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 24: Prüfung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen unter Berücksichtigung des Sockelbrandszenarios
- [14] Dissertation: Ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen, Merkewitsch, T., 2019
- [15] Fachbereich Feuerwehren, Hilfelistungen, Brandschutz, DGUV: 0.1 Brände von Dämmsystemen, Hinweise zur Arbeitssicherheit, Stand 12/2012
- [16] Feuerwehr Frankfurt am Main: Zusammenstellung von Brandereignissen in Verbindung mit WDVS im Auftrag von AGBF-Hessen, AGBF-Bund, Deutscher Feuerwehrverband e.V.; Stand Juni 2018
- [17] Forschungsbericht Brandverhalten von Wärmedämmverbundsystemen mit Polystyrol-Dämmstoff. Untersuchung des Brandverhaltens von WDVS bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich, Hauswaldt, S.; Rademacher, H.; Riese, O.; Kotthoff, I.; Rogge, A., 2016
- [18] Gülde, R. Beurteilung der Brandeinwirkung eines Raumbrandes, 2015
- [19] Hauswaldt, Sebastian & Kaudelka, Sven. (2017). Schutzzielbetrachtungen zum Brandverhalten von Außenwandbekleidungen (Teil 2). Bauphysik. 39. 335-339. 10.1002/bapi.201710039.
- [20] <https://www.ri.se/en/what-we-do/projects/finalisation-of-the-european-approach-to-assess-the-fire-performance-of-facades> - **Stand 10.12.2021**
- [21] Kordina, K.; Jeschar, R.; Bechtold, R.; Ehlert, K.-P.; Wesche, J.: Brandversuche Lehrte, Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung“ des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Nr. 04.037, 1978, Bonn-Bad Godesberg Ausgabe 1978
- [22] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C: Holz-Brandschutz-Handbuch, 1994
- [23] Kotthoff, I.: Brandausbreitung über die Fassade (Schutzziele), FeuerTRUTZ Brandschutzkongress Nürnberg am 21. und 22. Februar 2018
- [24] Kunze, C.: Schadensprisma Nr. 4 – Herleitung des Gebäudeabstandes unter dem Aspekt der Brandausbreitung, 1987
- [25] Kunze, C.; Thiel, N.: Brandausbreitung durch Feuerüberschlag an der Fassade; Schadenprisma Ausgabe 2/1988
- [26] MFPA Leipzig e.V.: Forschungsbericht BI5-8001 96-18 zur Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B1-Fassadensystemen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandabläufen an Fassaden vom 03.10.2000
- [27] MFPA Leipzig GmbH: Kurzbericht Nr. 3.2/13-253-3Ä zum Kalibrierungsversuch 3 vom 29.11.2013 im Rahmen des Forschungsthemas F3.2/13-253

- „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“; Stand 26. September 2014
- [28] MFPA Leipzig GmbH: Kurzbericht Nr. 3.2/13-253-5Ä zum Kalibrierungsversuch 5 vom 29.11.2013 im Rahmen des Forschungsthemas F3.2/13-253 „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“; Stand 26. September 2014
- [29] MFPA Leipzig GmbH: Kurzbericht Nr. 3.2/13-253-5Ä zum Kalibrierungsversuch 6 vom 06.12.2013 im Rahmen des Forschungsthemas F3.2/13-253 „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“; Stand 26. September 2014
- [30] MFPA Leipzig GmbH: Untersuchungsbericht Nr. 3.2/13-253-1 - Originalmaßstäblicher Brandversuch an dem Wärmedämm-Verbundsystem „StoTherm Classic“ im Rahmen des Forschungsvorhabens „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“ unter Verwendung einer EPS-Dämmung DIN 4102-B1 - in einer Dicke von 300 mm; zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen und einem dispersionsgebundenem Putzsystem; Stand 28. März 2014
- [31] MFPA Leipzig GmbH: Versuchsprotokolle Rohdaten zu den Brandversuchen V1 bis V3 mit 30 kg Holzkrippe (Medium Fire Exposure)
- [32] MFPA Leipzig GmbH: Versuchsprotokolle Rohdaten zu den Brandversuchen V4 bis V6 mit Propangas-Brenner – Din 4102-20 (Medium Fire Exposure)
- [33] MFPA Leipzig GmbH: Versuchsprotokolle Rohdaten zu den Brandversuchen V7 bis V9 bis mit 350 kg Holzkrippe (Large Fire Exposure)
- [34] MFPA Leipzig GmbH: Versuchsprotokolle Rohdaten zu den Brandversuchen V10 bis V12 mit 200 kg Holzkrippe – Sockelbrand (Large Fire Exposure)
- [35] Musterbauordnung – MBO – November 2002 zuletzt geändert mit dem Beschluss der Bauministerkonferenz vom 25.09.2020
- [36] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise (MHolzBauRL), Fassung Oktober 2020
- [37] Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR), Fassung April 2008
- [38] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung – MVKVO) Fassung September 1995; zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014
- [39] MVV-TB Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen, DIBt, 2020/1

- [40] Stein, J.: AGBF bund im Deutschen Städtetag; Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten; vom 16. September 1998, Fortschreibung vom 19. November 2015

- [41] Vds 2021:2010-01: Unverbindlicher Leitfaden für ein umfassendes Schutzkonzept, Baustellen

- [42] Wilk, E; Kotthoff, I.; Hegemann, K.: Der Brand in Räumen – Flammen vor und über der Brandraumöffnung – Teil 9-1, vfdb Zeitschrift 4/2016

- [43] Wilk, E; Kotthoff, I.; Hegemann, K.: Der Brand in Räumen – Fortsetzung; Temperaturverteilung in der Flamme an und über der Brandraumöffnung – Sonderszenarien der Flamme – Teil 9-1, vfdb Zeitschrift 1/2017

7 Anlagen

7.1 Vergleich der Fassadenbrandprüfverfahren

In der folgenden Tabelle 7-1 werden noch einmal alle Prüfaufbauten vergleichend gegenübergestellt. An den rot markierten Stellen wird von dem bisherigen Stand der Prüfvorschriften abgewichen bzw. sind noch Angaben zu diesen ausstehend.

In Tabelle 7-2 werden anschließend die Versuchsdauern sowie die verschiedenen Bewertungskriterien gegenübergestellt.

Tabelle 7-1: Vergleich der Prüfaufbauten im Forschungsvorhaben „Sicherheitsniveau der deutschen Fassadenbrandprüfverfahren“

Vergleichskriterien	Nationale Prüfverfahren		Europäische Prüfverfahren (Planungsstand 2021-11)	
	DIN 4102-20: 2017-10 [12]	DIN 4102-24 (Arbeitsfassung) - Stand: 2021-11 [13]	Medium-Exposure-Test ([3], [20])	Large-Exposure-Test ([3], [20])
Versuchsstand Material:	Soll: $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ – Ist: Porenbeton 600 kg/m^3	Porenbeton 600 kg/m^3	Soll: Porenbeton $\geq 650 \pm 250 \text{ kg/m}^3$ – Ist: Porenbeton 600 kg/m^3	
Dicke:	Soll: $\geq 150 \text{ mm}$ – Ist: 240 mm	240 mm	Soll: 200 mm – Ist: 240 mm	Soll: 200 mm – Ist: 240 mm
Höhe:	Soll: $\geq 5,5 \text{ m}$ – Ist: 9,8 m	9,8 m	Soll: $\geq 7,5 \text{ m}$ – Ist: 9,8 m	Soll: $\geq 8,5 \text{ m}$ – Ist: 9,8 m
Breite langer Flügel:	Soll: $\geq 2,5 \text{ m}$ – Ist: 4,0 m	4,0 m	Soll: Unbekannt – Ist: 4,0 m	Soll: Unbekannt – Ist: 4,0 m
Breite kurzer Flügel:	Soll: $\geq 1,5 \text{ m}$ – Ist: 2,5 m	2,5 m	Soll: Unbekannt – Ist: 2,5 m	Soll: Unbekannt – Ist: 2,5 m
Brandkammer Breite:	1,0 m	keine Brandkammer vorhanden	1,0 m	2,4 m
Höhe:	1,0 m		1,0 m	Soll: 2,2 m – Ist: 2,15 m
Tiefe:	0,8 m		0,8 m	Soll: 1,3 m – Ist: 1,15 m
Brandkammeröffnung (B x H):	1,0 x 1,0 m ²		1,0 x 1,0 m ²	2,0 x 2,0 m ²
Auskleidung:	Keramikwolle		Keramikwolle	Keramikwolle
Besonderheiten:	keine		Mittig in der Rückwand (Ist: mittig an der Unterkante der Rückwand) befindet sich ein Loch mit einem Durchmesser von 300 mm zur Belüftung der Krippe ab der 5. Prüfminute mit $400 \pm 40 \text{ m}^3/\text{h}$ Frischluft	Sturz an der Oberseite mit 0,2 m Höhe und 0,15 m Dicke (Ist: H x D = 0,15 x 0,20) Wandabschnitte an den Seiten mit 0,2 m Breite und 0,15 m Dicke (Ist: 0,20 x 0,20)
Position der Brandkammer auf dem langen Flügel:	0,5 m über Prüfraumboden direkt in der Innenecke des Prüfstandes		0,5 m über Prüfraumboden direkt in der Innenecke des Prüfstandes	0,5 m über Prüfraumboden mit einem Abstand von 0,25 m zwischen Innenecke Öffnung der Brandkammer

Fortsetzung Tabelle 7-1: Vergleich der Prüfaufbauten im Forschungsvorhaben „Sicherheitsniveau der deutschen Fassadenbrandprüfverfahren“

Vergleichskriterien	Nationale Prüfverfahren		Europäische Prüfverfahren (Planungsstand 2021-11)	
	DIN 4102-20: 2017-10 [12]	DIN 4102-24 (Arbeitsfassung) - Stand: 2021-11 [13]	Medium-Exposure-Test ([3], [20])	Large-Exposure-Test ([3], [20])
Brandlast				
Material:	Gasbrenner	Fichtenholz	Fichtenholz	Fichtenholz
Rohdichte Holz*:		475 ± 25 kg/m ³	Soll: 400 ± 25 kg/m ³ Ist: 475 ± 25 kg/m ³	Soll: 400 ± 25 kg/m ³ Ist: 475 ± 25 kg/m ³
Holzfeuchte*:		9 ± 1 %	11 ± 2 %	11 ± 2 %
Querschnitt Holzstäbe:		40 x 40 mm ²	40 x 40 mm ²	47 x 47 mm ²
Stablänge:		1100 mm	500 mm	1000 mm und 1500 mm
Grundfläche Holzkrippe:		1,1 x 1,1 m ²	0,5 x 0,5 m ²	1,5 x 1,0 m ²
Stabanzahl pro Lage:		14 Stk	6 Stk	10 und 15 Stk.
Krippenmasse:		200 kg	30 kg	350 kg
Vernagelung:		7 Nägel je Stab. Je ein Nagel an den Enden und 5 Nägel über die Länge gleichmäßig verteilt.	2 Nägel je Stab. Nägel mit einem Randabstand zu den Enden von 100 mm anordnen.	4 Nägel je Stab. Je ein Nagel an den Enden und 2 Nägel über die Länge gleichmäßig verteilt.
Zündinitial:	Bengalo	4 x 400 ml Isopropanol	2 x 200 ml Isopropanol	16 Streifen Holzweichfaserplatte 25 x 12 x 1000 mm ³ getränkt in 5 l Heptan
Unterbau der Brandlast:	Gasbrenner nach DIN 4102-20	200 mm hoher Gitterrostwagen	Gitterrost auf 4 Stahlfüßen mit einer Gesamthöhe von 200 mm	40 mm Kalziumsilikatplatten auf 6 Porenbetonsteinen mit einer Gesamthöhe von 400 mm
Position:	in der Brandkammer 30 mm seitlicher Abstand zur Innenecke 100 mm Abstand zur Vorderkante des Prüfstandes	vor dem Prüfstand je 100 mm Abstand zu langem und kurzem Flügel zusätzlich 250 mm erhöht durch die Wiegeeinrichtung	in der Brandkammer seitlich zentriert 100 mm Abstand zur Vorderkante des Prüfstandes	in der Brandkammer seitlich zentriert 100 mm Abstand zur Rückseite der Brandkammer
Abstand Oberkante Brandlast zum Prüfraumboden:	1,15 m	ca. 1,20 m	ca. 1,30 m	ca. 2,0 m

*Die tatsächlich gemessenen Rohdichten und Holzfeuchten der einzelnen Krippen zum Prüfzeitpunkt können den Tabellen in Abschnitt 3 entnommen werden.

Tabelle 7-2: Vergleich der Versuchsdauern und Leistungskriterien der Fassadenbrandprüfverfahren

Vergleichskriterien	Nationale Prüfverfahren		Europäische Prüfverfahren (Planungsstand 2021-11)	
	DIN 4102-20: 2017-10 [12]	DIN 4102-24 (Arbeitsfassung) - Stand: 2021-11 [13]	Medium-Exposure-Test ([3], [20])	Large-Exposure-Test ([3], [20])
Versuchsdurchführung	Versuchszeit:	mindestens 60 Minuten	mindestens 60 Minuten	60 Minuten
	Brandbeanspruchungsdauer:	20 Minuten	25 Minuten	22 Minuten
	Prüfbeginn:	Zündung des Brenners	Entzündung der letzten Isopropanolwanne	Zündung der Isopropanolwannen
	Besonderheiten:	keine	keine	Zuschalten der Lüftung nach der 4. Prüfminute
Leistungskriterien	vertikale Brandausbreitung:	Temperatur ≤ 500 °C in Messebene 8 (3,5 m über Brandkammer) und Brandschädigung $< 3,5$ m über Sturz und Flammen $< 3,5$ m über Sturz (Dauer max. 30 s)	Temperatur ≤ 500 °C an Bewertungsgrenze ca. 8,5 m und Brandschädigung $<$ Bewertungsgrenzen und Flammen $< 9,6$ m (Dauer max. 15 s)	Temperaturerhöhung ≤ 500 K in Messebene 1 (3,5 m über Brandkammer)
	horizontale Brandausbreitung:	keine Flammen ≥ 30 s und keine Brandschädigung an den Außenkanten beider Probenflügel	keine Flammen ≥ 15 s und keine Brandschädigung an Messachse A (2,7 m auf dem langen Flügel gemessen von der Innenecke des fertigen Prüfkörpers)	Temperaturerhöhung ≤ 500 K in Reihe 1 und 2 (2,75 m auf dem langen Flügel und 1,45 m auf dem kurzen Flügel gemessen von der Innenecke des fertigen Prüfkörpers)

Fortsetzung Tabelle 7-2: Vergleich der Versuchsdauern und Leistungskriterien der Fassadenbrandprüfverfahren

Vergleichskriterien		Nationale Prüfverfahren		Europäische Prüfverfahren (Planungsstand 2021-11)	
		DIN 4102-20: 2017-10 [12]	DIN 4102-24 (Arbeitsfassung) - Stand: 2021-11 [13]	Medium-Exposure-Test ([3], [20])	Large-Exposure-Test ([3], [20])
Leistungskriterien (Fortsetzung)	brennendes Abfallen/Abtropfen:	kein größerer Sekundärbrand auf dem Brandraumboden und das dieser nicht wesentlich über das Ende der Beflammungszeit bzw. des Brennens am Prüfkörper hinaus andauern darf.	kein Sekundärbrand innerhalb von 40 cm um die Primärbrandquelle andernfalls Einzelfallentscheidung	brennende „Pfütze“ auf dem Prüfraumboden $\leq \varnothing 50$ mm und mit einer Branddauer ≤ 20 s (kontinuierliches Brennen) oder ein Stück brennendes Material auf dem Prüfraumboden $\leq \varnothing 50$ mm und mit einer Brand- oder Glimmdauer ≤ 20 s (kontinuierlich)	
	nichtbrennendes Abfallen:	keine Kriterien / Einzelfallentscheidung	Einzelfallentscheidung	Teile ≤ 1 kg oder $\leq 0,1$ m ²	
	Bewertungs- zeitraum:	≥ 60 Minuten	≥ 60 Minuten	60 Minuten	
	Schwelen:	Brandschädigung $< 3,5$ m über Sturz und $<$ Außenkanten und Temperaturen < 50 °C innerhalb von 15 h nach Versuchsbeginn	keine Kriterien	nur optional noch keine Kriterien festgelegt	
	Sonstiges	keine	Sichtbare Flammen am Probekörper verlöschen von selbst innerhalb der Versuchszeit	keine	optional: Prüfung des Deckenanschlusses an die Fassadenkonstruktion (noch keine Kriterien festgelegt)
	Ergebnis:	schwerentflammbar, wenn alle Kriterien erfüllt	schwerentflammbar, wenn alle Kriterien erfüllt	LS3 (alle Kriterien erfüllt) LS4 (nur Kriterium der Brandausbreitung erfüllt)	LS1 (alle Kriterien erfüllt) LS2 (nur Kriterium der Brandausbreitung erfüllt)

7.2 Versuchsaufbau und -durchführung

7.2.1 Brandversuch – Vorbereitungen

Vorbereitung der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 nach ([3], [20])



Abb. 7-1: Brandkammerboden mit Wiegeeinrichtung und Zuluftöffnung in der Rückwand



Abb. 7-2: Maschinelle Belüftung und Messtechnik für die Wiegeeinrichtung



Abb. 7-3: Gitterrost in der Brandkammer und Isopropanolwannen



Abb. 7-4: Anordnung der Holzkrippe in der Brandkammer



Abb. 7-5: Anordnung der Messbäume.



Abb. 7-6: Die Thermoelemente an der Oberfläche stehen 20 mm vor die Prüfstandwand.



Abb. 7-7: Zuluftöffnung



Abb. 7-8: Abluftöffnung



Abb. 7-9: Darstellung des Gesamtprüfstandes vor Beginn der Prüfung

Vorbereitung Brandversuche V4 bis V6 nach DIN 4102-20 [12]



Abb. 7-10: Anordnung des Brenners in der Brandkammer



Abb. 7-11: Anordnung der Messbäume und Thermoelemente entspricht der Medium-Exposure-Tests.



Abb. 7-12: Zuluftöffnung

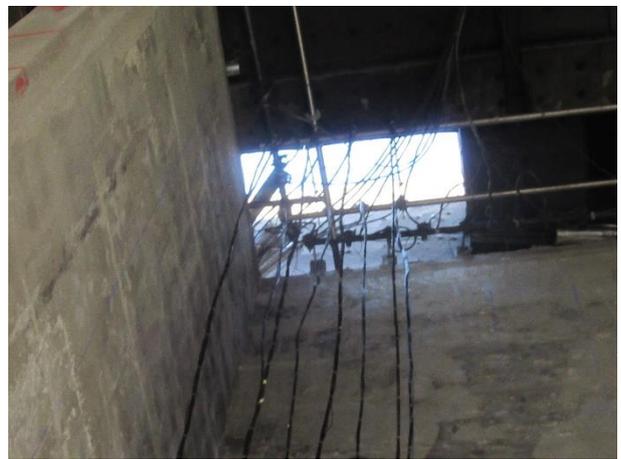


Abb. 7-13: Abluftöffnung

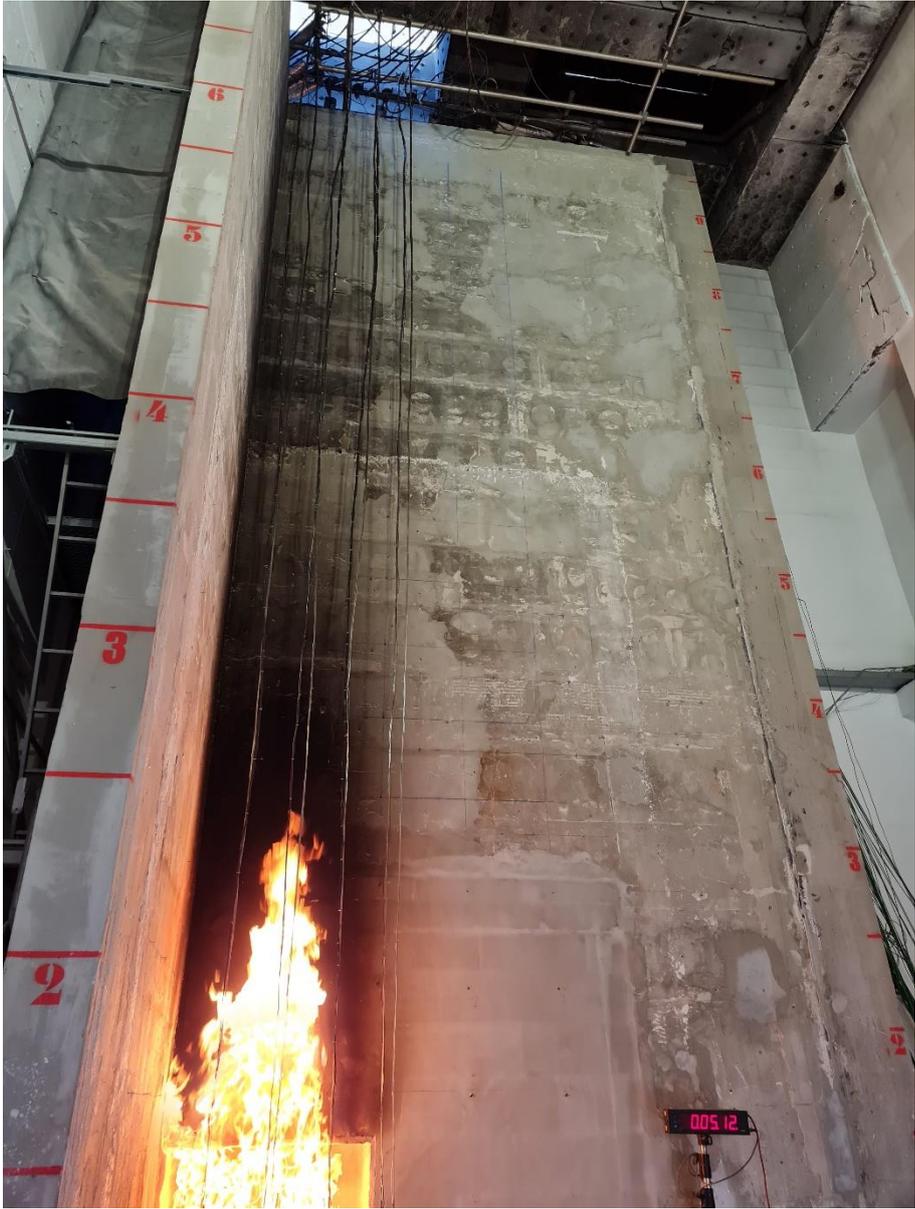


Abb. 7-14: Darstellung des Prüfstandes mit Abluftöffnung während der Prüfung

Vorbereitung der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 nach ([3], [20])

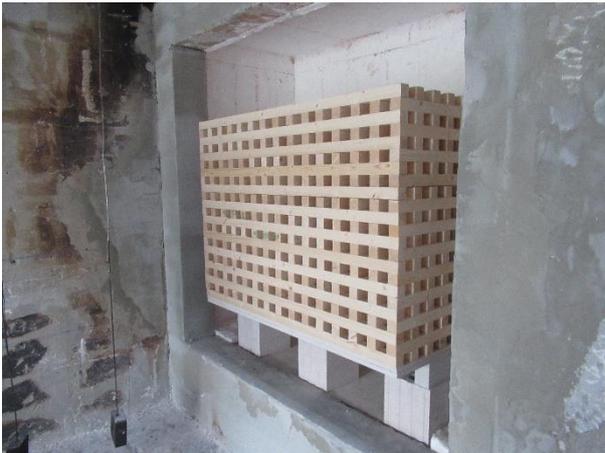


Abb. 7-15: Anordnung Holzkrippe in der Brandkammer



Abb. 7-16: Der Abstand der Holzkrippe zur Rückwand der Brandkammer beträgt 100 mm.



Abb. 7-17: Zum Tränken der Holzweichfaserplattenstreifen wird Terpentinersatz verwendet.



Abb. 7-18: Tränken der Holzweichfaserplattenstreifen.

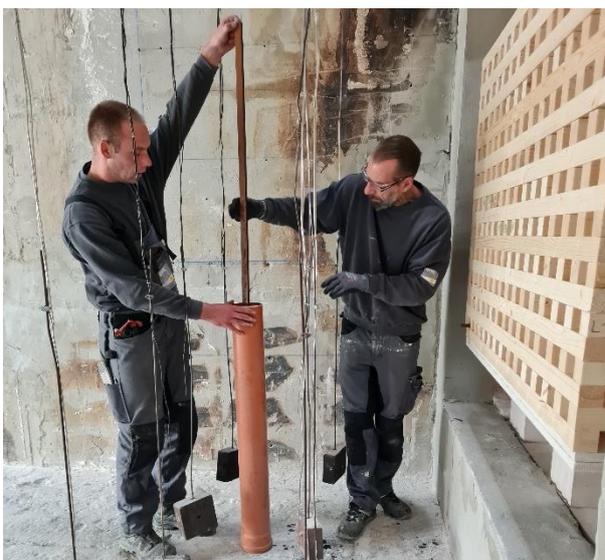


Abb. 7-19: Einlegen der Streifen.

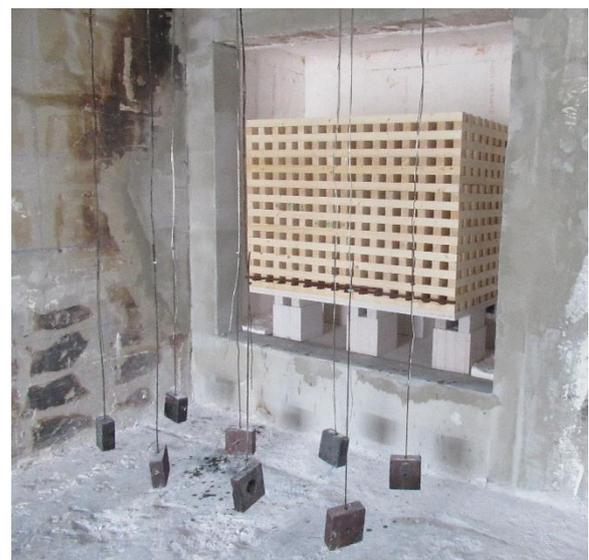


Abb. 7-20: Die Streifen sind in die Holzkrippe eingelegt.



Abb. 7-21: Zuluftöffnung



Abb. 7-22: Abluftöffnung bei Versuch 7



Abb. 7-23: Abluftöffnung bei Versuch 8 und 9



Abb. 7-24: Darstellung des Gesamtprüfstandes mit Abluftöffnung während der Prüfung 7

Vorbereitung des Large-Exposure-Tests V10 bis V12 nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung) [13]



Abb. 7-25: Wiegeeinrichtung in Form einer Palettenwaage.



Abb. 7-26: Die Palettenwaage wird mit der 1. Lage Kalziumsilikatplatten abgedeckt.



Abb. 7-27: Nach der 2. Lage Kalziumsilikatplatten wird der Rand mit Keramikwolle überklebt.



Abb. 7-28: Die Waage wird mit dem Gewicht des Gitterrostwagen und der Isopropanolwannen genullt.



Abb. 7-29: Aufsetzen der Holzkippe auf den Gitterrostwagen.



Abb. 7-30: Platzieren der Krippe mit Gitterrostwagen auf der Wiegeeinrichtung.



Abb. 7-31: Die Isopropanolwannen sind in der Holzkippe platziert.



Abb. 7-32: Auflegen zusätzlicher Holzstäbe, um das Gewicht von 200 kg zu erreichen.



Abb. 7-33: Einfüllen des Isopropanols in die Wannen.



Abb. 7-34: Zuluftöffnung



Abb. 7-35: Abluftöffnungen bei Versuch 10 und 11



Abb. 7-36: Abluftöffnung bei Versuch 12



Abb. 7-37: Darstellung des Prüfstandes vor Beginn der Prüfung.

7.3 Versuchsergebnisse

7.3.1 Bilder Brandversuch

Medium-Exposure-Tests V1 bis V3



Abb. 7-38: Start von Versuch 1.

Medium-Exposure-Tests V4 bis V6



Abb. 7-39: Start von Versuch 4.



Abb. 7-40: Ansicht Versuch 2 bei 2:00 Minuten.



Abb. 7-41: Ansicht Versuch 6 bei 1:55 Minuten.

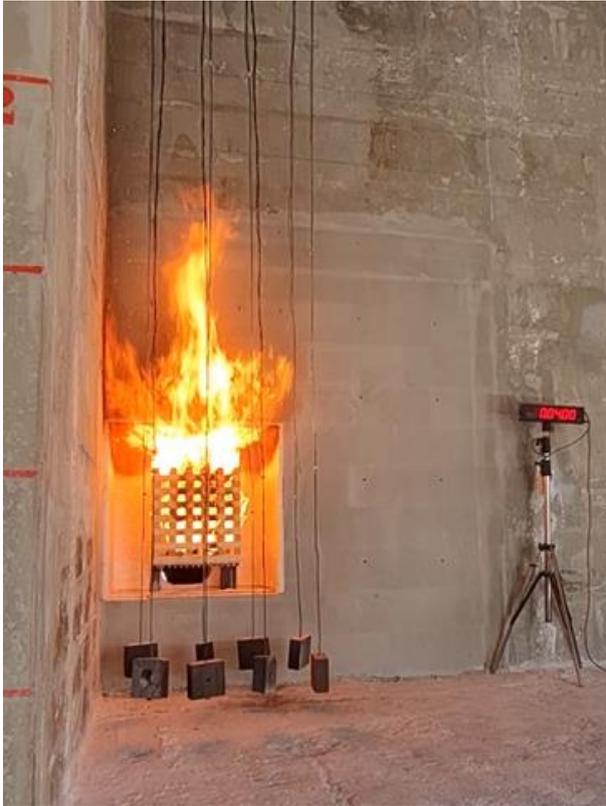


Abb. 7-42: Seitenansicht Versuch 1 bei 4:00 Minuten. Die Lüftung wird zugeschaltet.

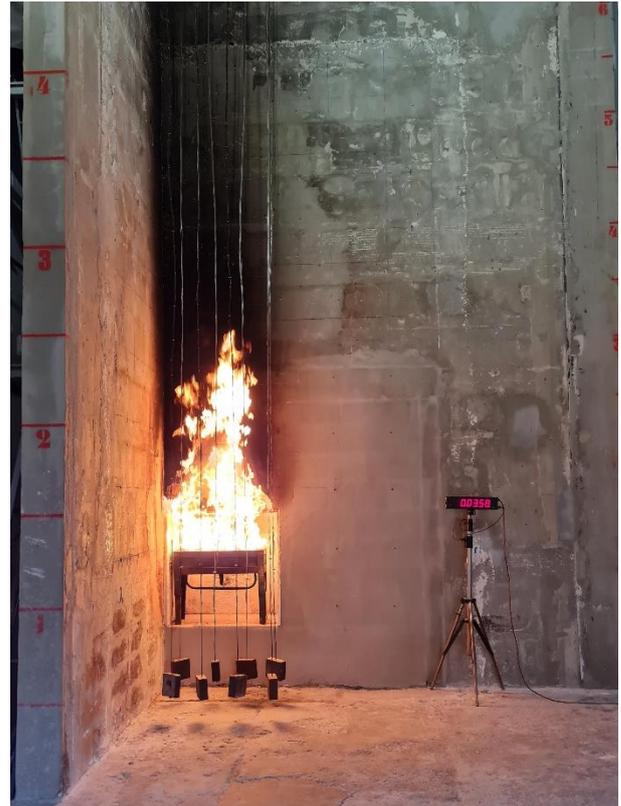


Abb. 7-43: Versuch 6 bei 3:58 Minuten.

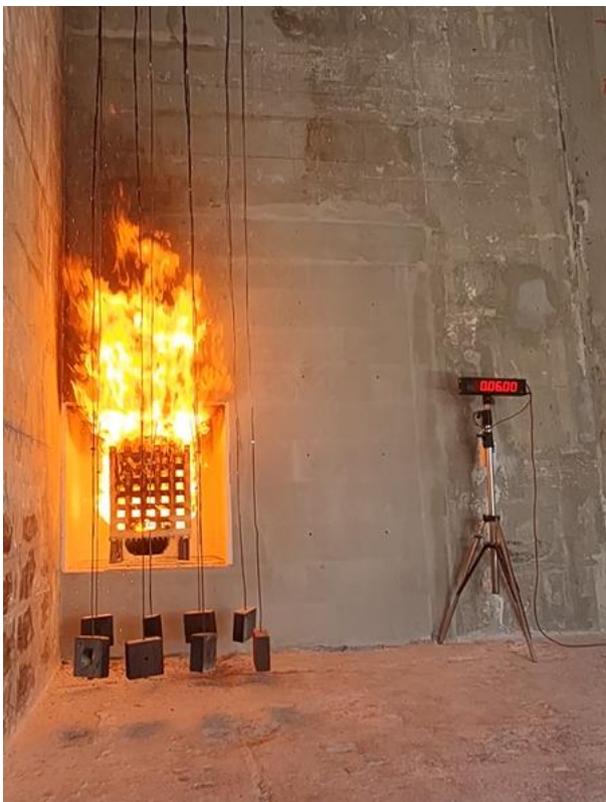


Abb. 7-44: Versuch 1 bei 6:00 Minuten.



Abb. 7-45: Versuch 6 bei 6:04 Minuten.

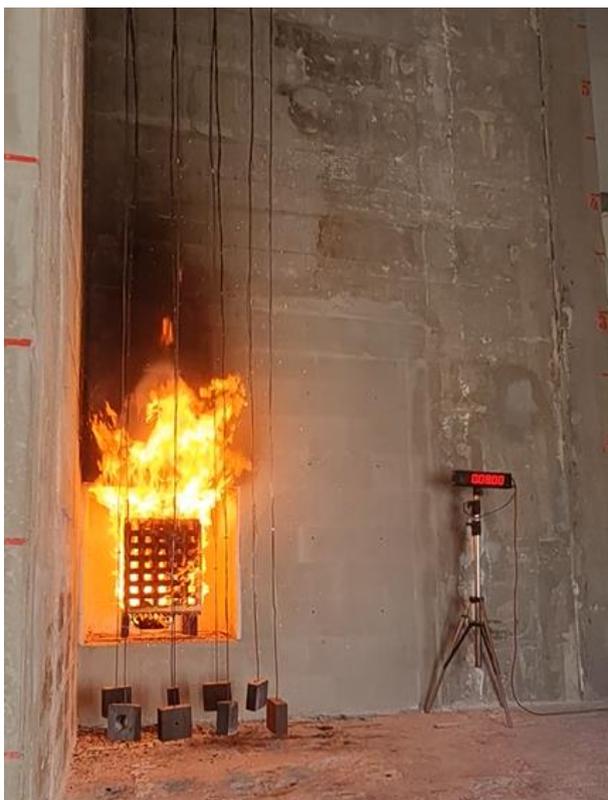


Abb. 7-46: Versuch 2 bei 8:00 Minuten.



Abb. 7-47: Versuch 4 bei 8:00 Minuten.



Abb. 7-48: Seitenansicht Versuch 1 bei 10:00 Minuten.



Abb. 7-49: Versuch 6 bei 10:00 Minuten.



Abb. 7-50: Versuch 1 bei 12:00 Minuten.



Abb. 7-51: Versuch 5 bei 12:02 Minuten.



Abb. 7-52: Versuch 1 bei 14:00 Minuten.



Abb. 7-53: Versuch 4 bei 14:04 Minuten.



Abb. 7-54: Versuch 2 bei 16:06 Minuten.



Abb. 7-55: Seitenansicht Versuch 6 bei ca. 16:00 Minuten.



Abb. 7-56: Versuch 2 bei 18:01 Minuten.

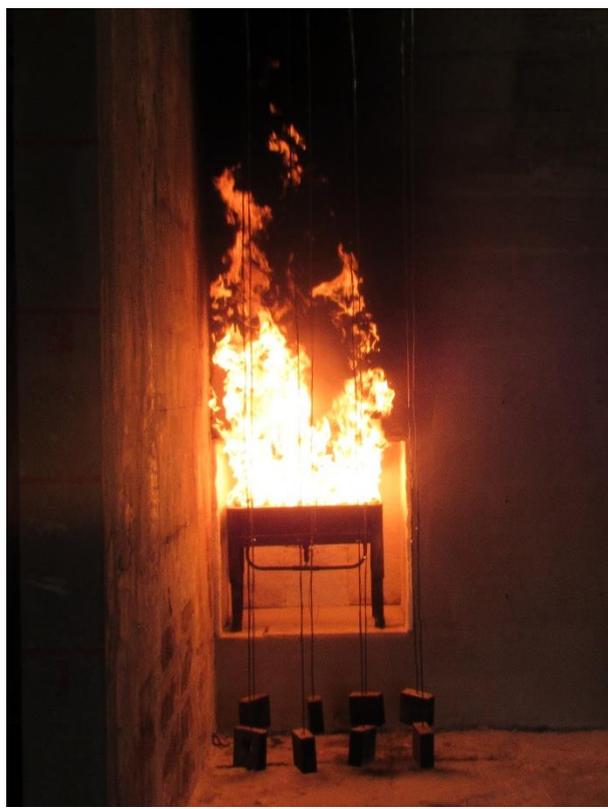


Abb. 7-57: Versuch 5 bei 18:03 Minuten.



Abb. 7-58: Versuch 2 bei 19:59 Minuten.



Abb. 7-59: Versuch 4 bei 20:00 Minuten. Brenner wird abgeschaltet.



Abb. 7-60: Versuch 1 bei 20:50 Minuten.



Abb. 7-61: Versuch 4 bei 20:10 Minuten.



Abb. 7-62: Versuch 1 bei 22:44 Minuten. Ein Brandversuch endet nach 22 Minuten.

Large-Exposure-Tests V7 bis V9



Abb. 7-63: Start von Versuch 7.

Large-Exposure-Tests V10 bis V12



Abb. 7-64: Start von Versuch 10.



Abb. 7-65: Versuch 8 bei 2:00 Minuten.



Abb. 7-66: Versuch 11 bei 2:00 Minuten.



Abb. 7-67: Versuch 7 bei 4:00 Minuten.



Abb. 7-68: Versuch 11 bei 4:01 Minuten.



Abb. 7-69: Versuch 1 bei 6:03 Minuten.



Abb. 7-70: Versuch 11 bei 6:00 Minuten.



Abb. 7-71: Versuch 8 bei 8:01 Minuten.



Abb. 7-72: Versuch 11 bei 7:55 Minuten.



Abb. 7-73: Seitenansicht Versuch 8 bei 10:01 Minuten.



Abb. 7-74: Versuch 11 bei 10:01 Minuten.



Abb. 7-75: Versuch 8 bei 12:01 Minuten.

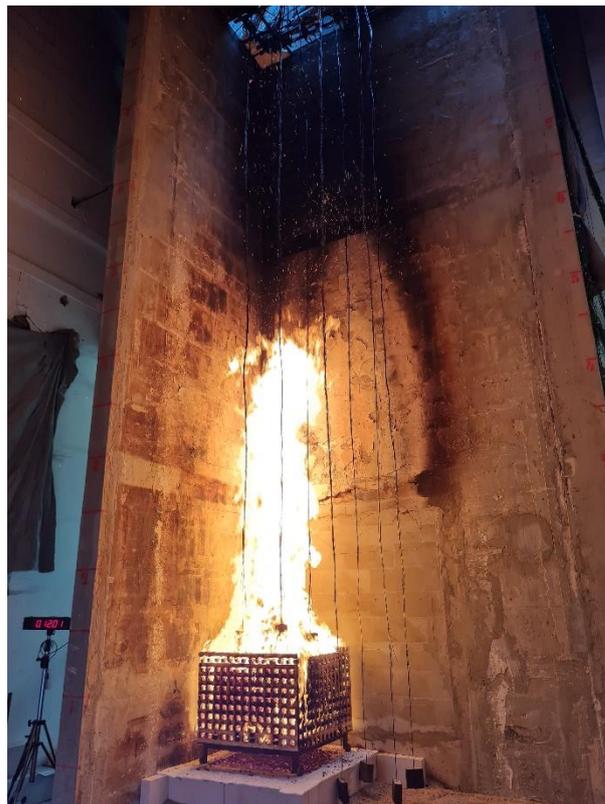


Abb. 7-76: Versuch 10 bei 12:01 Minuten.



Abb. 7-77: Versuch 7 bei 14:01 Minuten.



Abb. 7-78: Versuch 11 bei 14:00 Minuten.



Abb. 7-79: Versuch 8 bei 16:01 Minuten.



Abb. 7-80: Versuch 10 bei ca. 16:01 Minuten.



Abb. 7-81: Versuch 7 bei 18:05 Minuten.



Abb. 7-82: Versuch 11 bei 18:00 Minuten.



Abb. 7-83: Versuch 8 bei 20:09 Minuten.

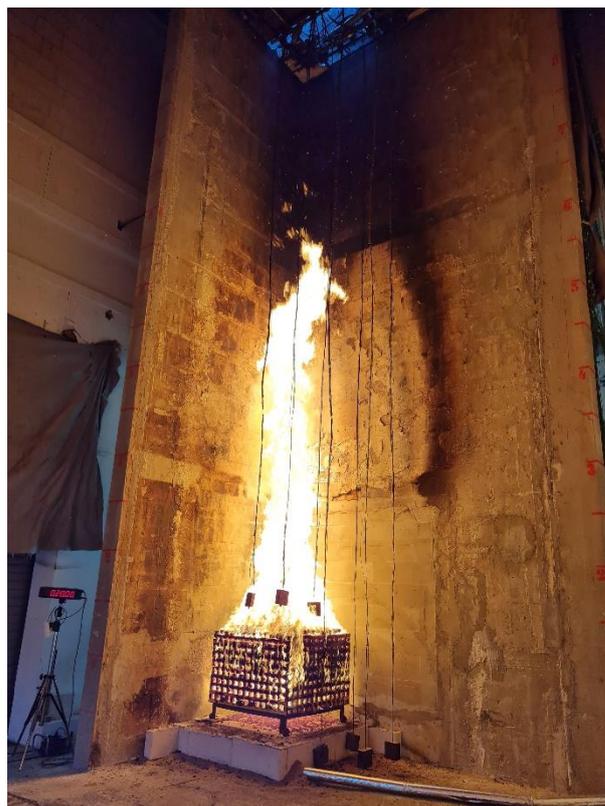


Abb. 7-84: Versuch 12 bei 20:00 Minuten.



Abb. 7-85: Versuch 8 bei 22:00 Minuten.



Abb. 7-86: Versuch 12 bei 22:06 Minuten.



Abb. 7-87: Versuch 8 bei 24:01 Minuten.



Abb. 7-88: Versuch 11 bei 24:02 Minuten.



Abb. 7-89: Versuch 8 bei 26:01 Minuten.

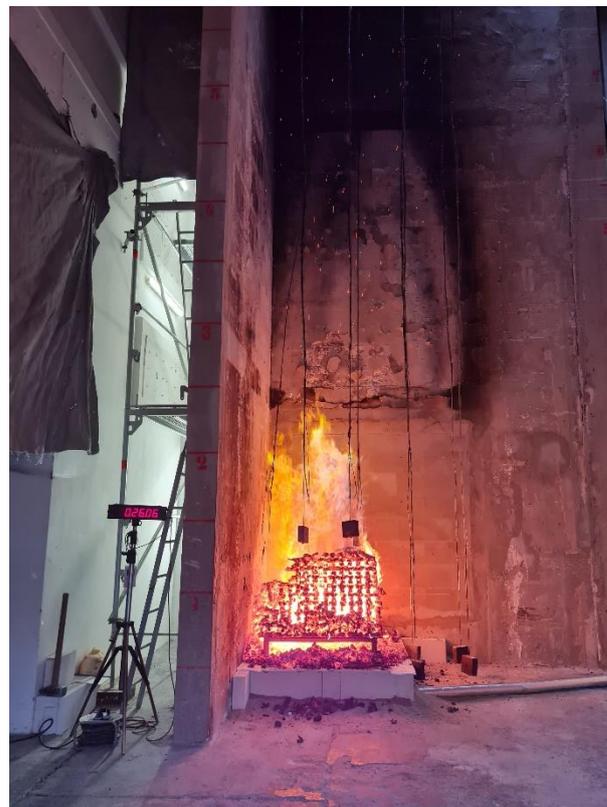


Abb. 7-90: Versuch 10 bei 26:06 Minuten. Ein normaler Brandversuch endet nach 25 Minuten.



Abb. 7-91: Versuch 8 bei 28:01 Minuten.



Abb. 7-92: Versuch 11 bei 28:05 Minuten.



Abb. 7-93: Versuch 8 bei 30:03 Minuten. Ein normaler Brandversuch endet nach 30 Minuten.



Abb. 7-94: Versuch 11 bei 30:01 Minuten.



Abb. 7-95: Versuch 7 bei 31:59 Minuten.



Abb. 7-96: Versuch 11 bei 32:09 Minuten.

7.3.2 Gegenüberstellung ausgewählter Bilder und Isothermen

Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 nach [3][20]



Abb. 7-97: Versuch 3 bei ca. 2:30 Minuten.

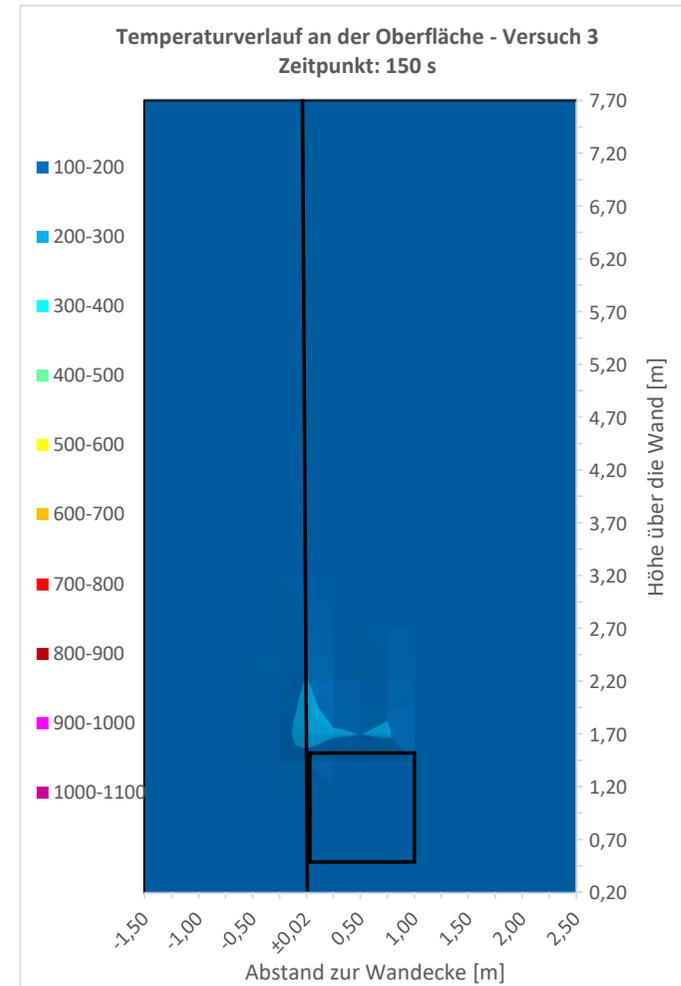


Abb. 7-98: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 150 s für Versuch 3.



Abb. 7-99: Versuch 1 bei ca. 5:00 Minuten.

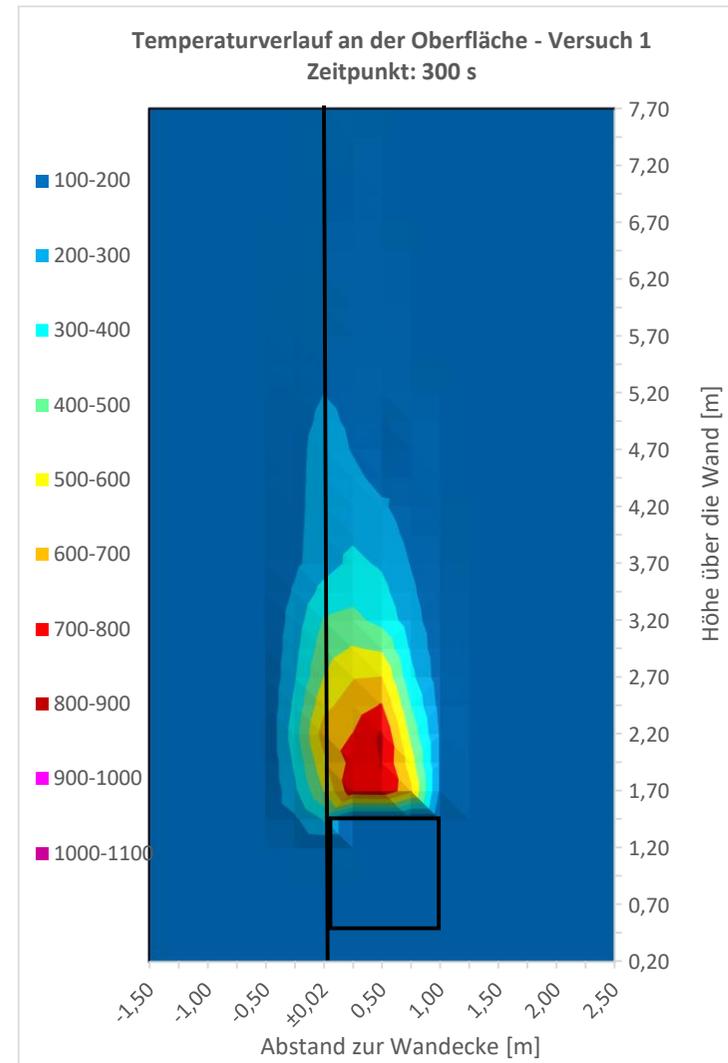


Abb. 7-100: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 300 s für Versuch 1.



Abb. 7-101: Versuch 3 bei ca. 10:00 Minuten.

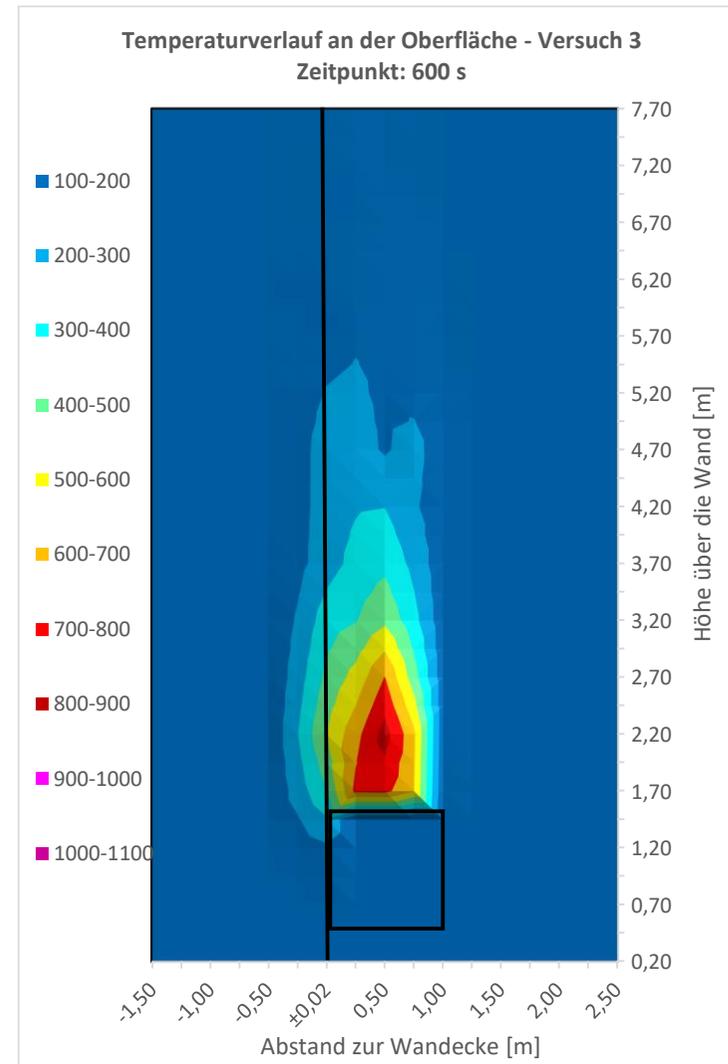


Abb. 7-102: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 600 s für Versuch 3.



Abb. 7-103: Versuch 3 bei ca. 15:00 Minuten.

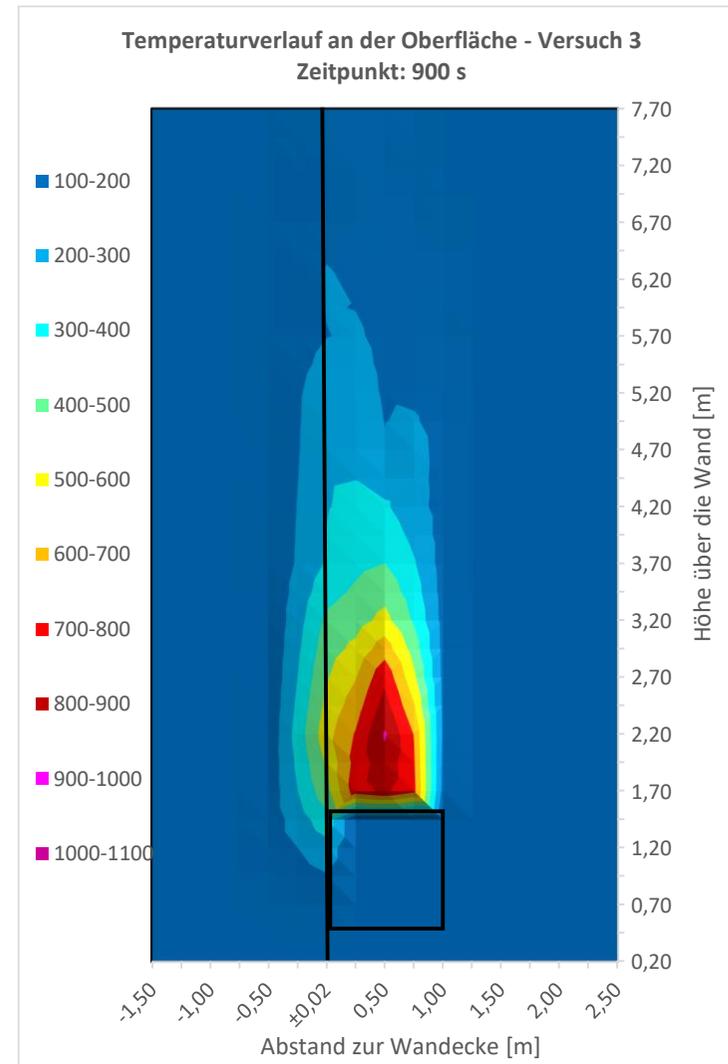


Abb. 7-104: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 900 s für Versuch 3.

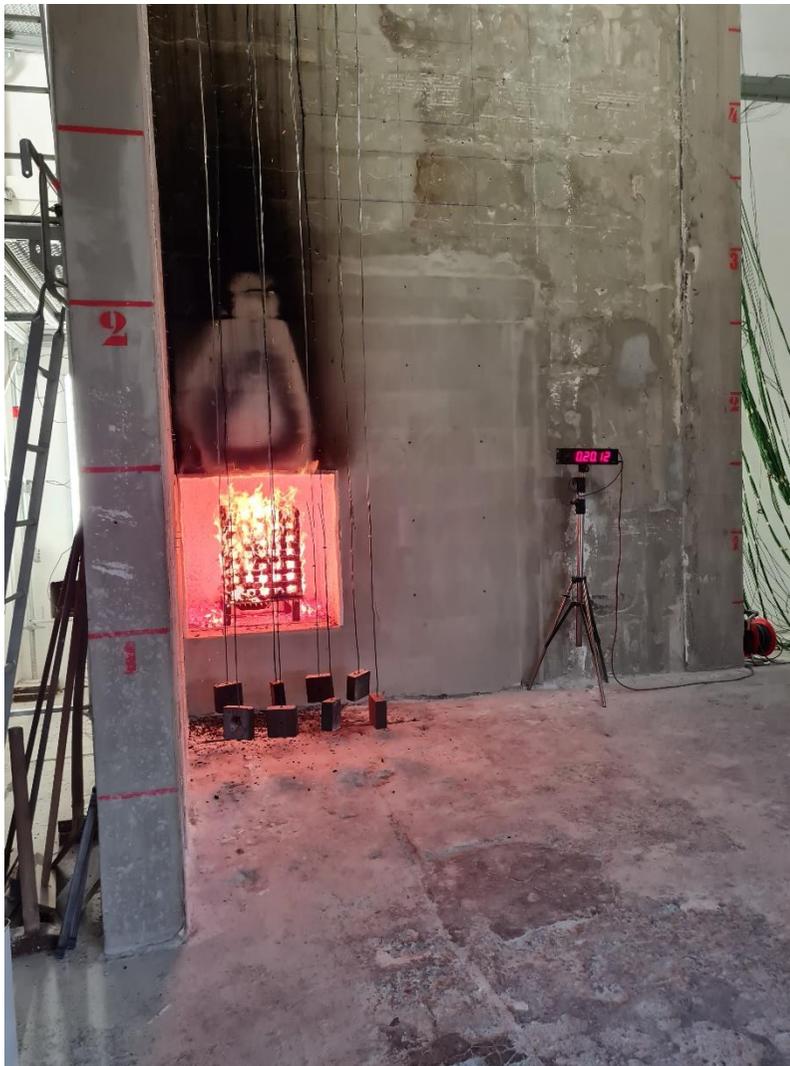


Abb. 7-105: Versuch 3 bei ca. 20:00 Minuten.

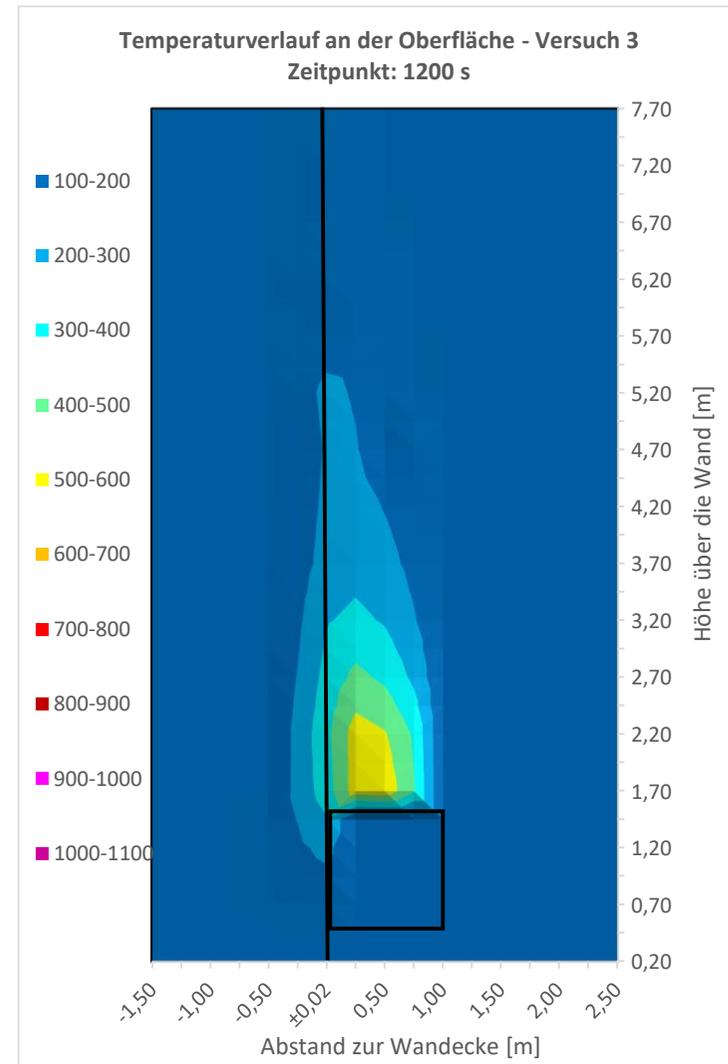


Abb. 7-106: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1200 s für Versuch 3.



Abb. 7-107: Versuch 3 bei ca. 25:00 Minuten.

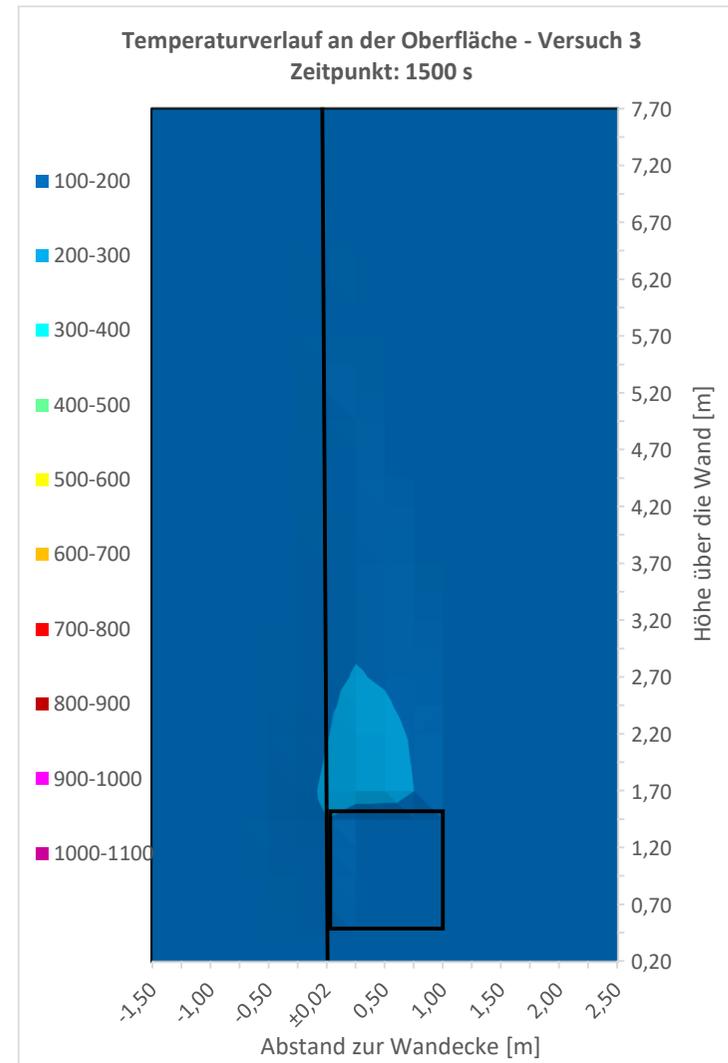


Abb. 7-108: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1500 s für Versuch 3.

Brandversuche V4 bis V6 nach DIN 4102-20 [12]



Abb. 7-109: Versuch 5 bei ca. 2:30 Minuten.

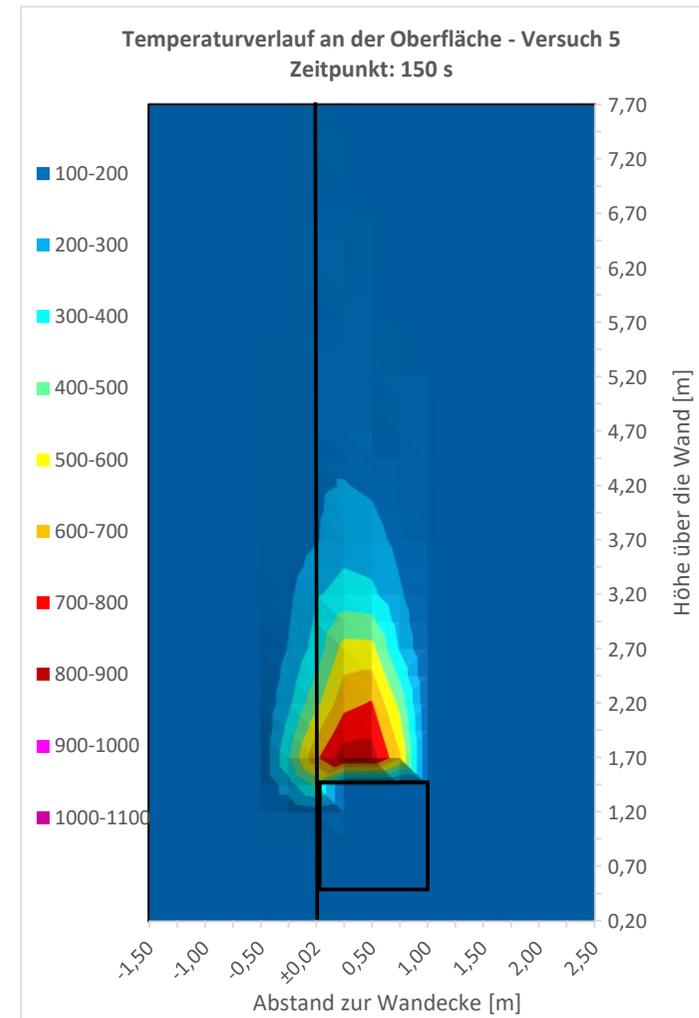


Abb. 7-110: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 150 s für Versuch 5.

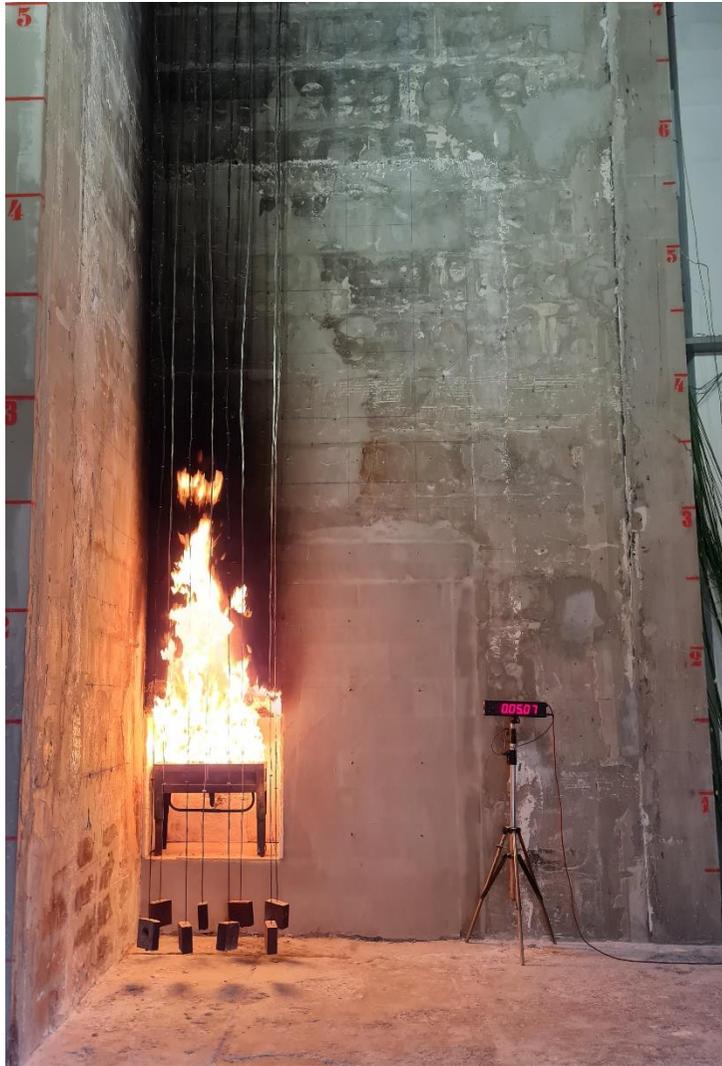


Abb. 7-111: Versuch 6 bei ca. 5:00 Minuten.

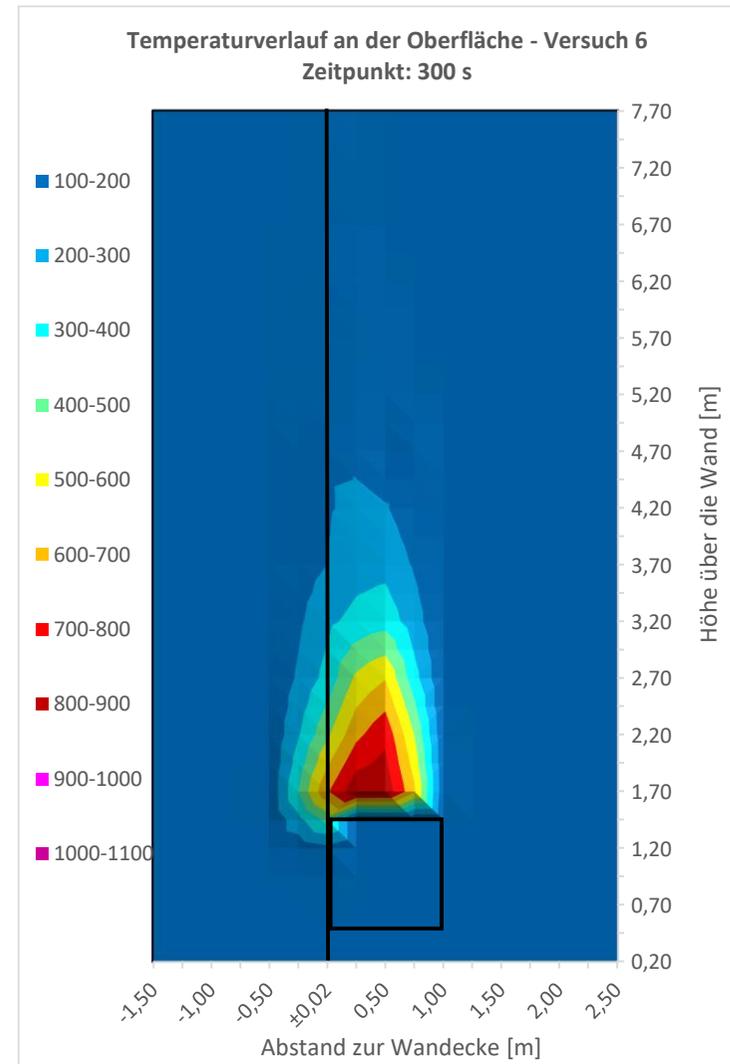


Abb. 7-112: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 300 s für Versuch 6.



Abb. 7-113: Versuch 6 bei ca. 10:00 Minuten.

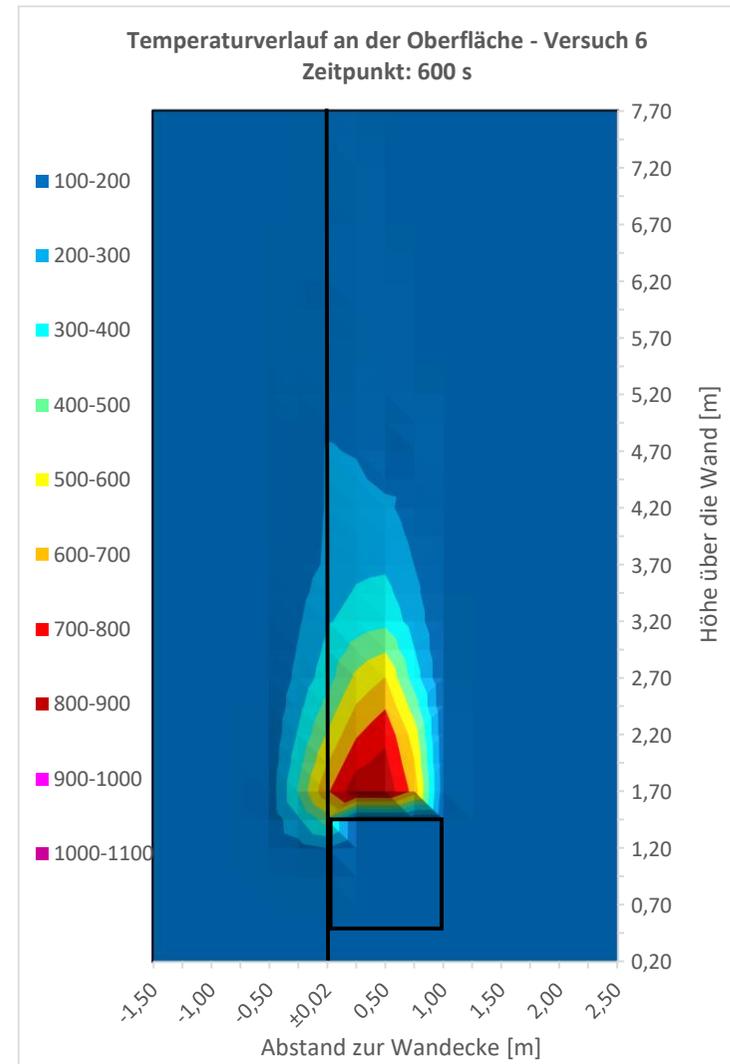


Abb. 7-114: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 600 s für Versuch 6.



Abb. 7-115: Versuch 4 bei ca. 15:00 Minuten.

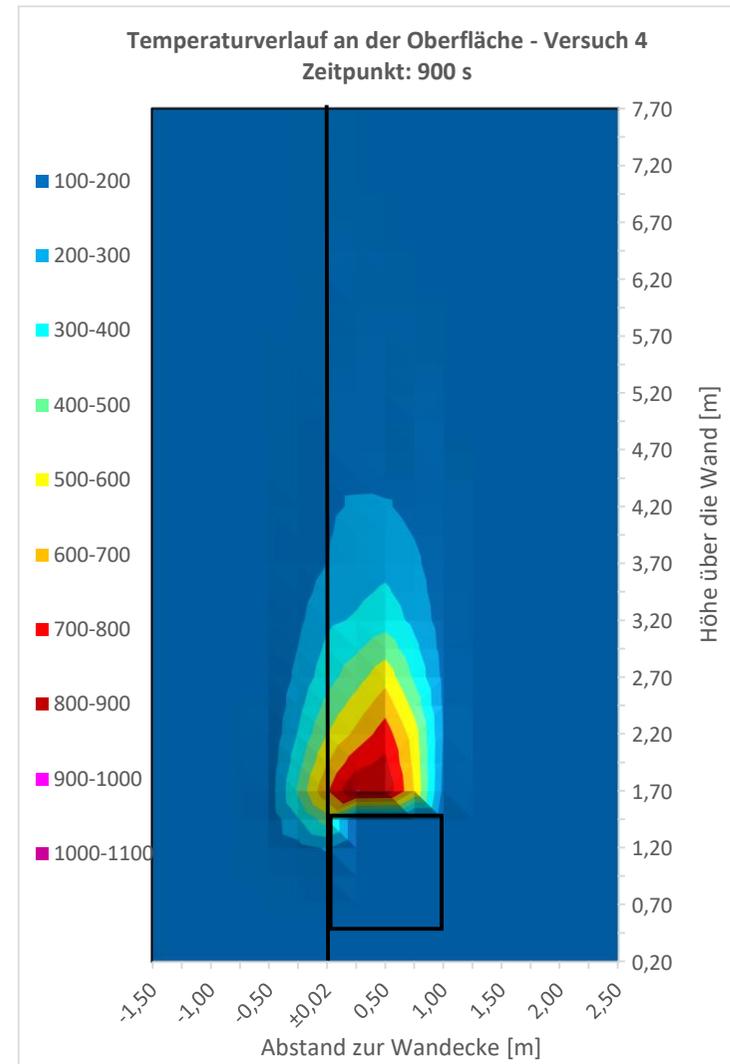


Abb. 7-116: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 900 s für Versuch 4.



Abb. 7-117: Versuch 4 bei ca. 20:00 Minuten.

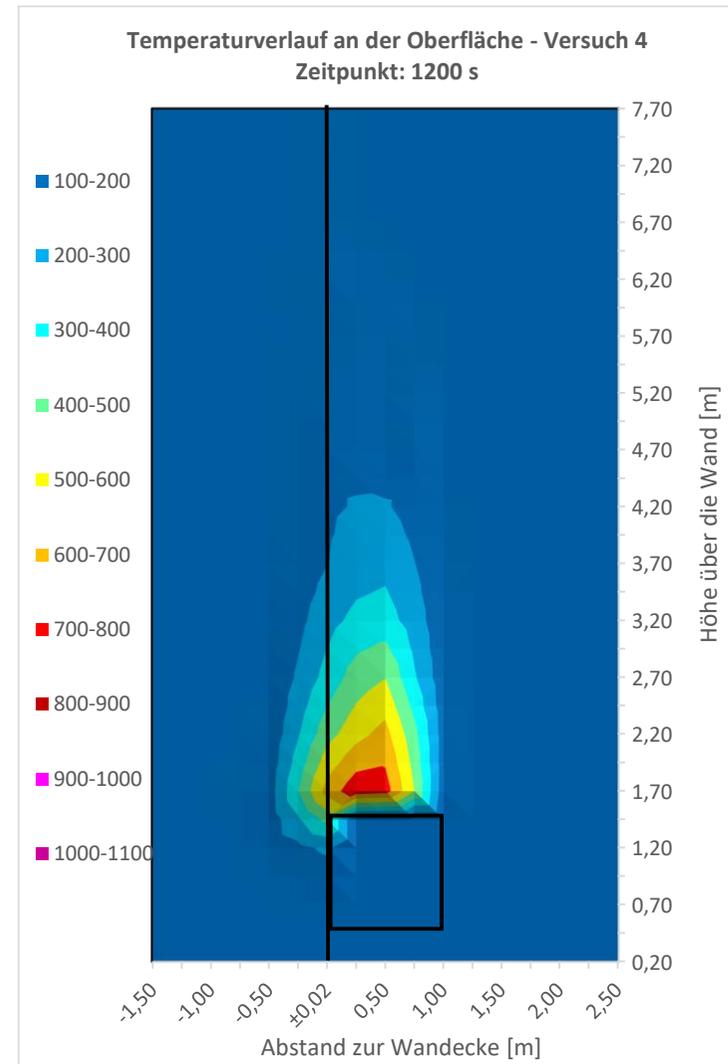


Abb. 7-118: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1200 s für Versuch 4.



Abb. 7-119: Versuch 4 unmittelbar nach dem Abschalten.

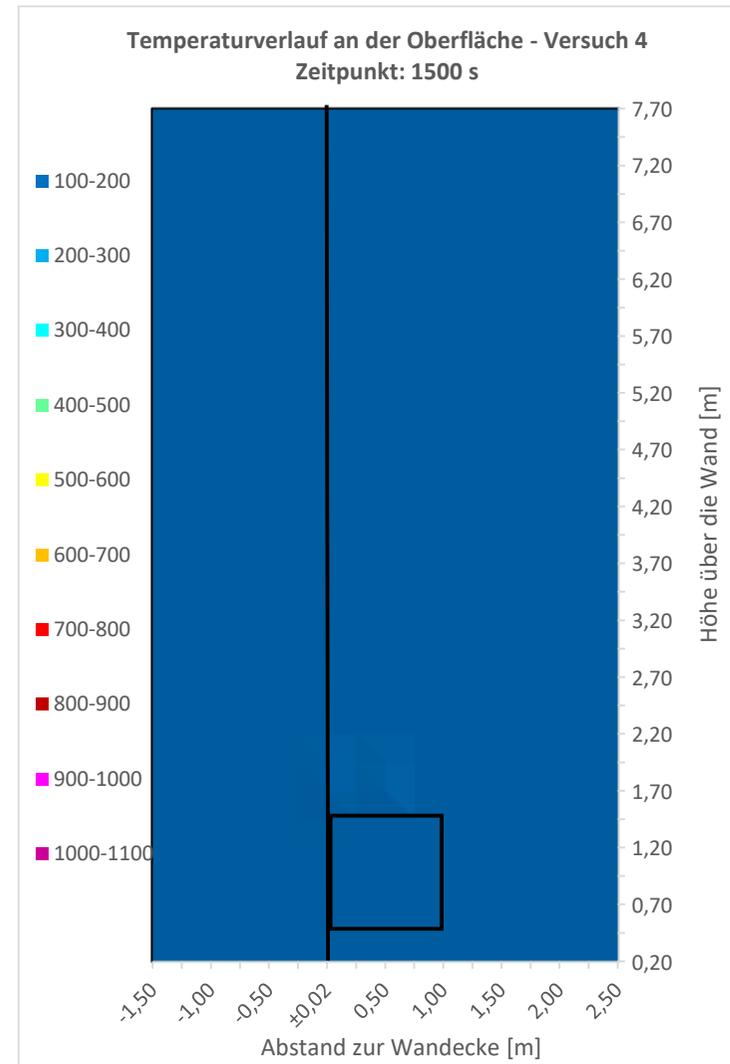


Abb. 7-120: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1500 s für Versuch 4.

Large-Exposure-Tests V7 bis V9 nach ([3], [20])



Abb. 7-121: Versuch 8 bei ca. 2:30 Minuten.

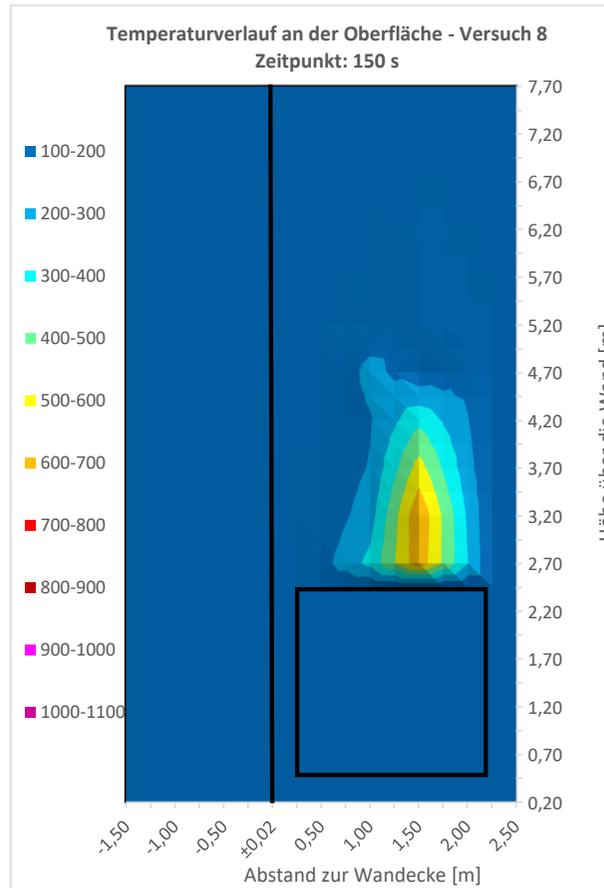


Abb. 7-122: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 150 s für Versuch 8.

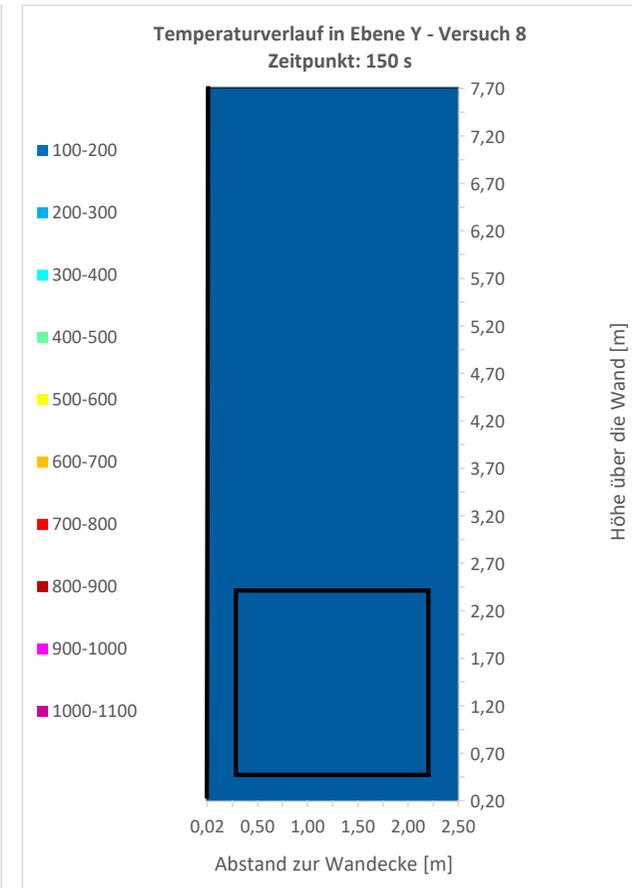


Abb. 7-123: Isothermen der Y-Ebene nach 150 s für Versuch 8.



Abb. 7-124: Versuch 7 bei ca. 5 Minuten.

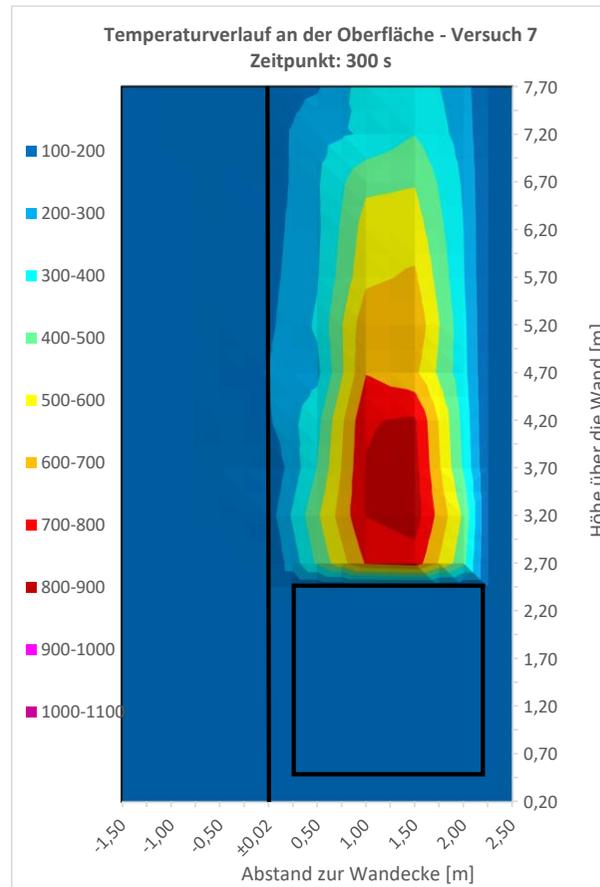


Abb. 7-125: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 300 s für Versuch 7.

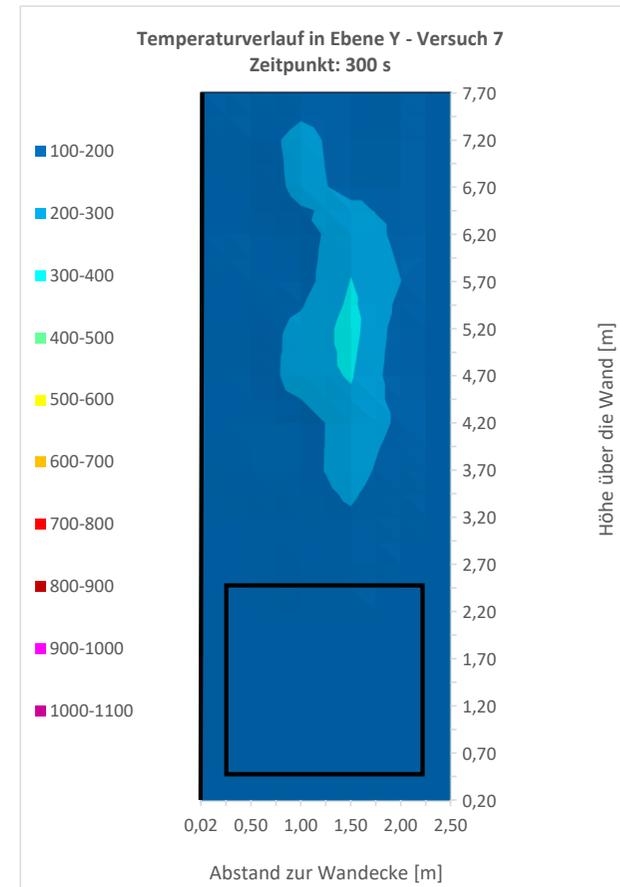


Abb. 7-126: Isothermen der Y-Ebene nach 300 s für Versuch 7.



Abb. 7-127: Versuch 8 bei ca. 10 Minuten.

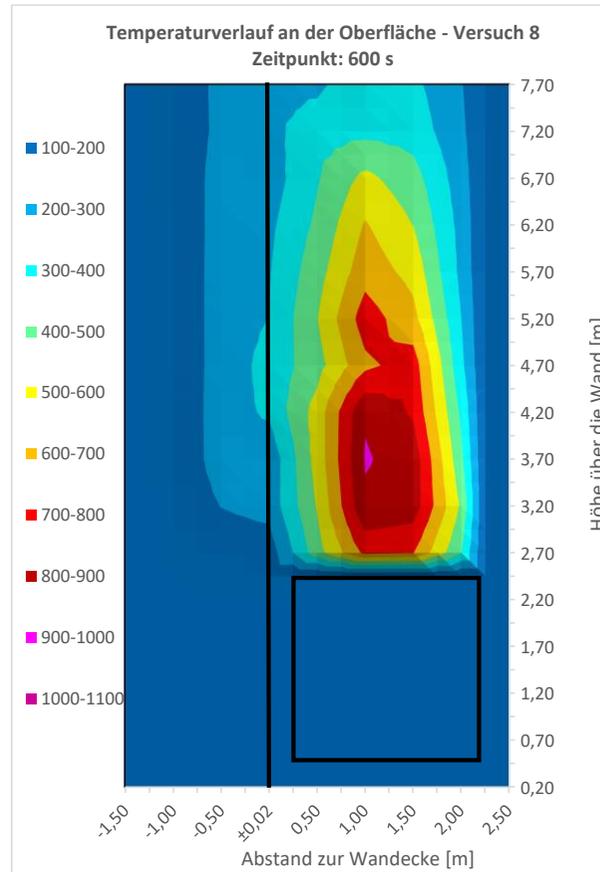


Abb. 7-128: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 600 s für Versuch 8.

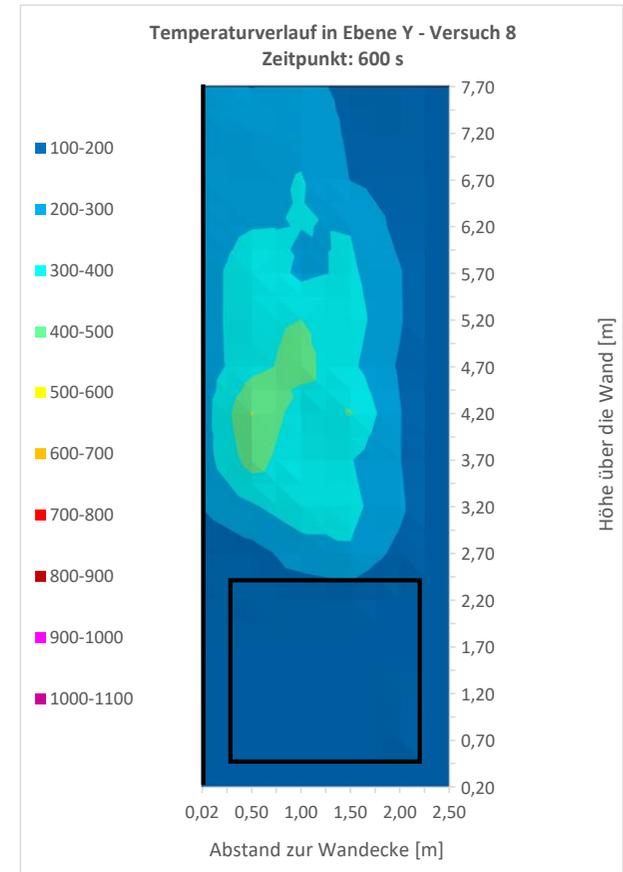


Abb. 7-129: Isothermen der Y-Ebene nach 600 s für Versuch 8.



Abb. 7-130: Versuch 8 bei ca. 15 Minuten.

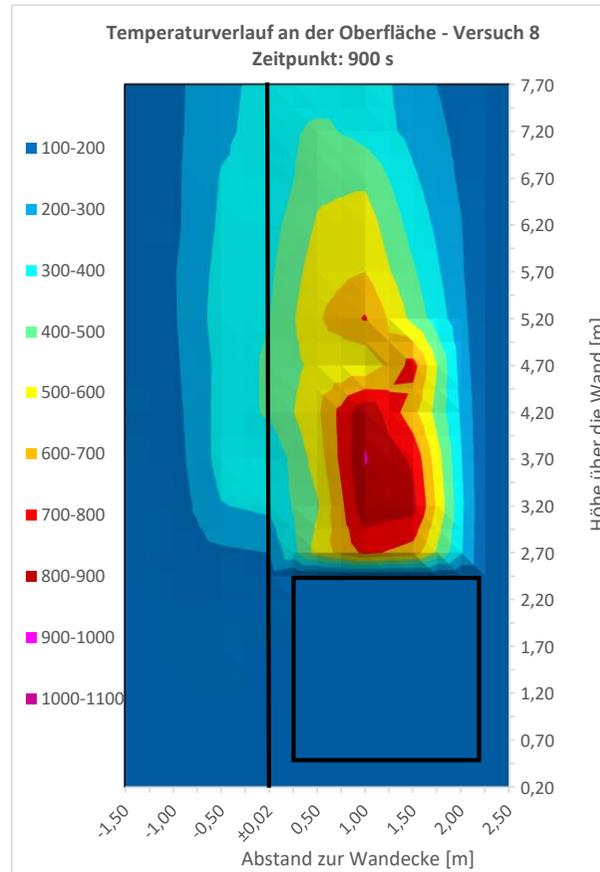


Abb. 7-131: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 900 s für Versuch 8.

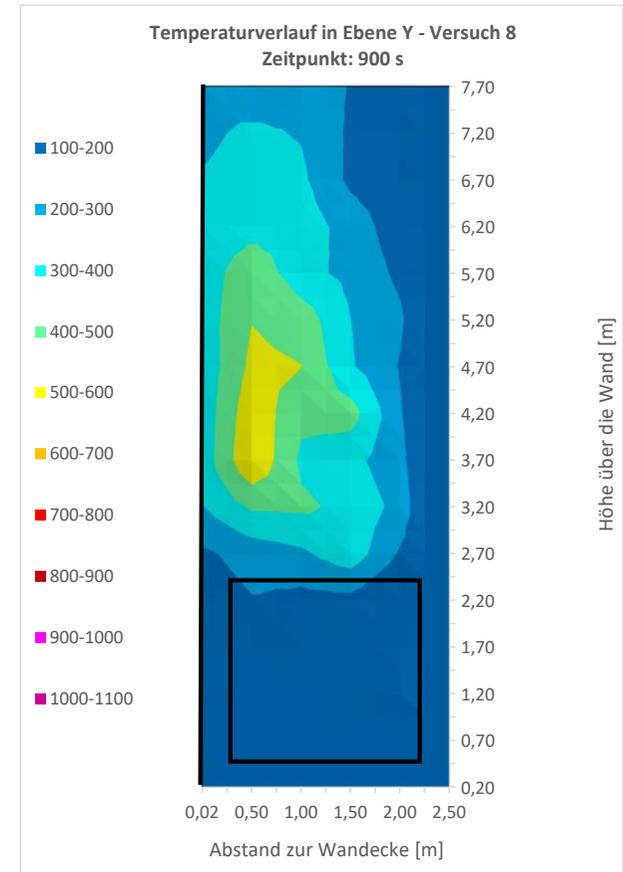


Abb. 7-132: Isothermen der Y-Ebene nach 900 s für Versuch 8.



Abb. 7-133: Versuch 8 bei ca. 20 Minuten.

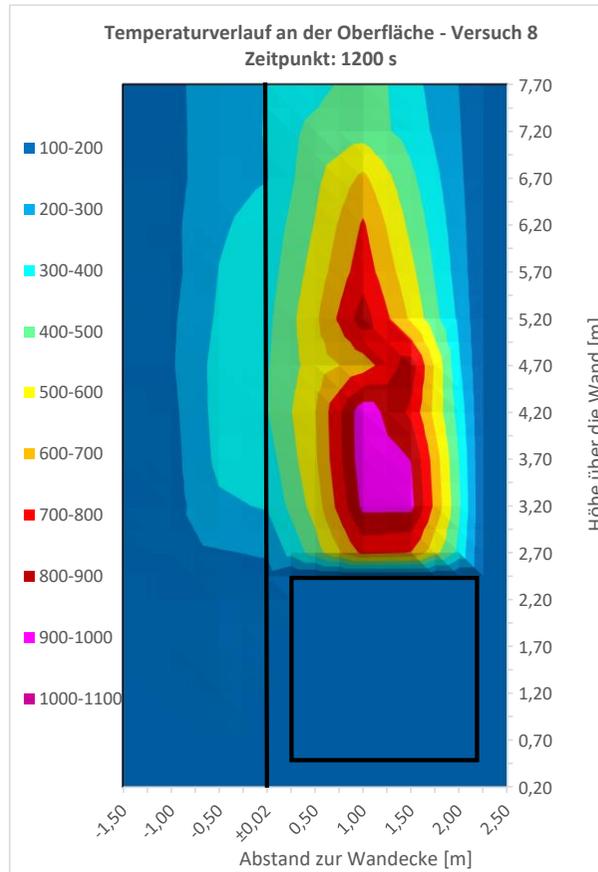


Abb. 7-134: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1200 s für Versuch 8.

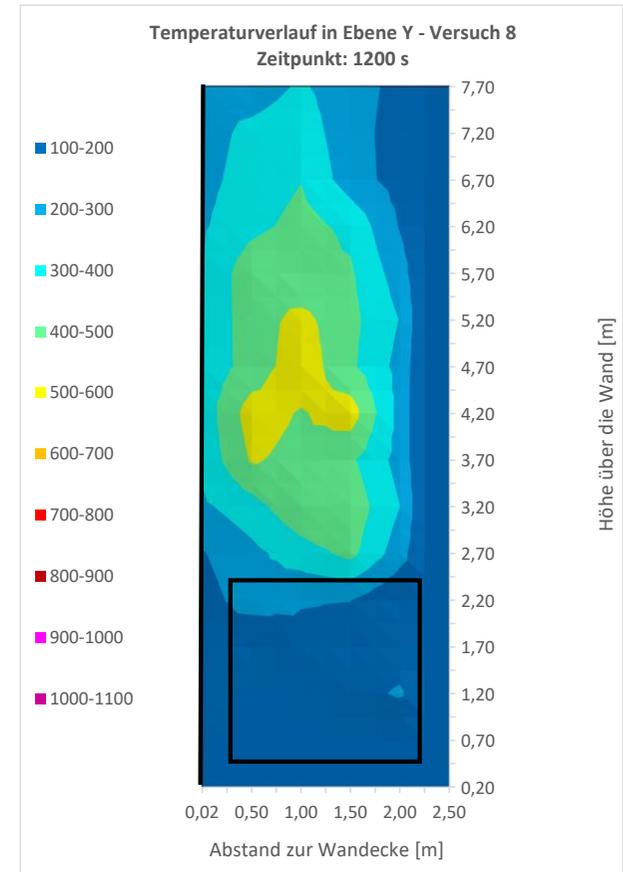


Abb. 7-135: Isothermen der Y-Ebene nach 1200 s für Versuch 8.



Abb. 7-136: Versuch 7 bei ca. 25 Minuten.

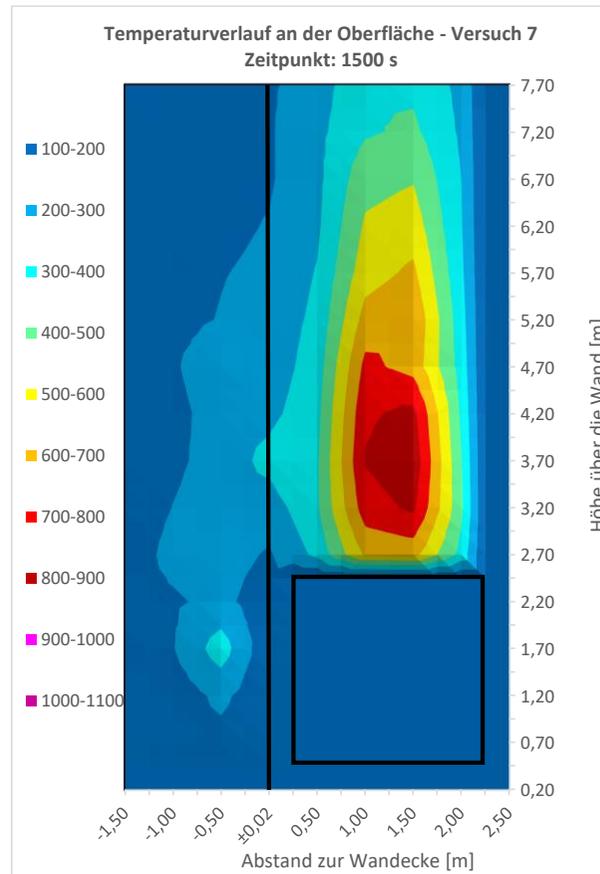


Abb. 7-137: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1500 s für Versuch 7.

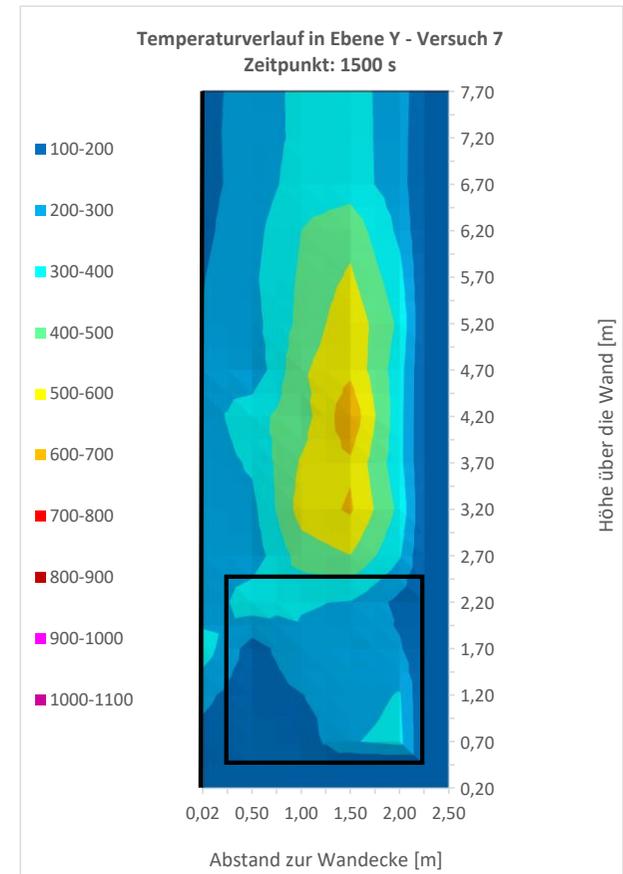


Abb. 7-138: Isothermen der Y-Ebene nach 1500 s für Versuch 7.



Abb. 7-139: Versuch 7 bei ca. 30 Minuten.

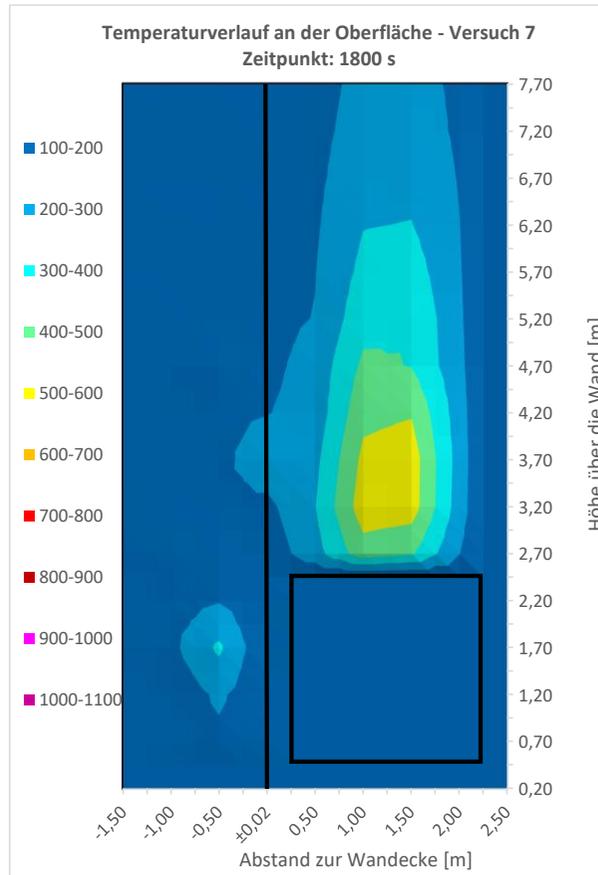


Abb. 7-140: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1800 s für Versuch 7.

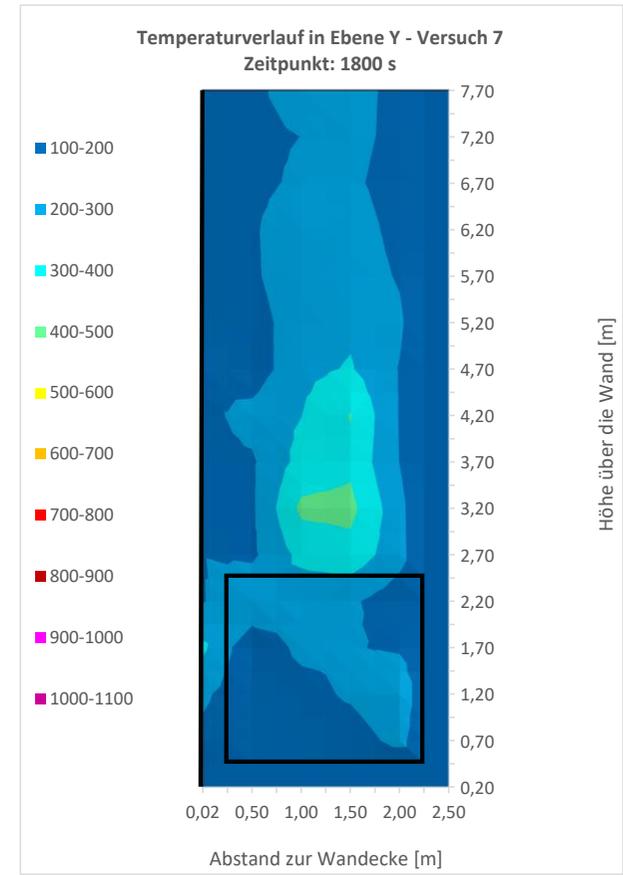


Abb. 7-141: Isothermen der Y-Ebene nach 1800 s für Versuch 7.



Abb. 7-142: Versuch 7 bei ca. 35 Minuten.

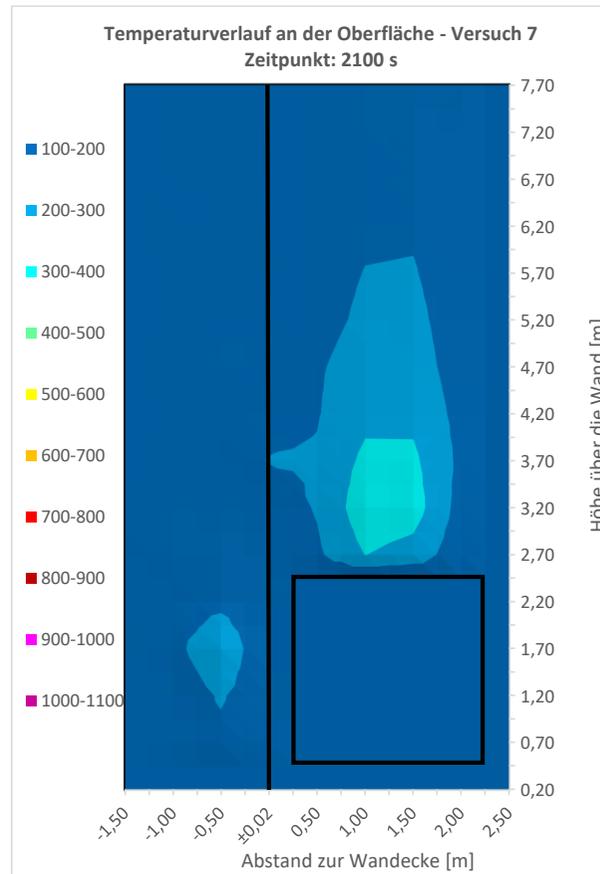


Abb. 7-143: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 2100 s für Versuch 7.

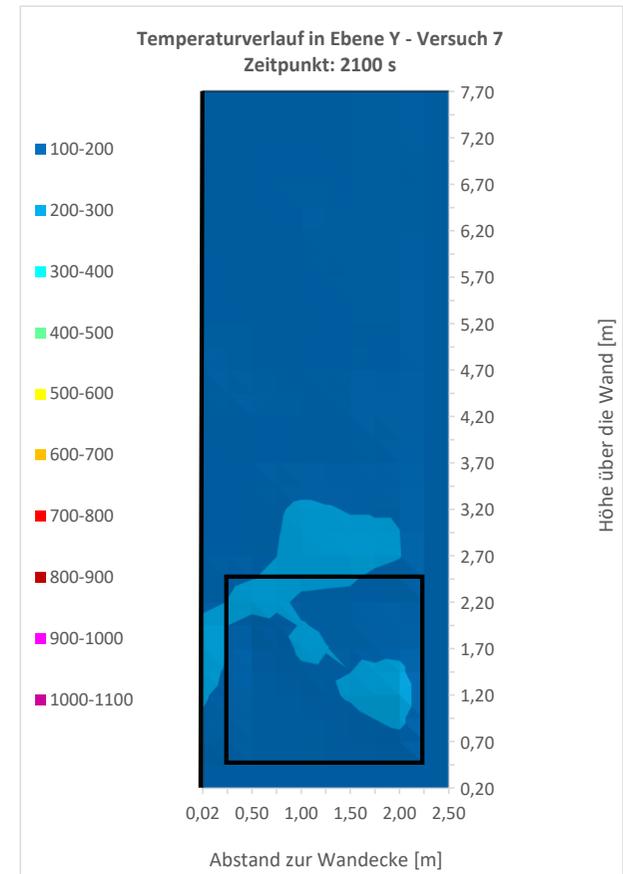


Abb. 7-144: Isothermen der Y-Ebene nach 2100 s für Versuch 7.

Brandversuche V10 bis V12 nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung - Stand: 2021-11) [13]



Abb. 7-145: Versuch 12 bei ca. 2:30 Minuten.

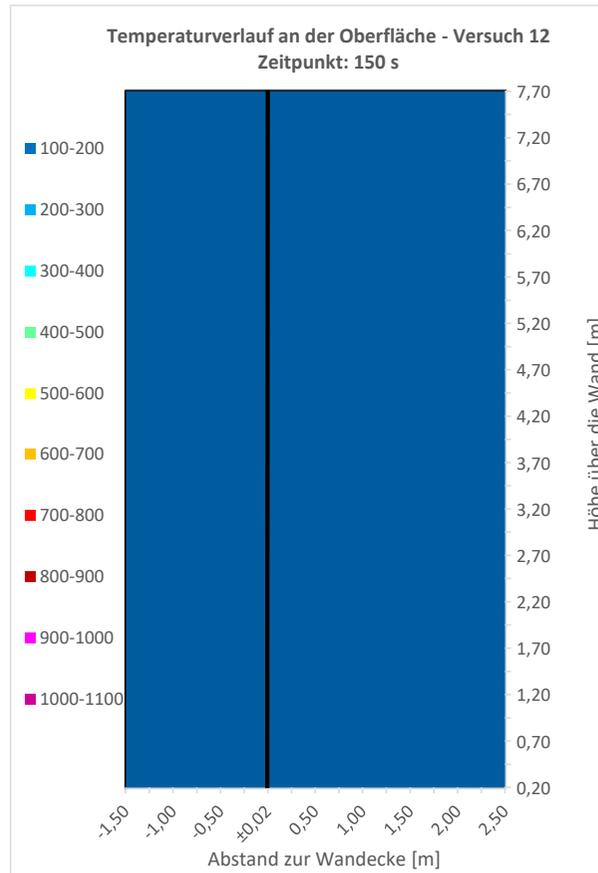


Abb. 7-146: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 150 s für Versuch 12.

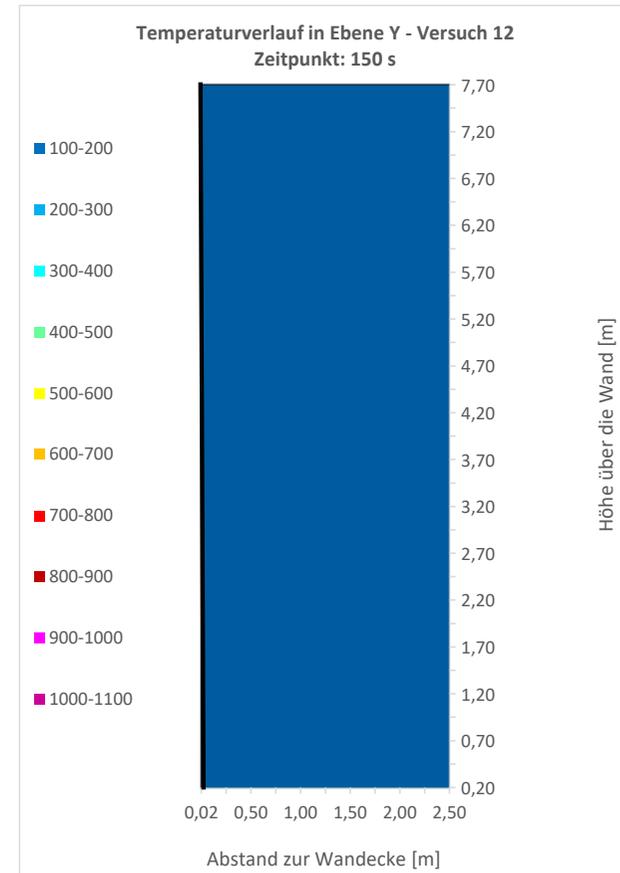


Abb. 7-147: Isothermen der Y-Ebene nach 150 s für Versuch 12.



Abb. 7-148: Versuch 11 bei ca. 5 Minuten.

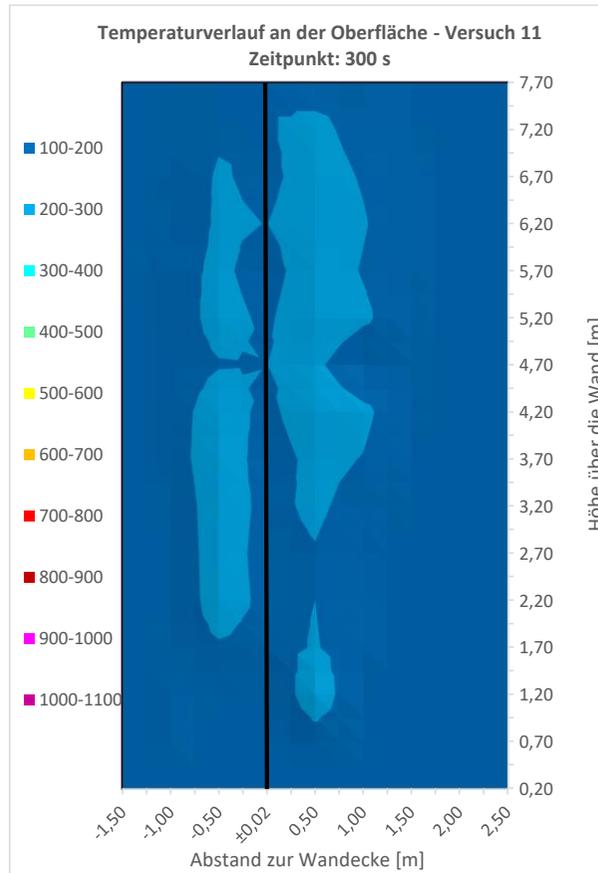


Abb. 7-149: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 300 s für Versuch 11.

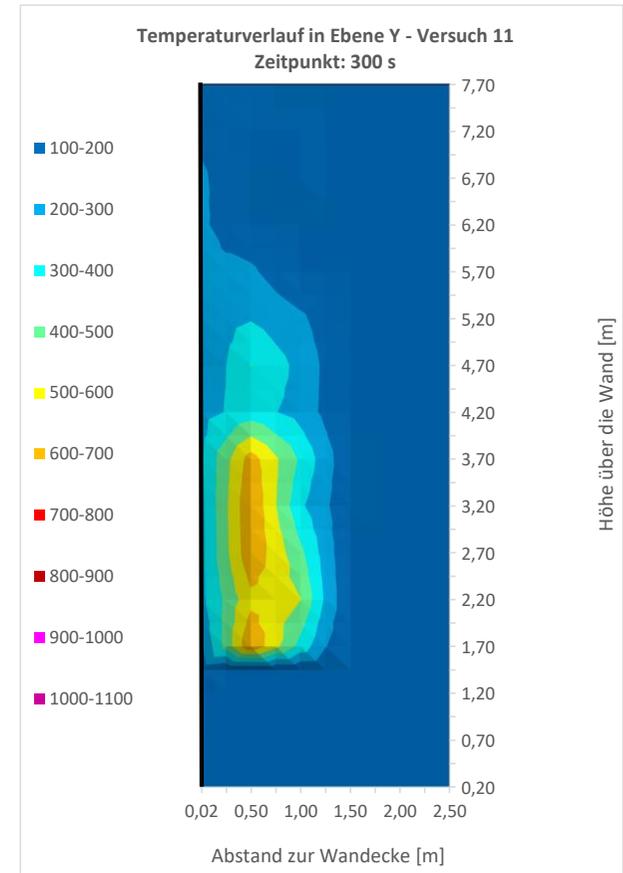


Abb. 7-150: Isothermen der Y-Ebene nach 300 s für Versuch 11.



Abb. 7-151: Versuch 11 bei ca. 10 Minuten.

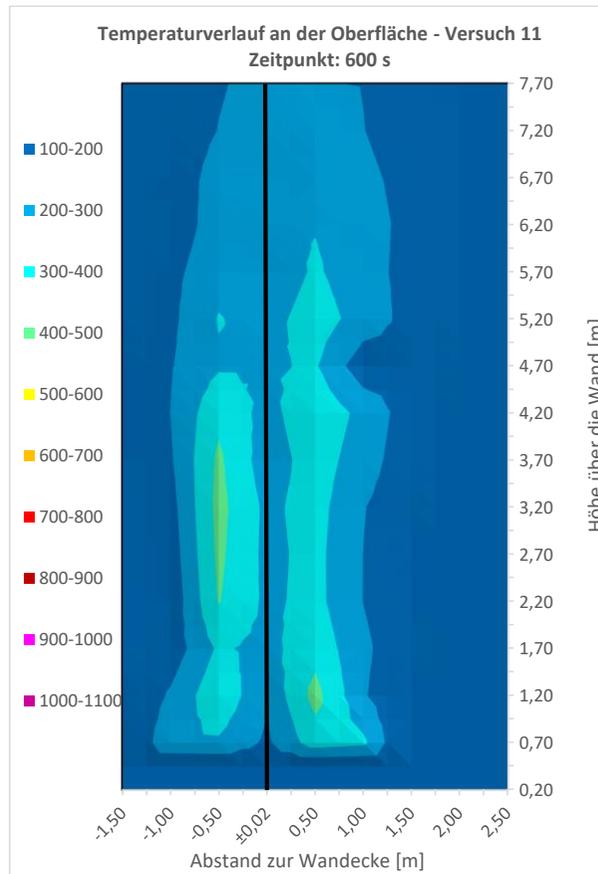


Abb. 7-152: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 600 s für Versuch 11.

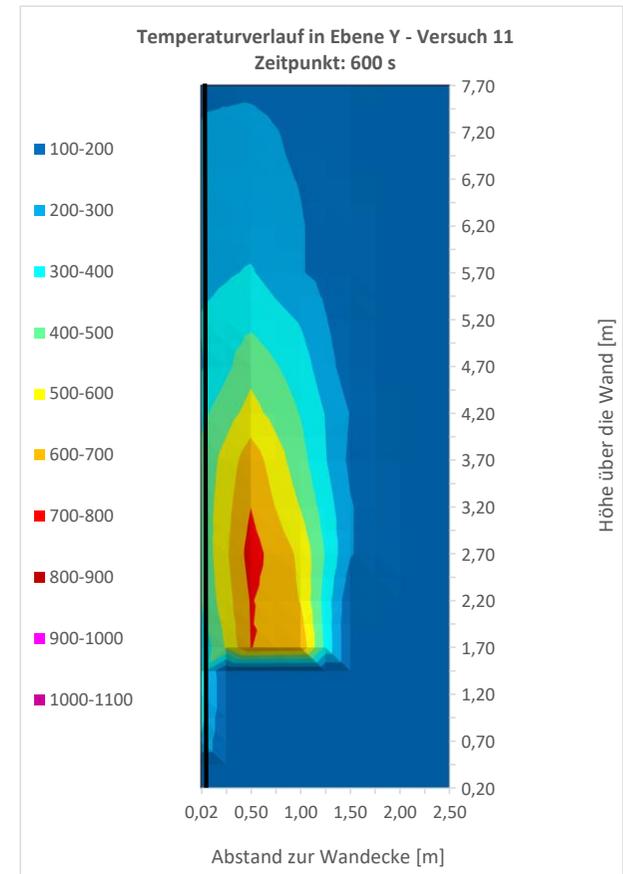


Abb. 7-153: Isothermen der Y-Ebene nach 600 s für Versuch 11.



Abb. 7-154: Versuch 11 bei ca. 15 Minuten.

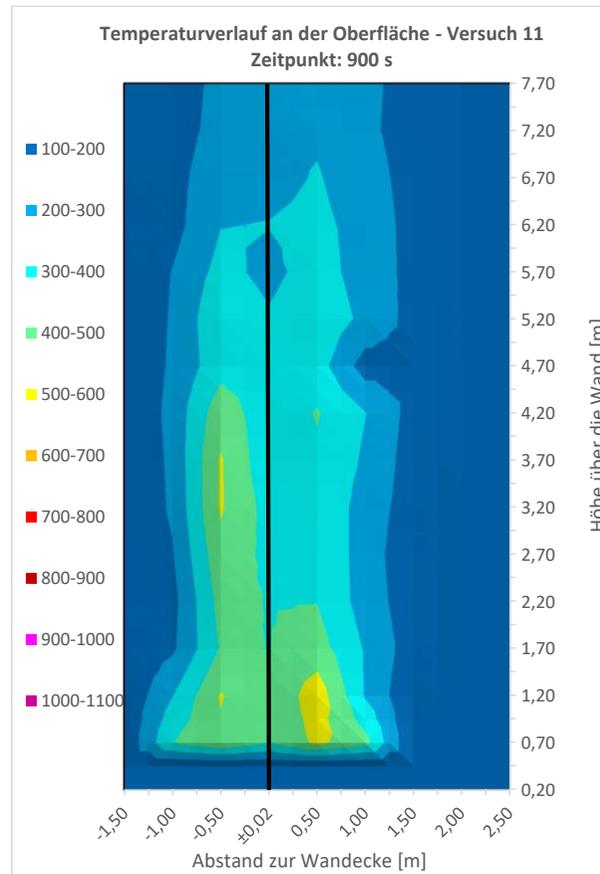


Abb. 7-155: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 900 s für Versuch 11.

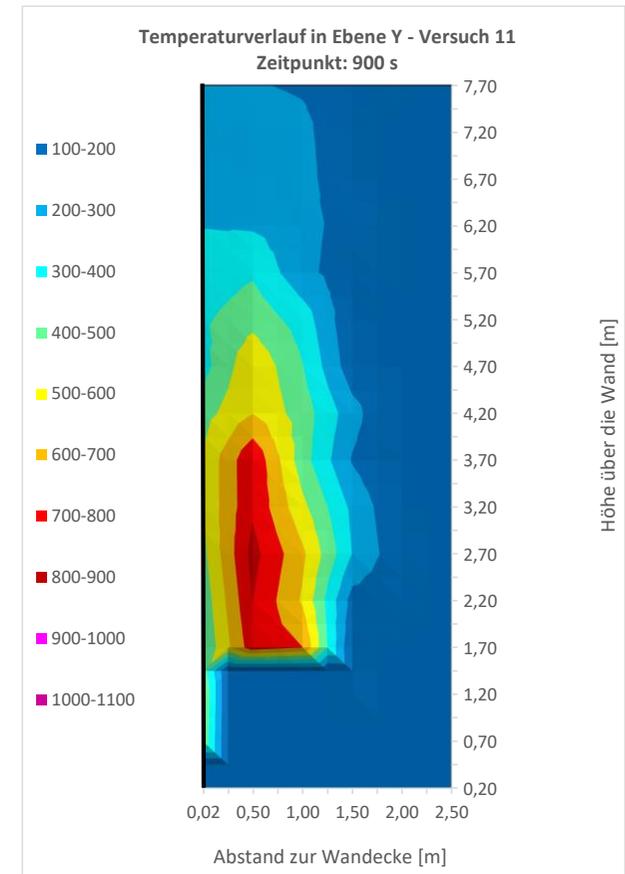


Abb. 7-156: Isothermen der Y-Ebene nach 900 s für Versuch 11.



Abb. 7-157: Versuch 11 bei ca. 20 Minuten.

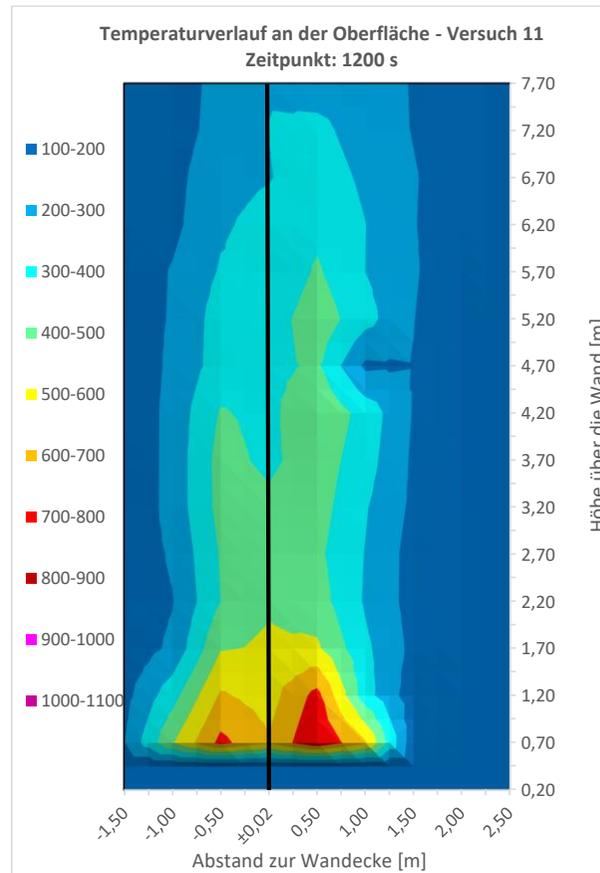


Abb. 7-158: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1200 s für Versuch 11.

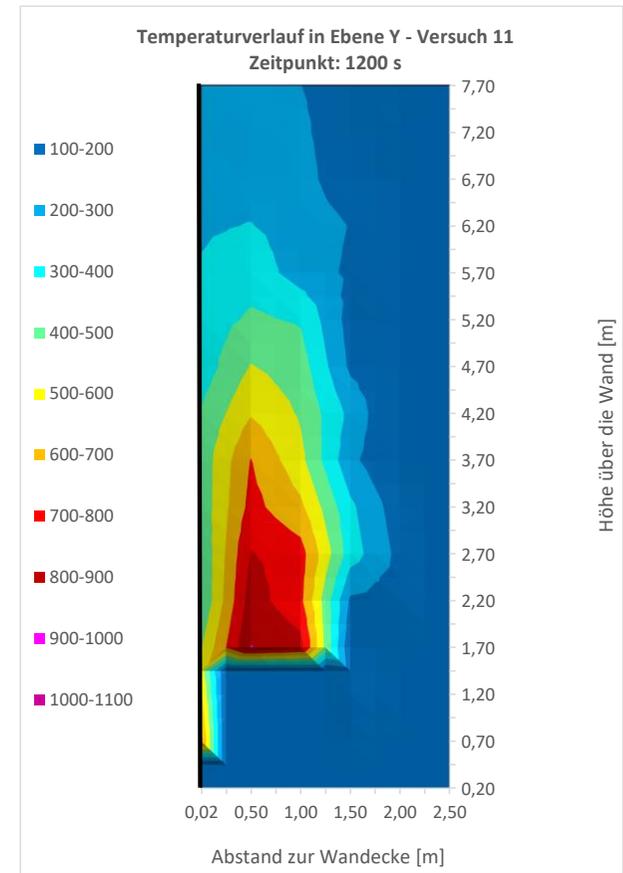


Abb. 7-159: Isothermen der Y-Ebene nach 1200 s für Versuch 11.



Abb. 7-160: Versuch 10 bei ca. 25 Minuten. Im normalen Brandversuch würde die Krippe jetzt abgelöscht werden.

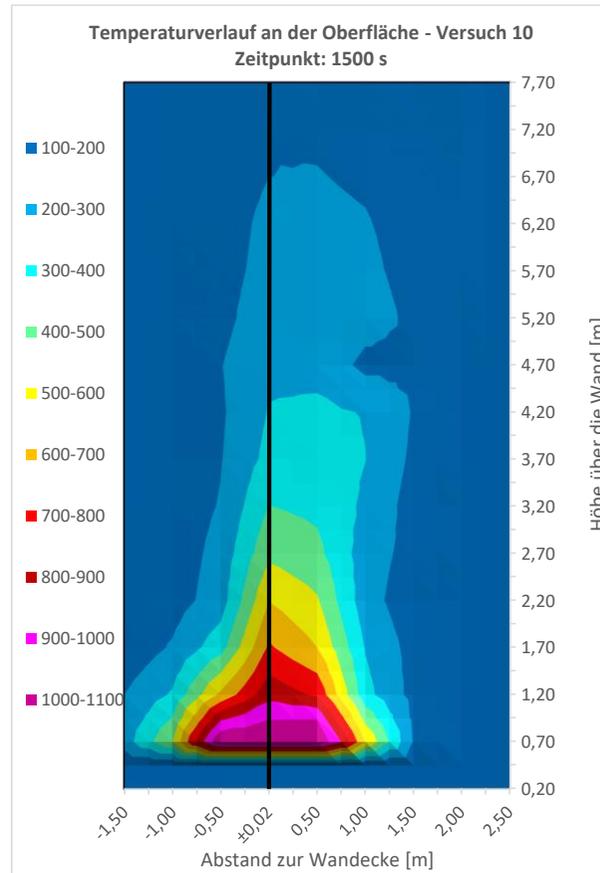


Abb. 7-161: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1500 s für Versuch 10.

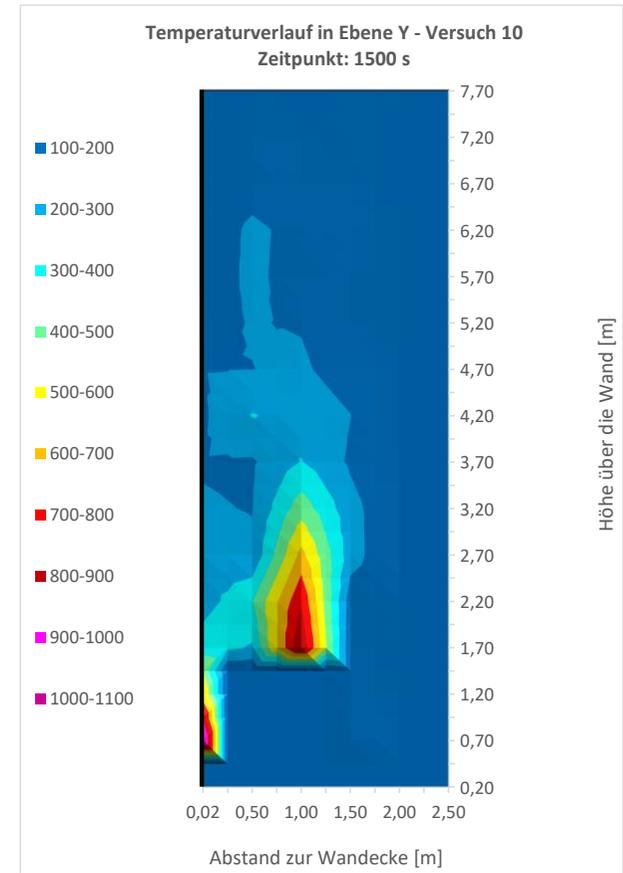


Abb. 7-162: Isothermen der Y-Ebene nach 1500 s für Versuch 10.



Abb. 7-163: Versuch 11 bei ca. 30 Minuten.

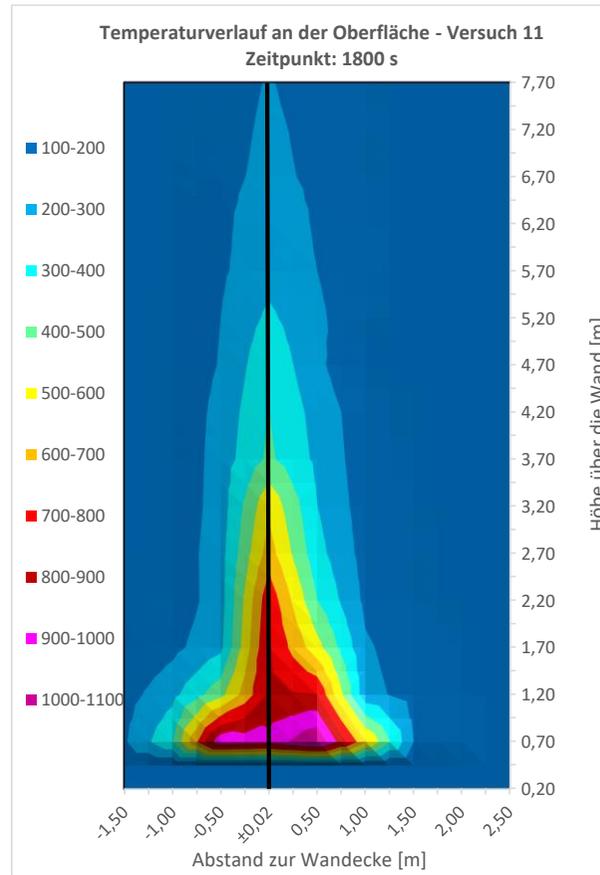


Abb. 7-164: Isothermen der Oberflächentemperaturen nach 1800 s für Versuch 11.

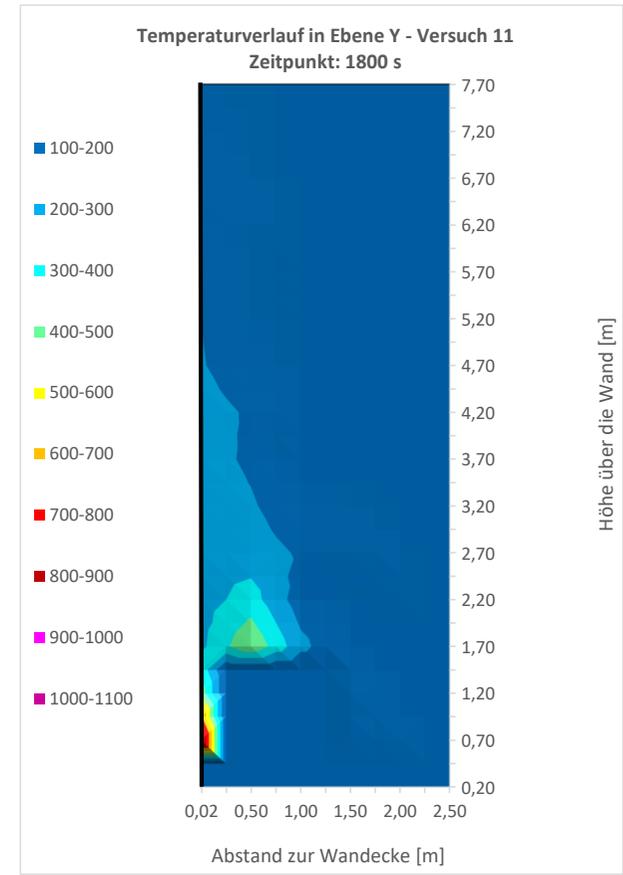


Abb. 7-165: Isothermen der Y-Ebene nach 1800 s für Versuch 11.

7.3.3 Isothermen der Mittelwerttemperaturen

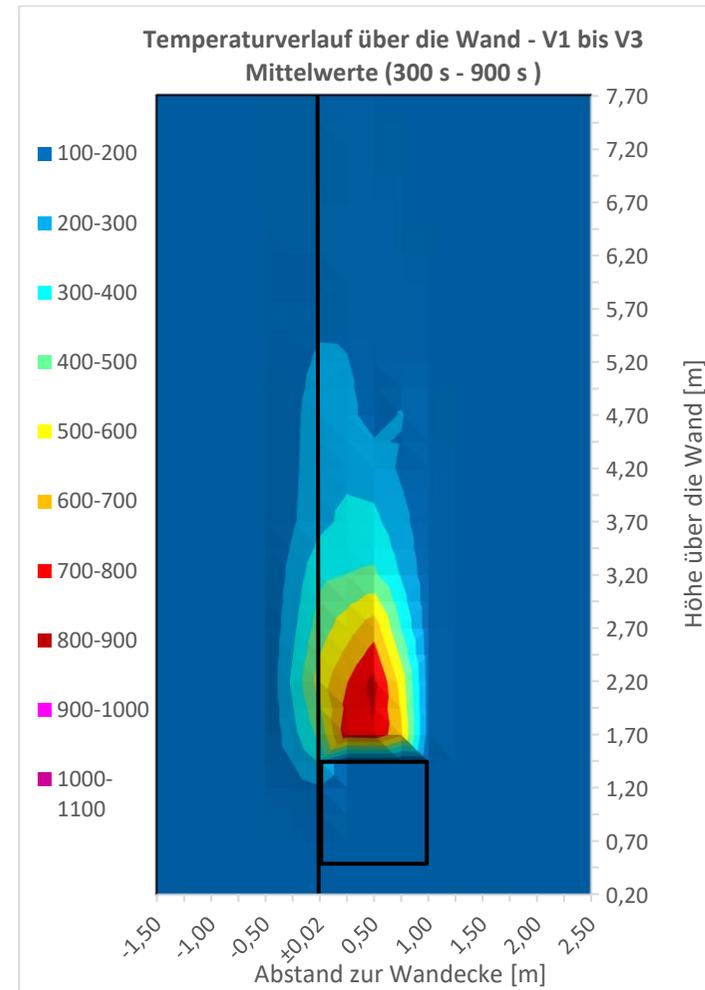
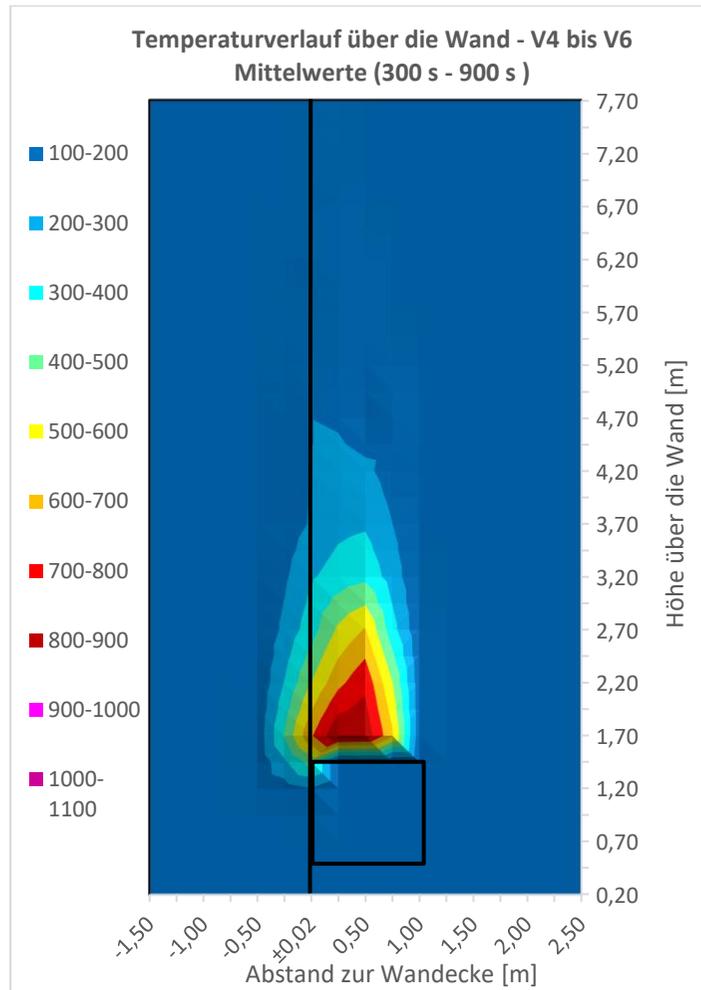


Abb. 7-166: Oberflächentemperaturen der Versuche 4-6 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 900 s

Abb. 7-167: Oberflächentemperaturen der Medium-Exposure-Tests 1-3 – Mittelwerte 300 s bis 900 s

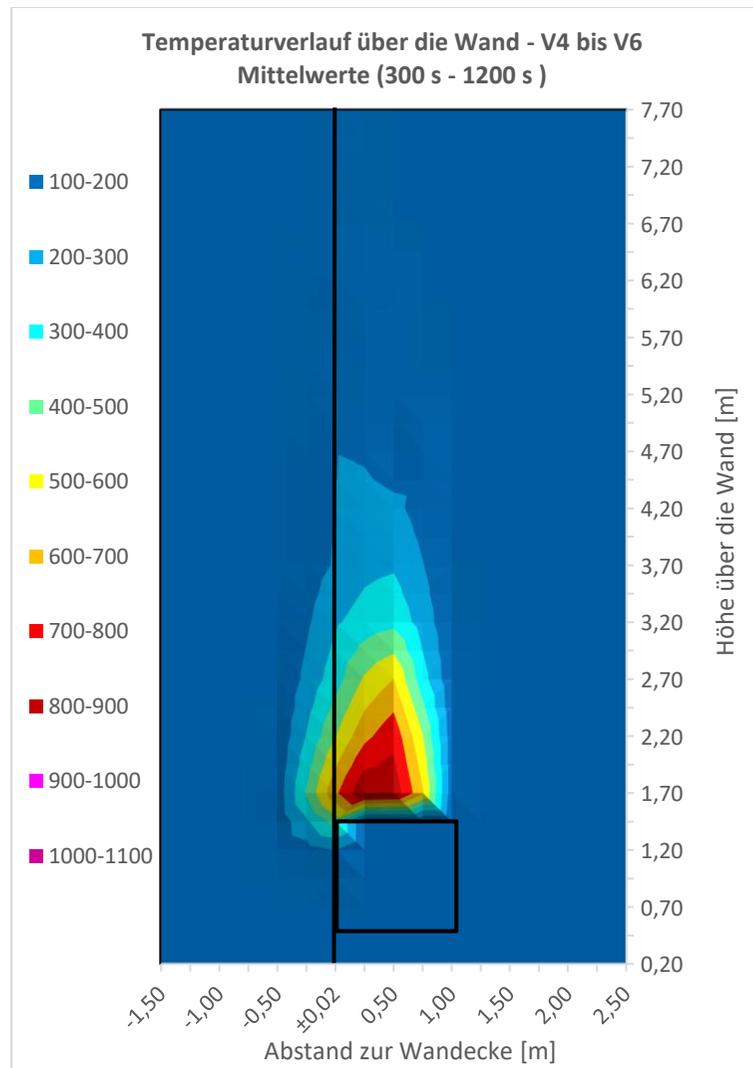


Abb. 7-168: Oberflächentemperaturen der Versuche 4-6 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

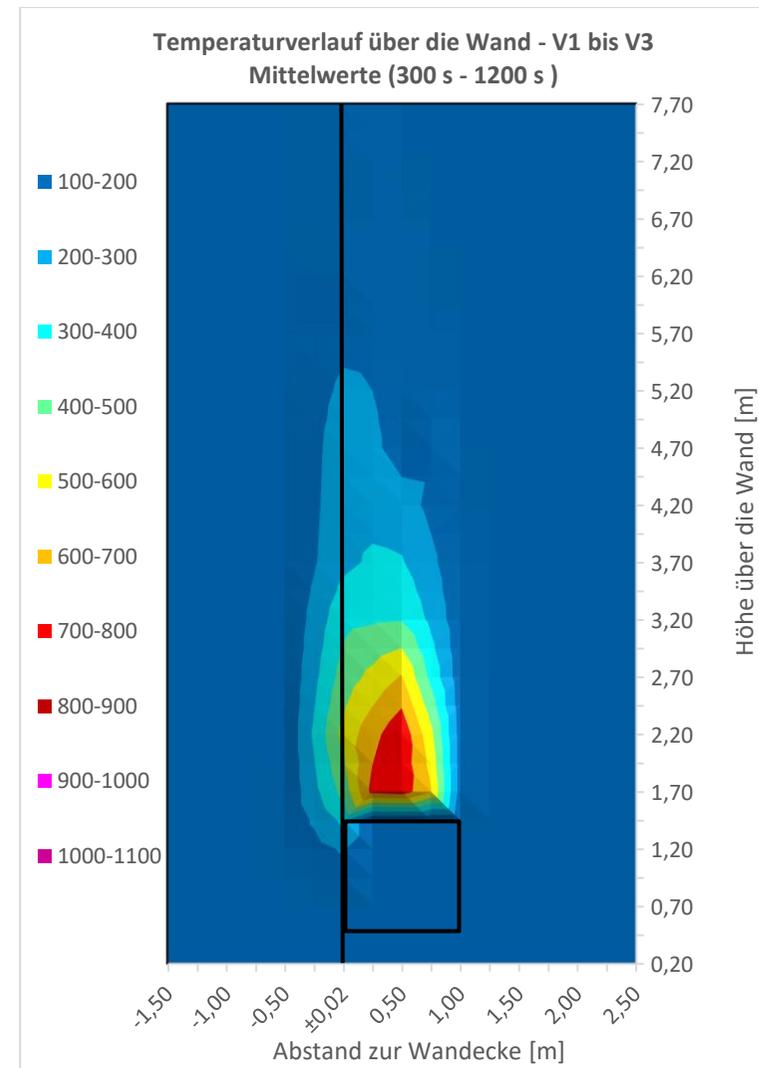


Abb. 7-169: Oberflächentemperaturen der Medium-Exposure-Tests 1-3 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

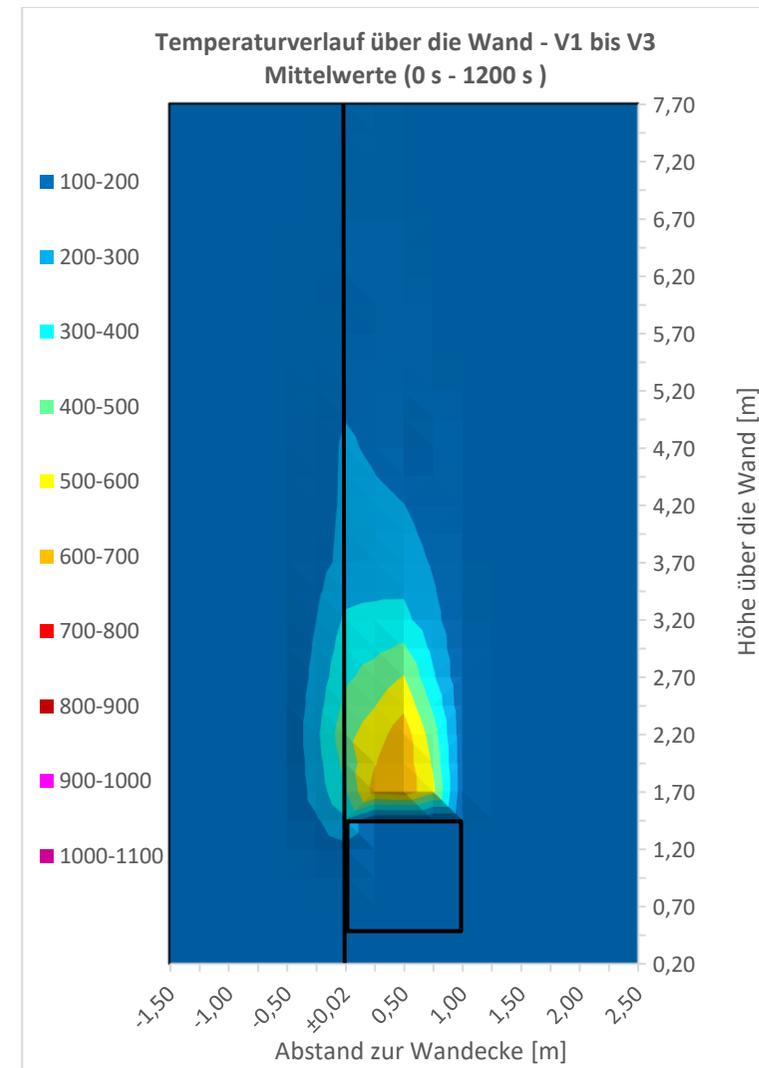
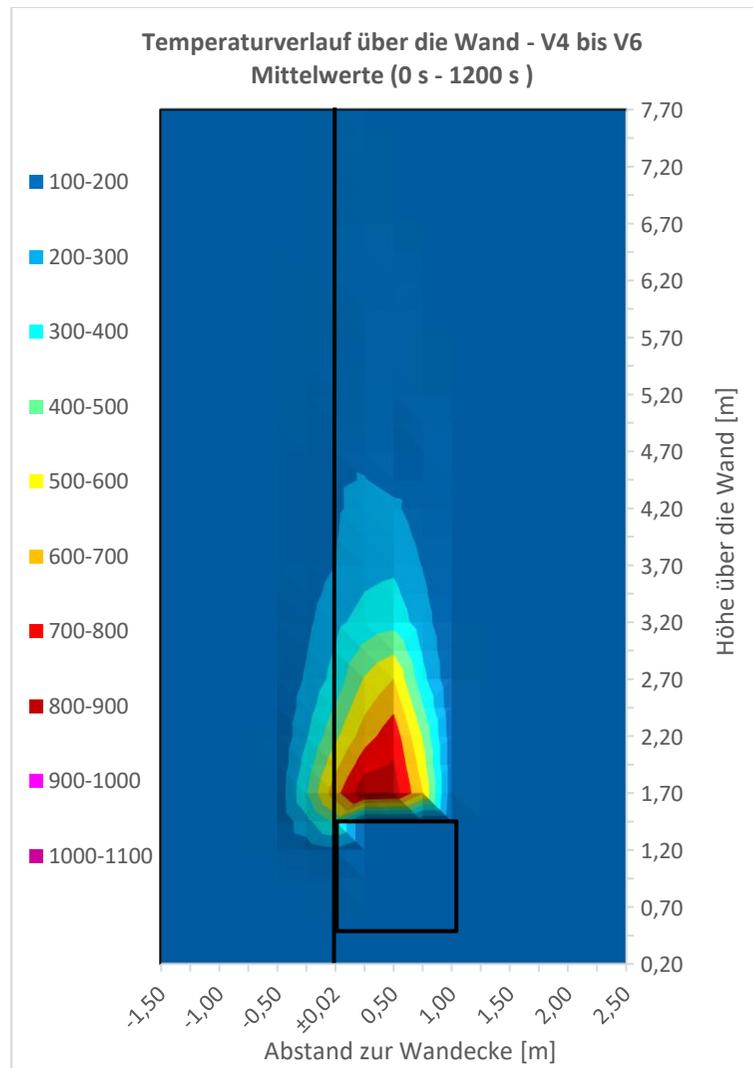


Abb. 7-170: Oberflächentemperaturen der Versuche 4-6 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 0 s bis 1200 s

Abb. 7-171: Oberflächentemperaturen der Medium-Exposure-Tests 1-3 – Mittelwerte 0 s bis 1200 s

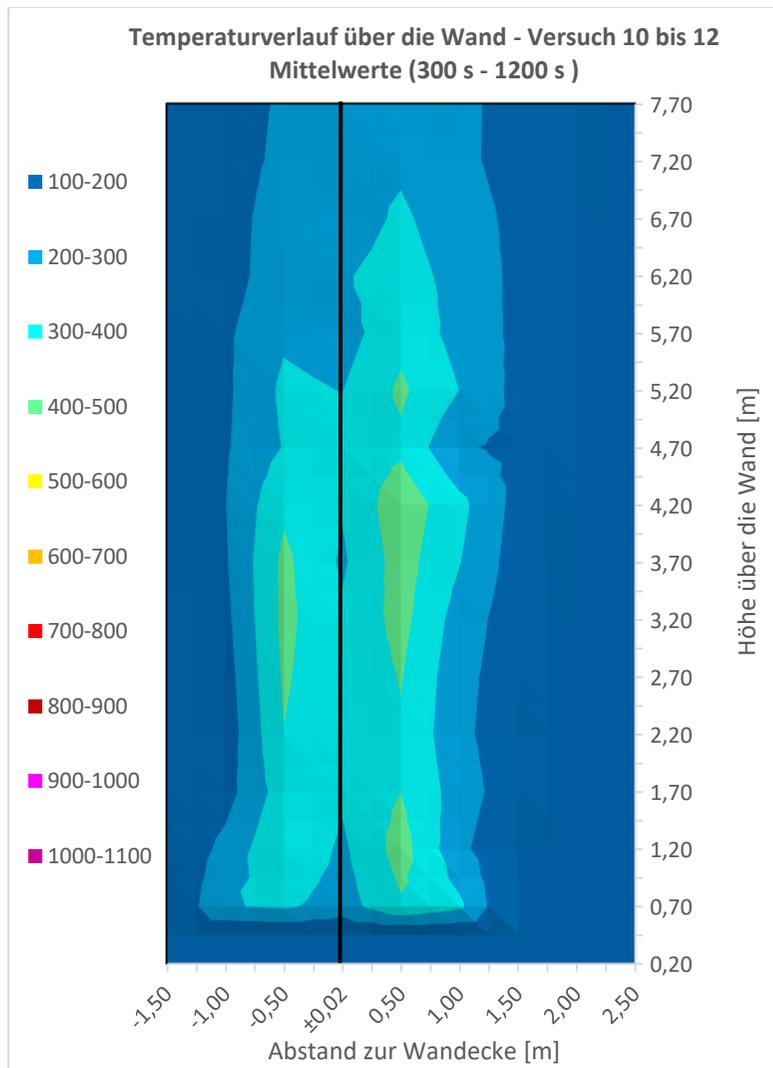


Abb. 7-172: Oberflächentemperaturen der Versuche 10-12 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

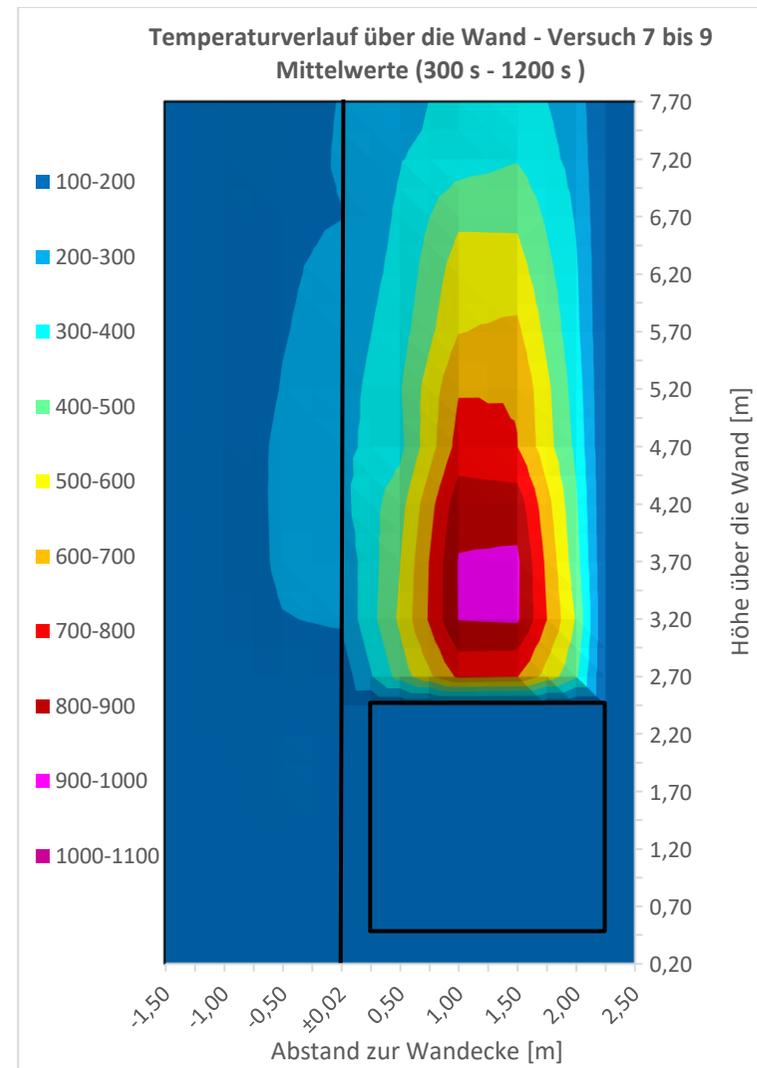


Abb. 7-173: Oberflächentemperaturen der Large-Exposure-Tests 7-9 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

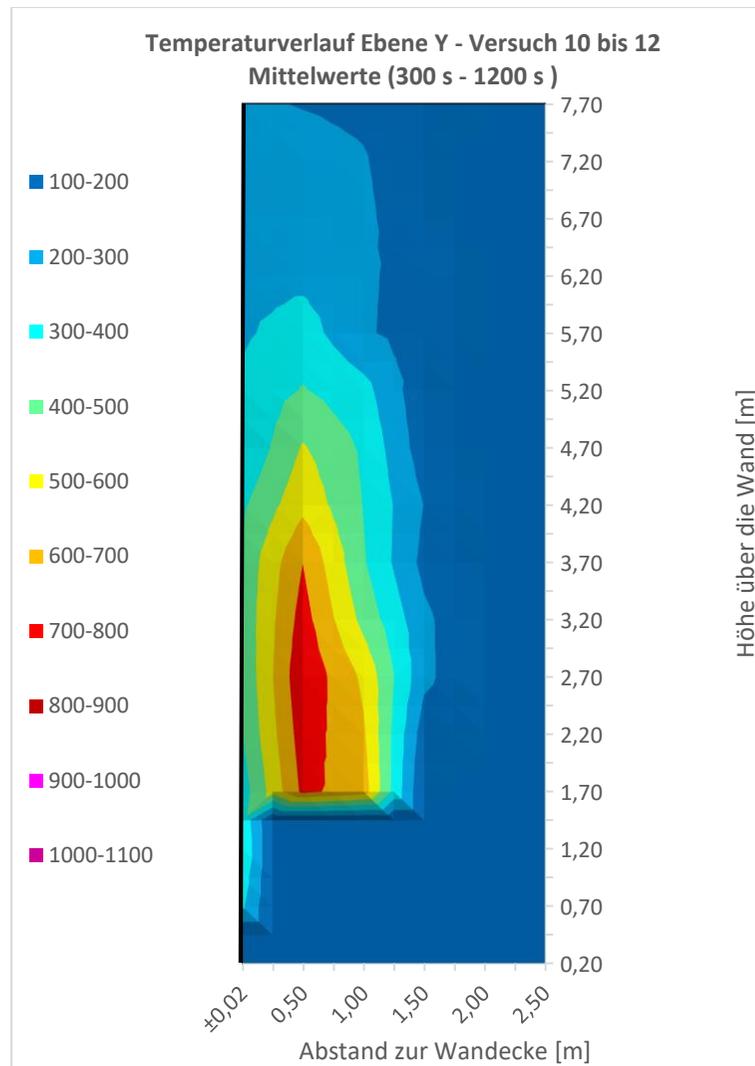


Abb. 7-174: Temperaturen in der Y-Ebene der Versuche 10-12 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

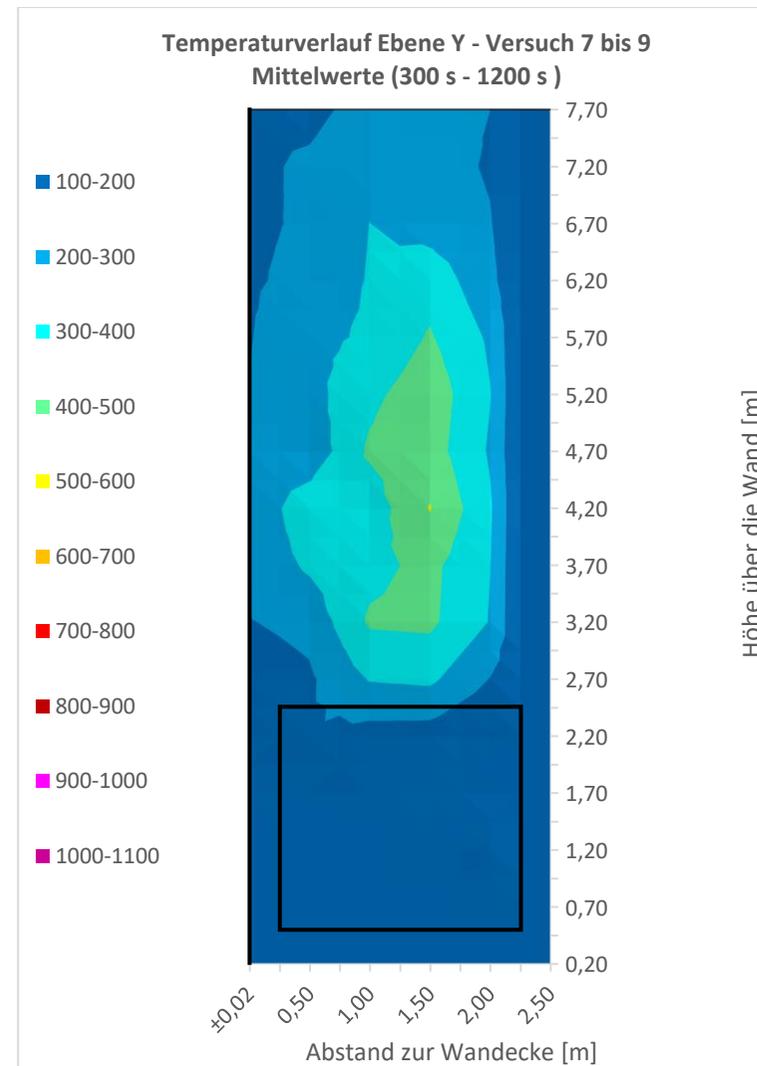


Abb. 7-175: Temperaturen in der Y-Ebene der Large-Exposure-Tests 7-9 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

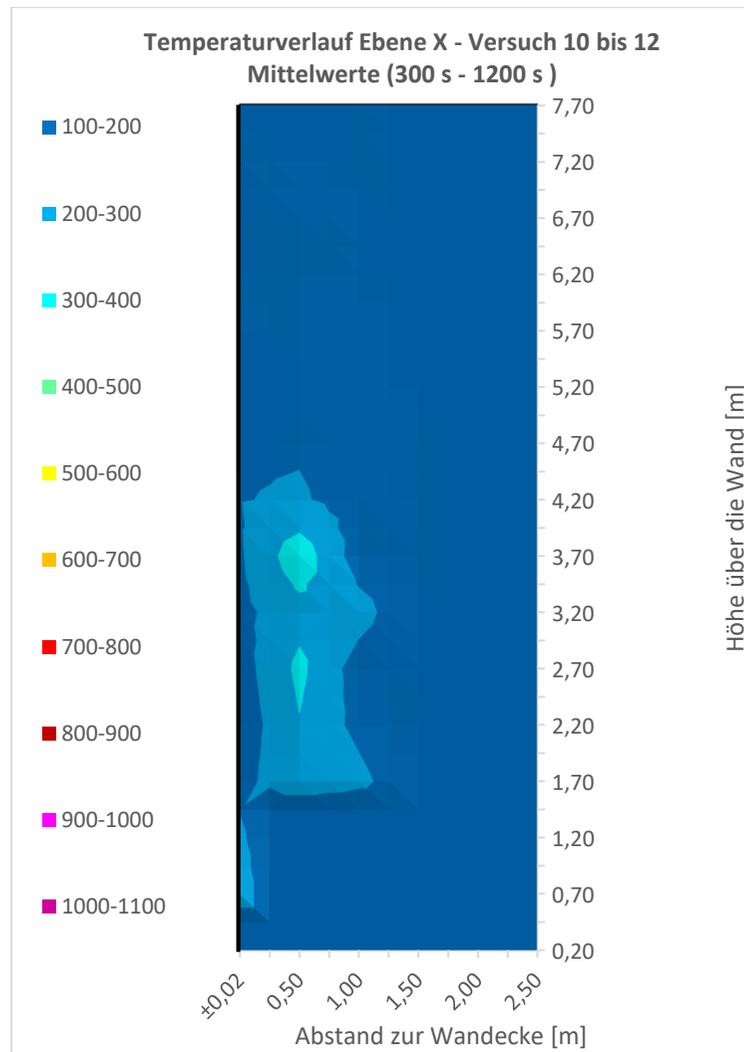


Abb. 7-176: Temperaturen in der X-Ebene der Versuche 10-12 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

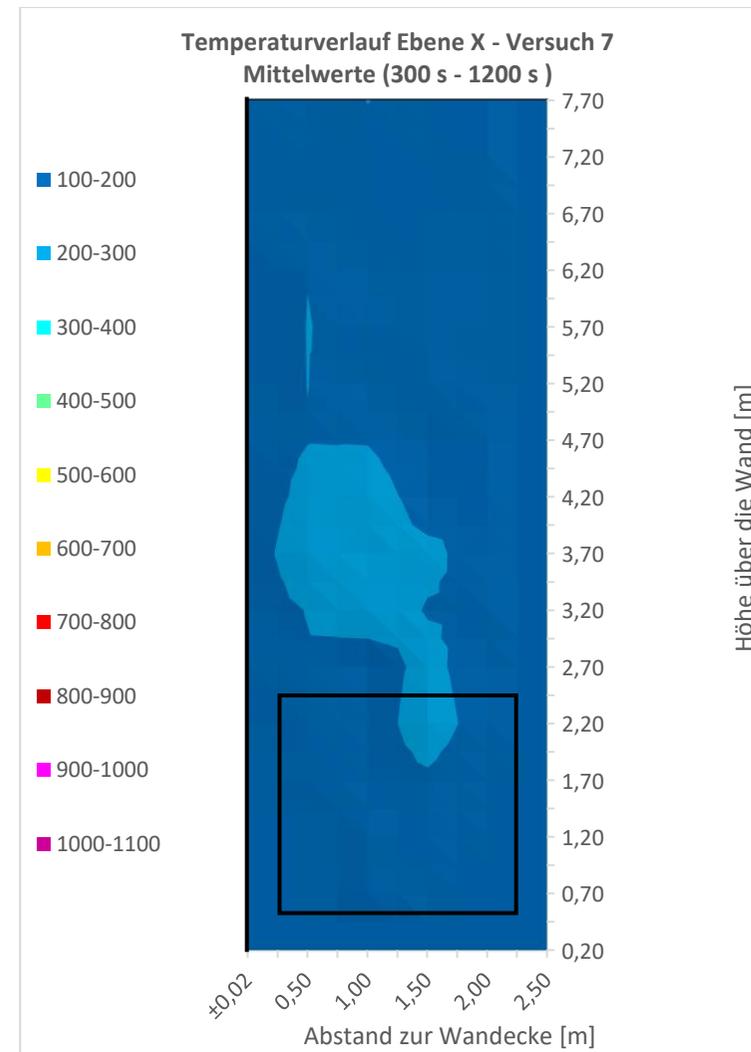


Abb. 7-177: Temperaturen in der X-Ebene des LargeExposure-Tests 7 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s (bei den Versuchen 8+9 waren zu vielen TE ausgefallen)

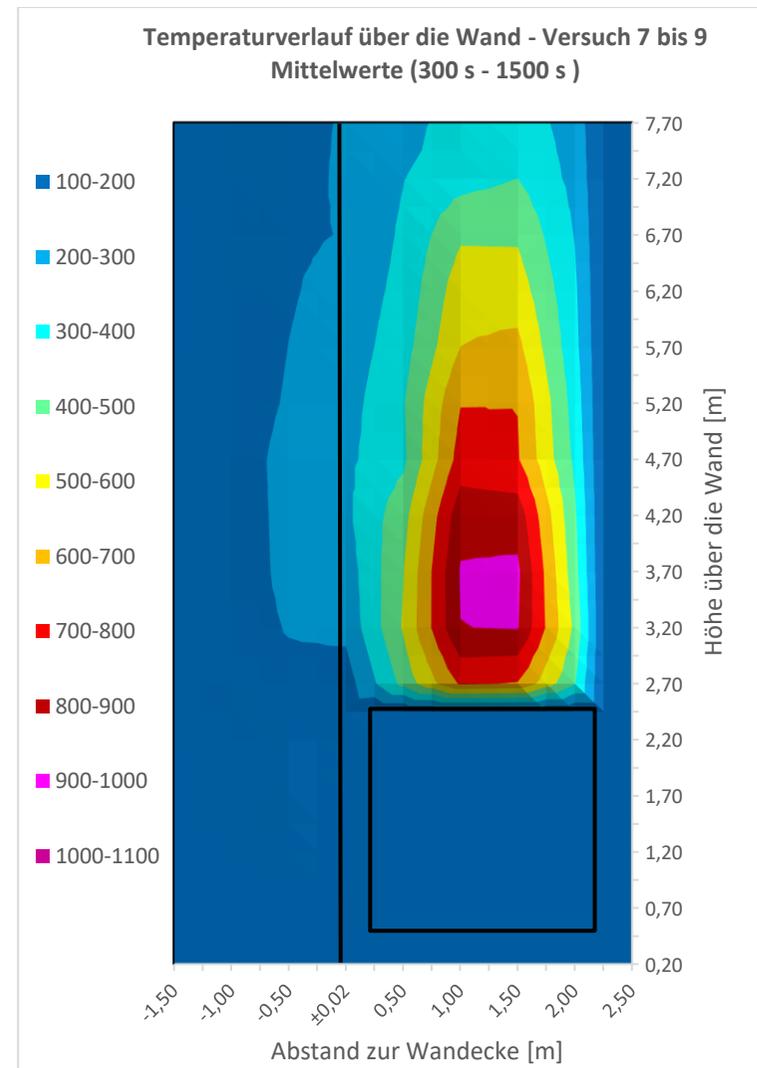
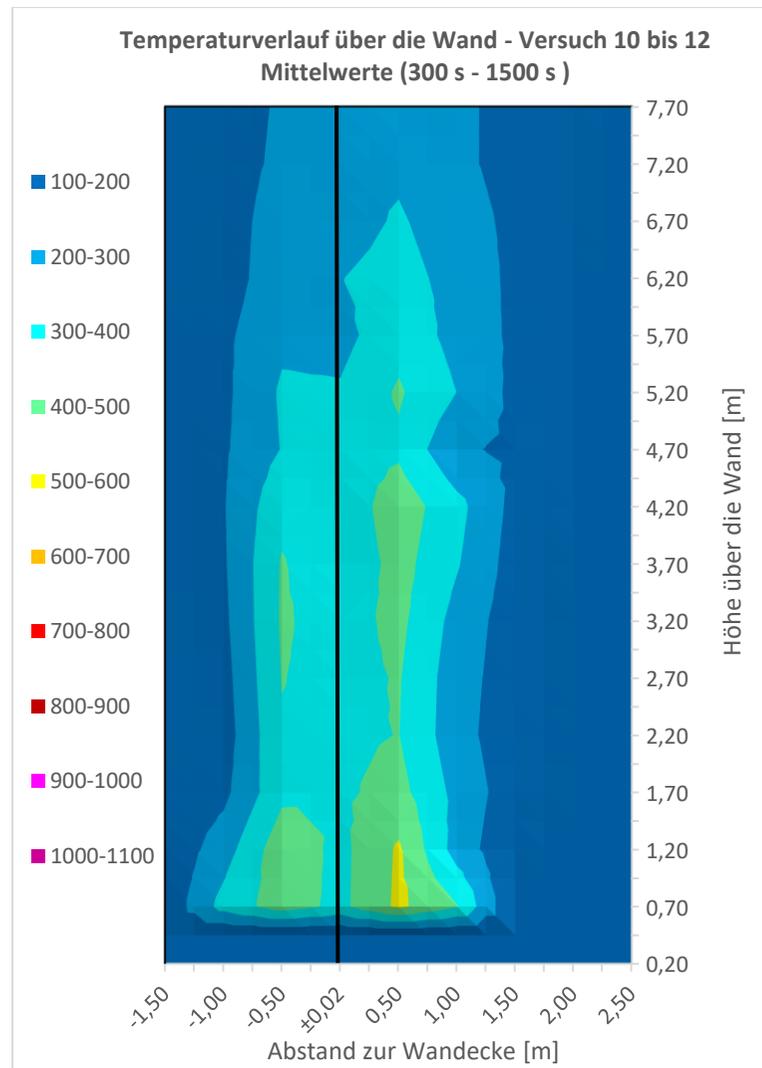


Abb. 7-178: Oberflächentemperaturen der Versuche 10-12 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

Abb. 7-179: Oberflächentemperaturen der Large-Exposure-Tests 7-9 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

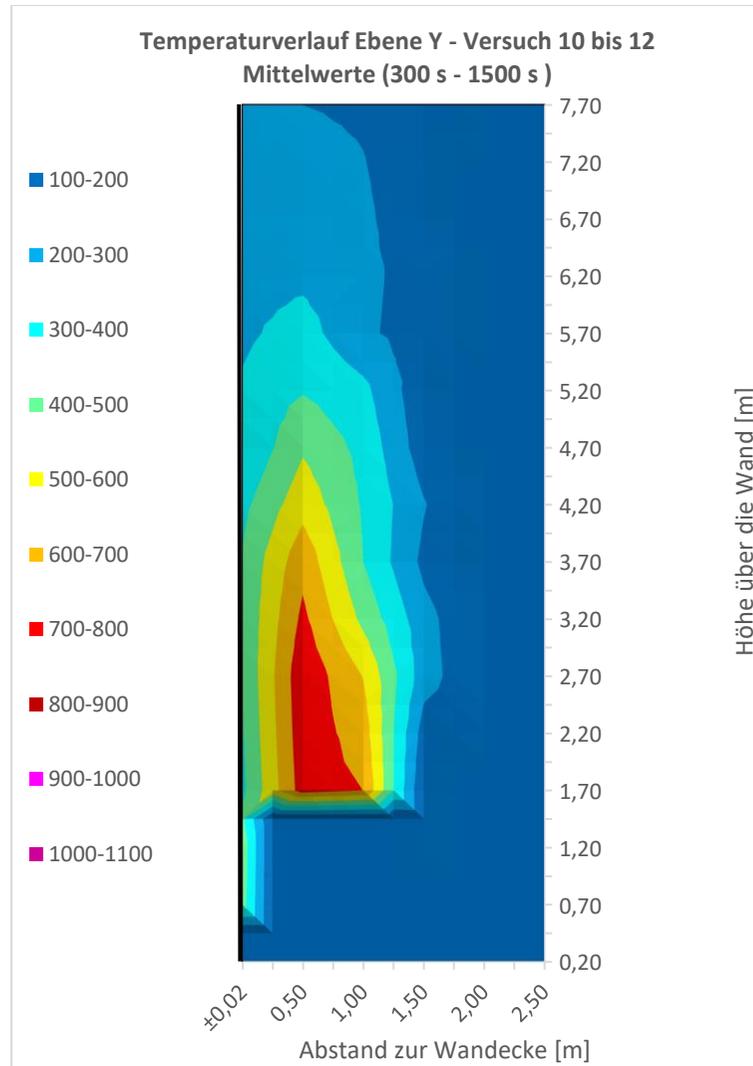


Abb. 7-180: Temperaturen in der Y-Ebene der Versuche 10-12 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

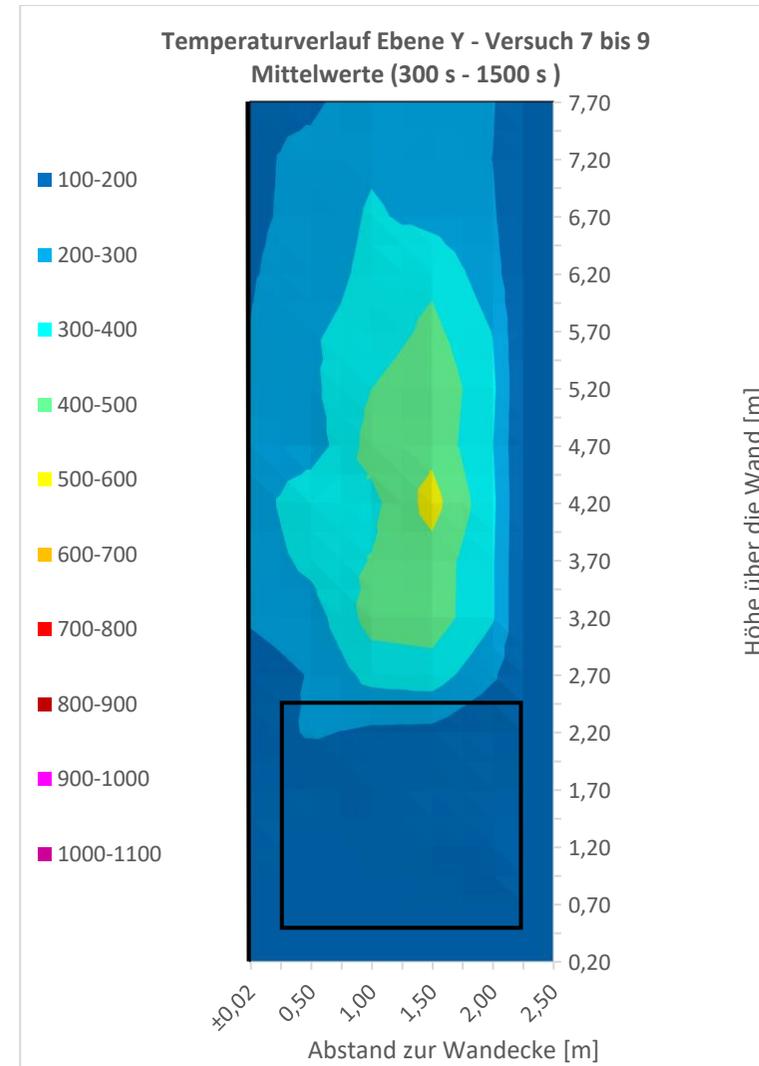


Abb. 7-181: Temperaturen in der Y-Ebene der Large-Exposure-Tests 7-9 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

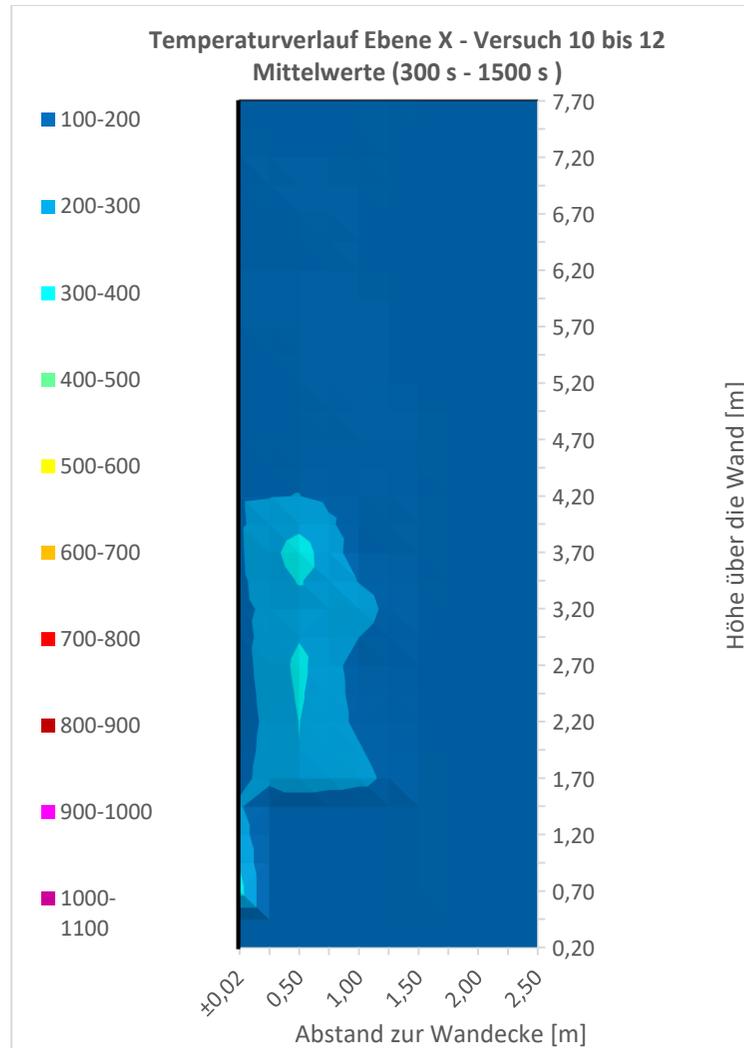


Abb. 7-182: Temperaturen in der X-Ebene der Versuche 10-12 nach DIN 4102-20 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

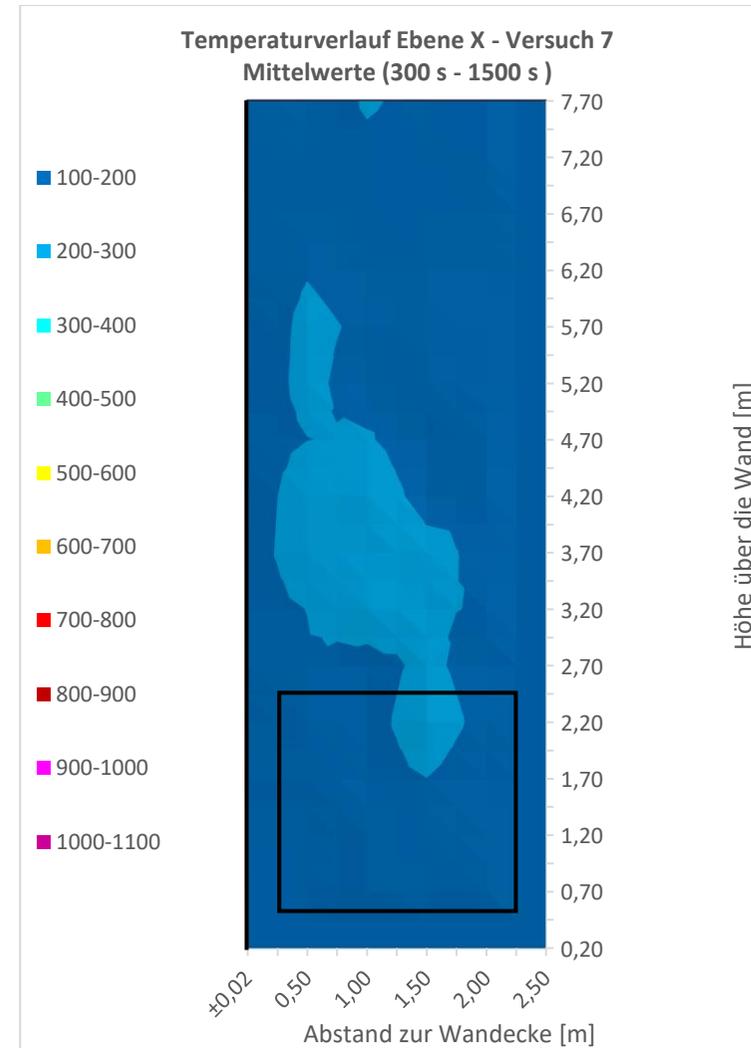


Abb. 7-183: Temperaturen in der X-Ebene des Large-Exposure-Tests 7 – Mittelwerte 300 s – 1500 s (bei den Versuchen 8+9 waren zu vielen TE ausgefallen)

Gegenüberstellung der Isothermen der Large-Exposure-Tests V7-V9 nach ([3], [20])

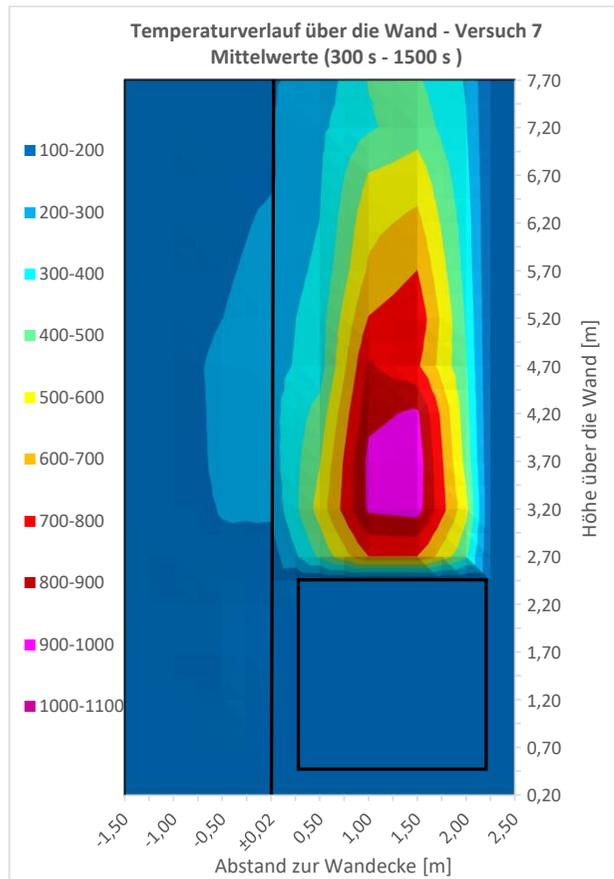


Abb. 7-184: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 7 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

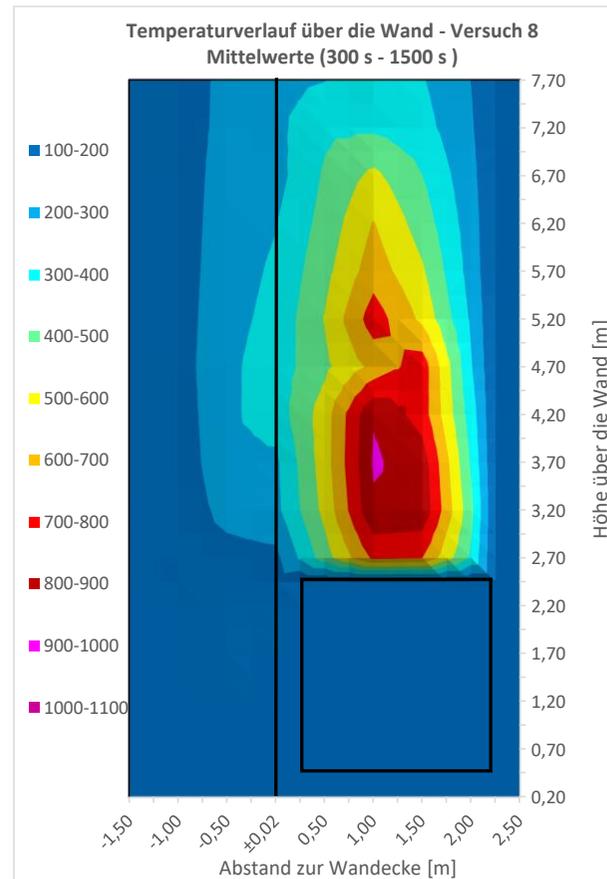


Abb. 7-185: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 8 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

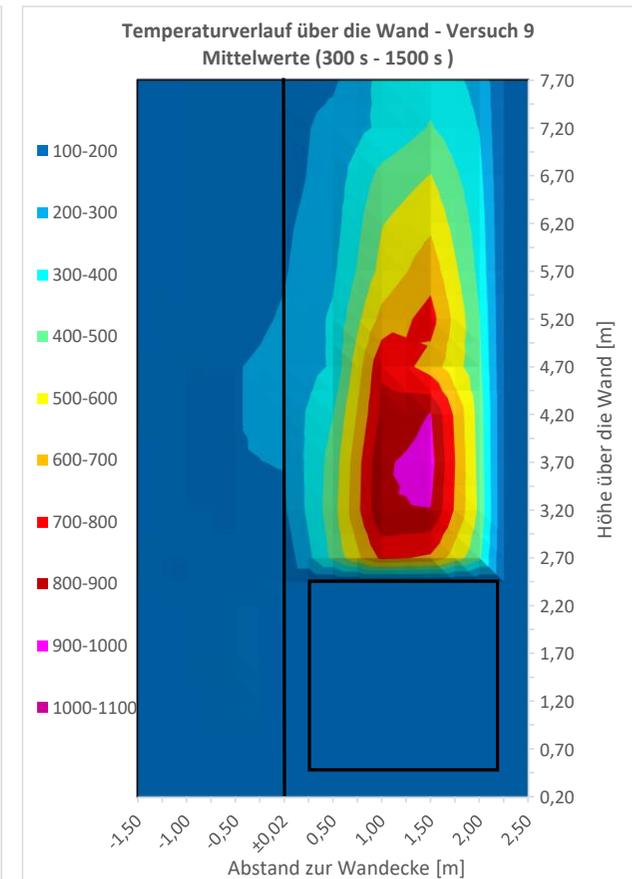


Abb. 7-186: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 9 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

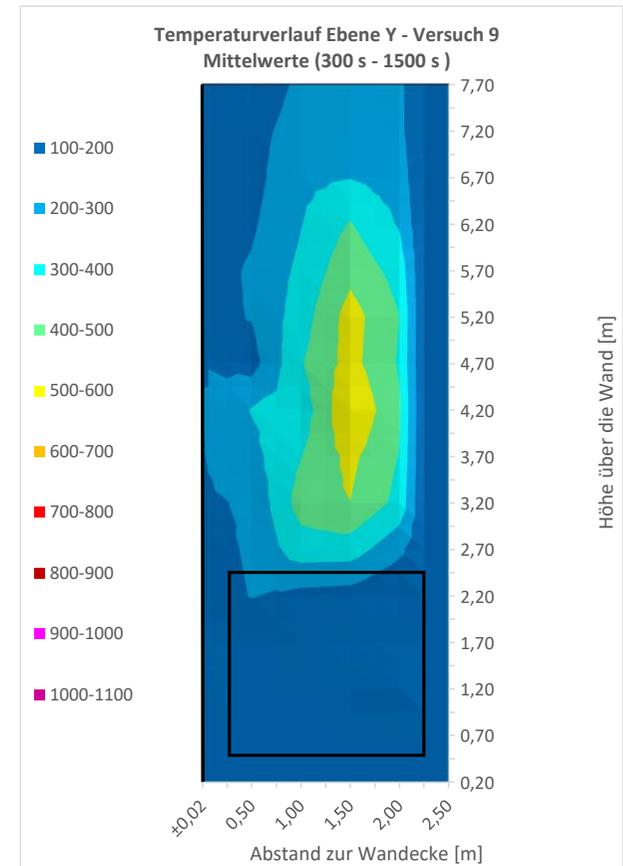
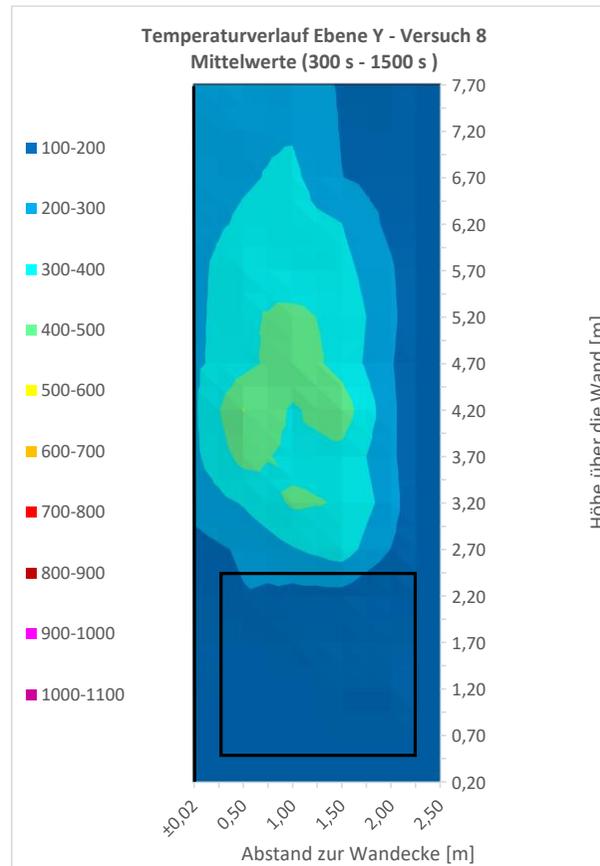
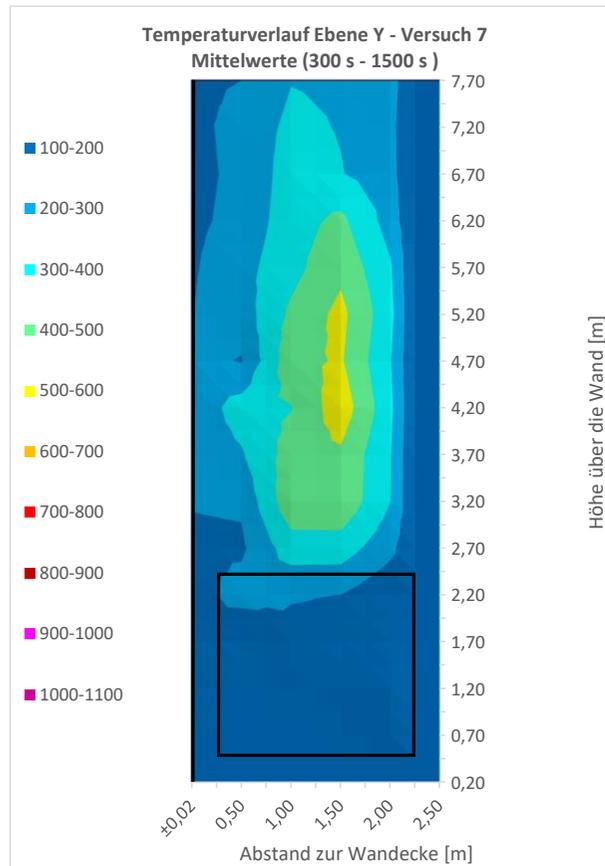


Abb. 7-187: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 7 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

Abb. 7-188: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 8 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

Abb. 7-189: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 9 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

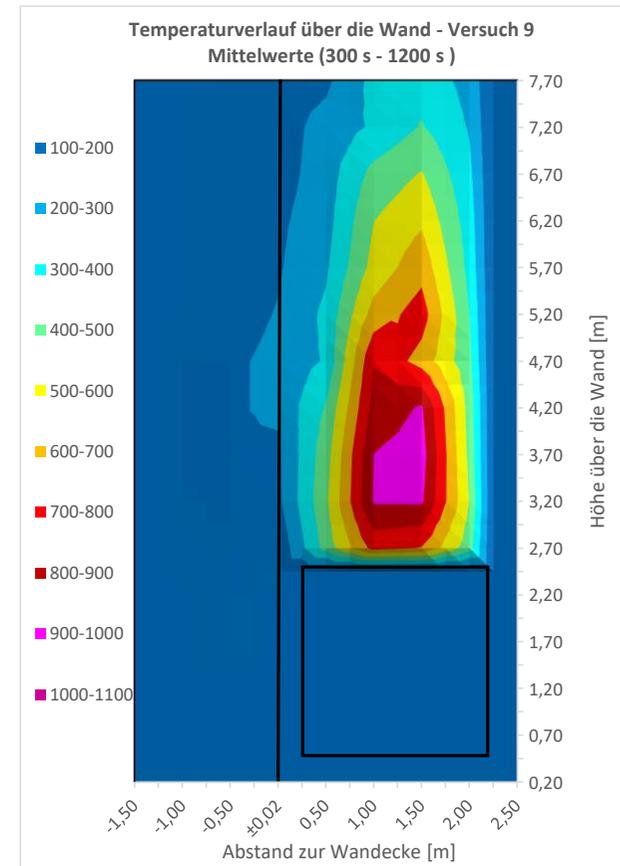
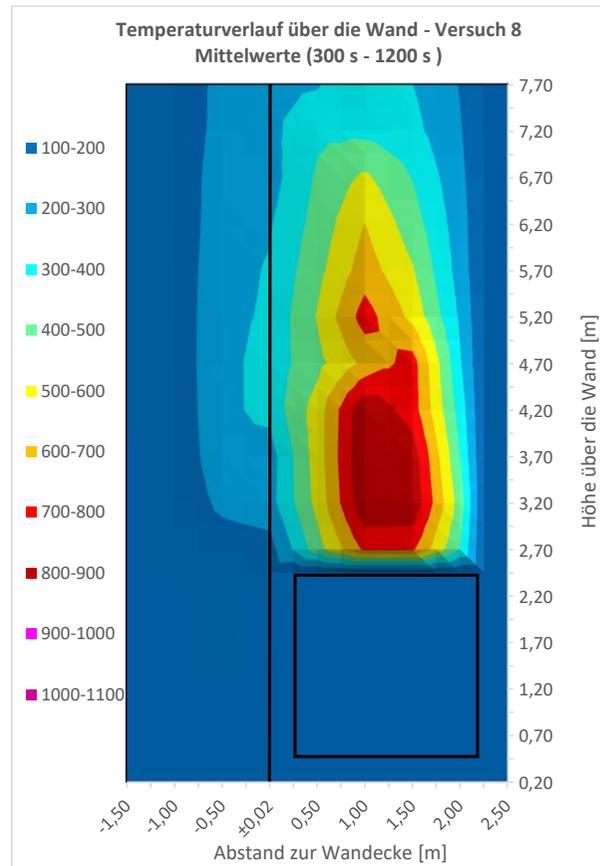
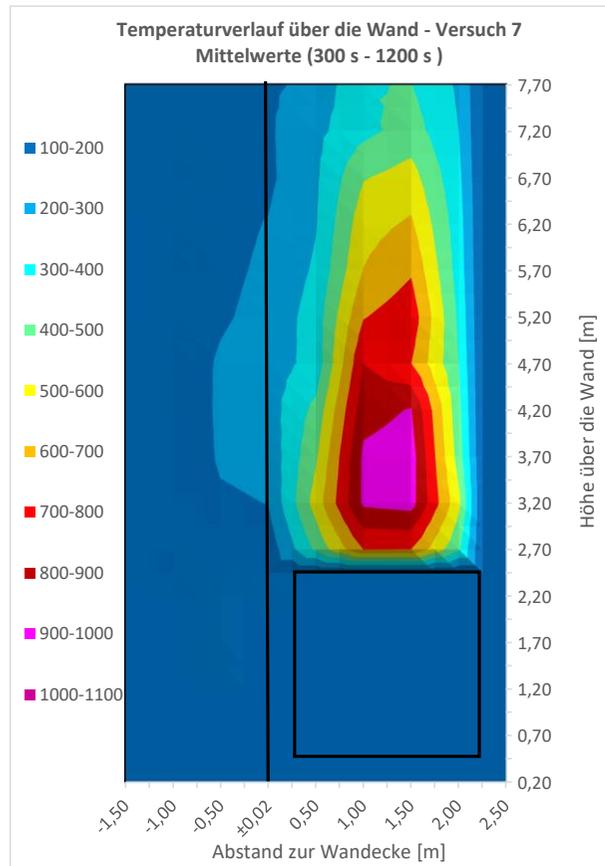


Abb. 7-190: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 7 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-191: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 8 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-192: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 9 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

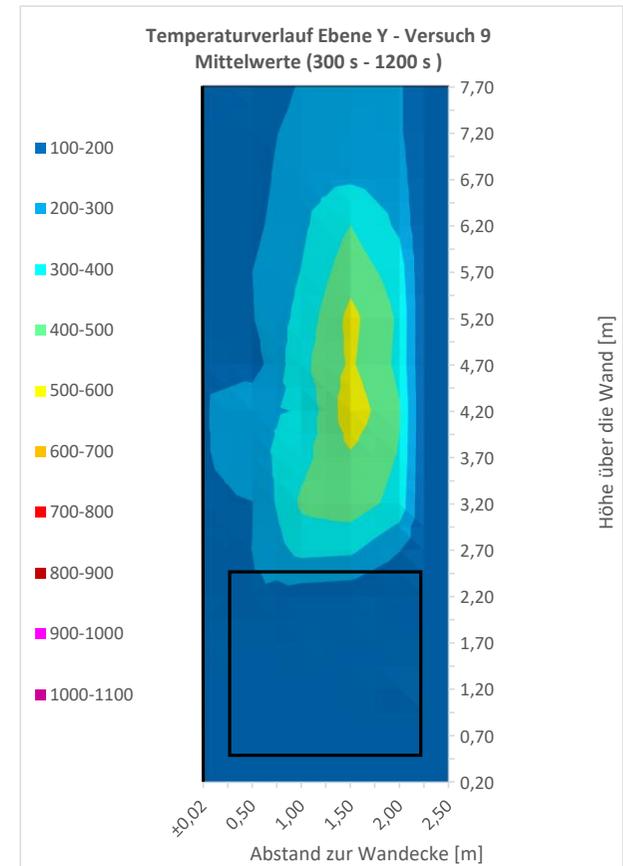
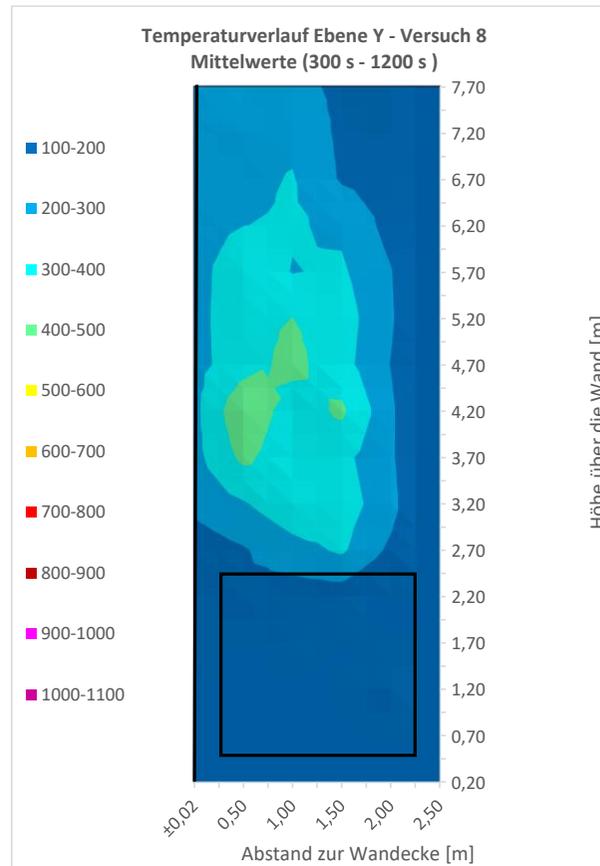
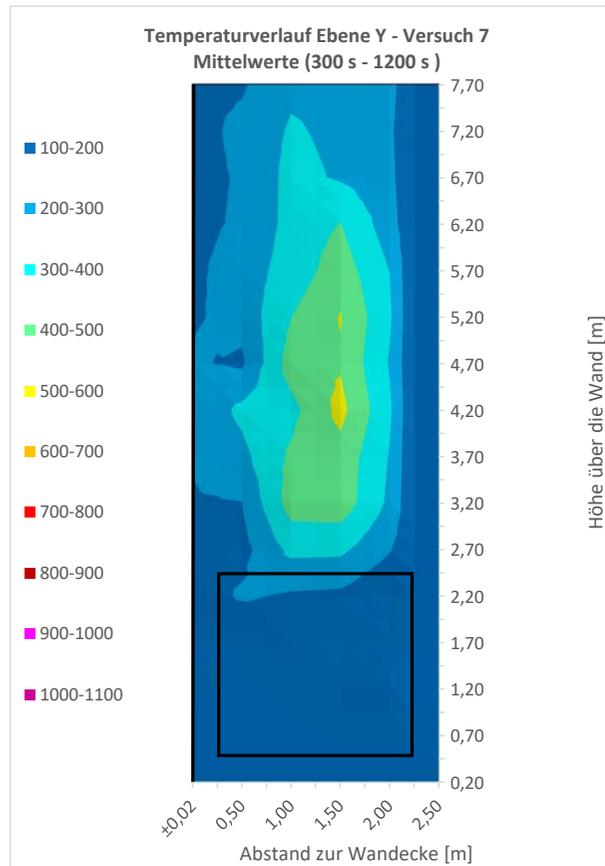


Abb. 7-193: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 7 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-194: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 8 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-195: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 9 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Gegenüberstellung der Isothermen der Brandversuche V10 bis V12 nach DIN 4102-24 (Arbeitsfassung -Stand: 2021-11) [13]

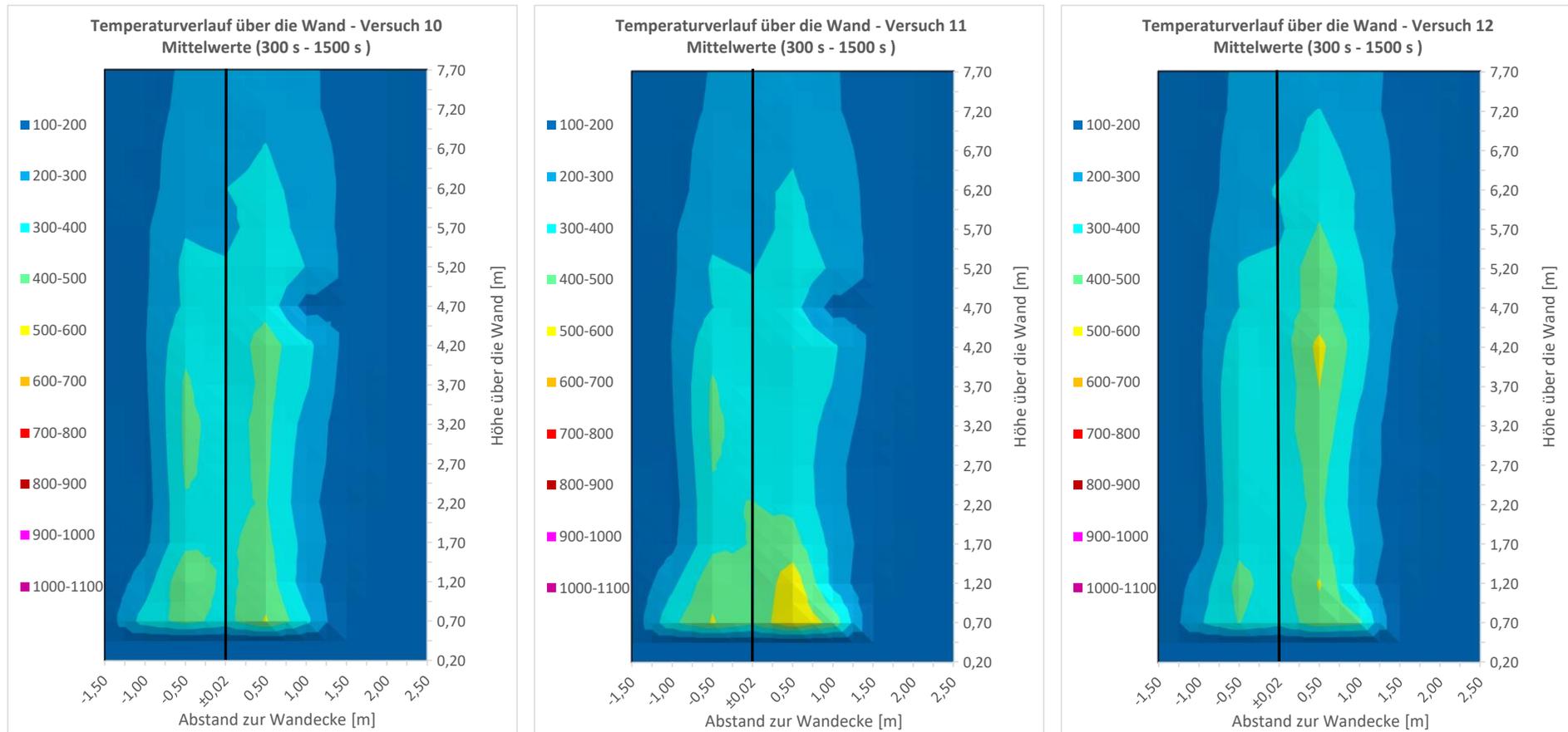


Abb. 7-196: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 10 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

Abb. 7-197: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 11 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

Abb. 7-198: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 12 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

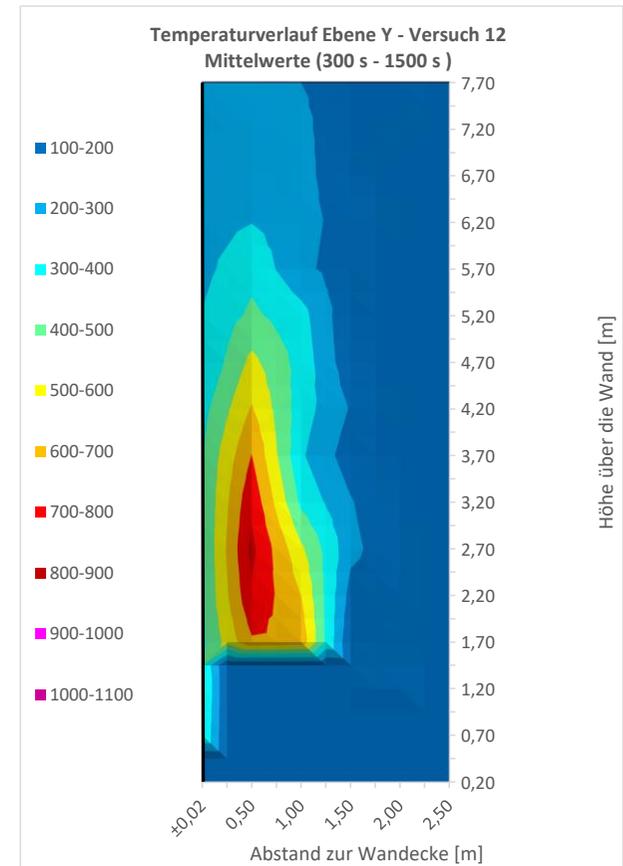
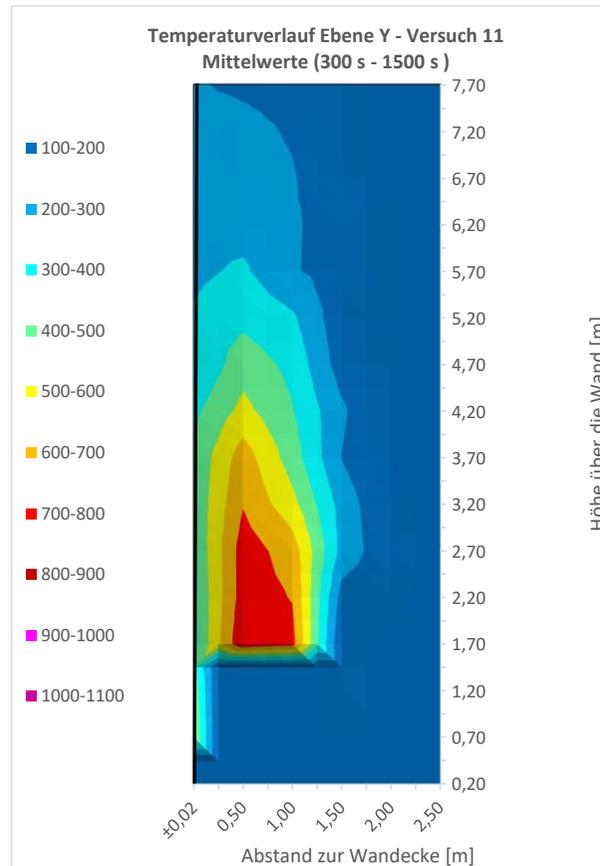
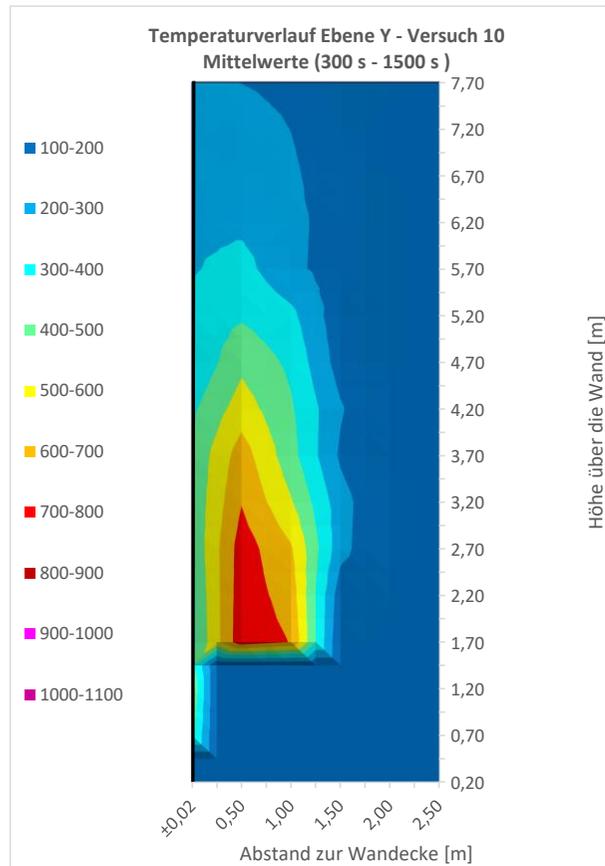


Abb. 7-199: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 10 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

Abb. 7-200: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 11 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

Abb. 7-201: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 12 – Mittelwerte 300 s bis 1500 s

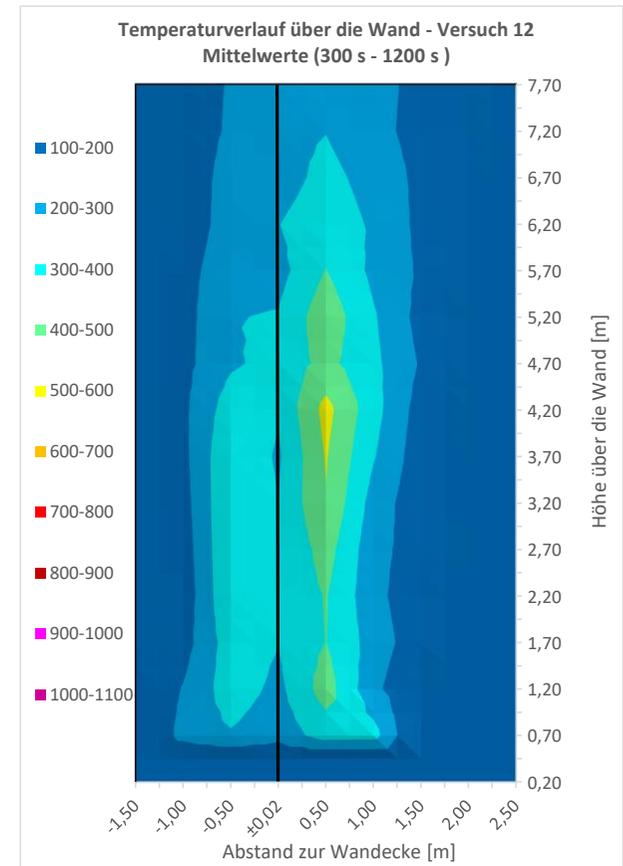
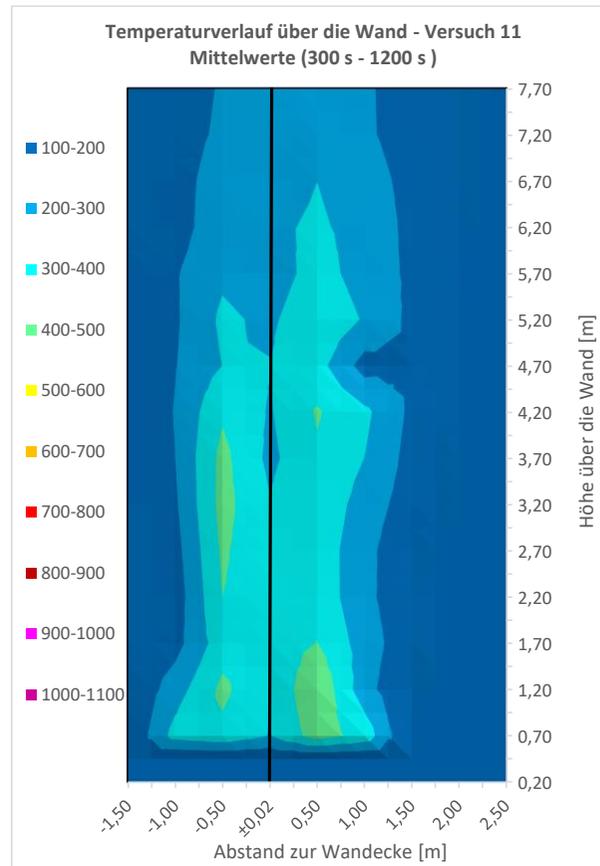
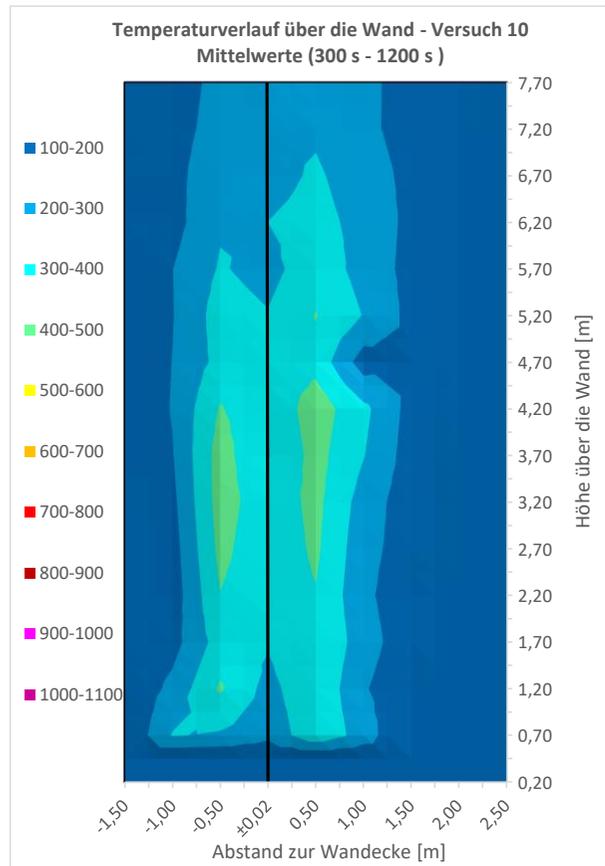


Abb. 7-202: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 10 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-203: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 11 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-204: Temperaturen an der Oberfläche bei Versuch 12 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

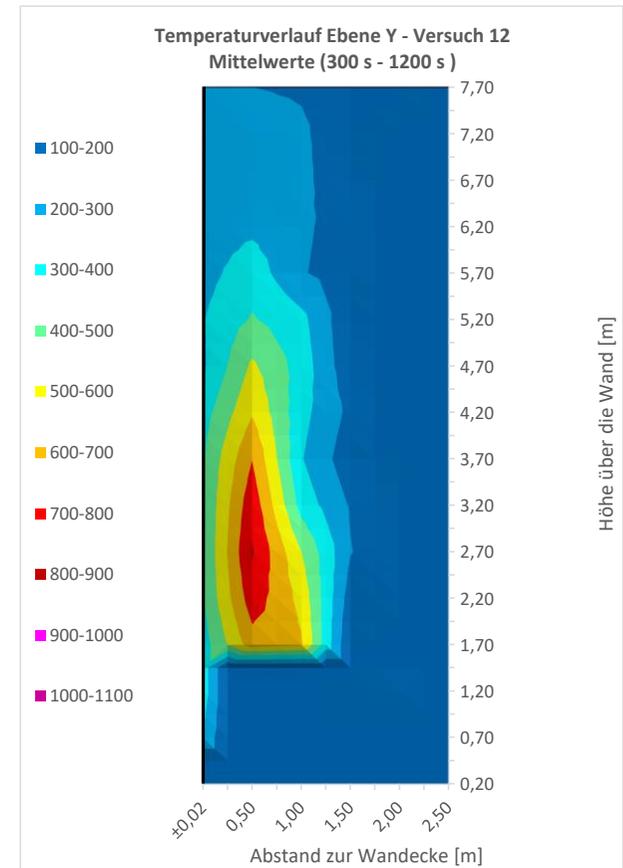
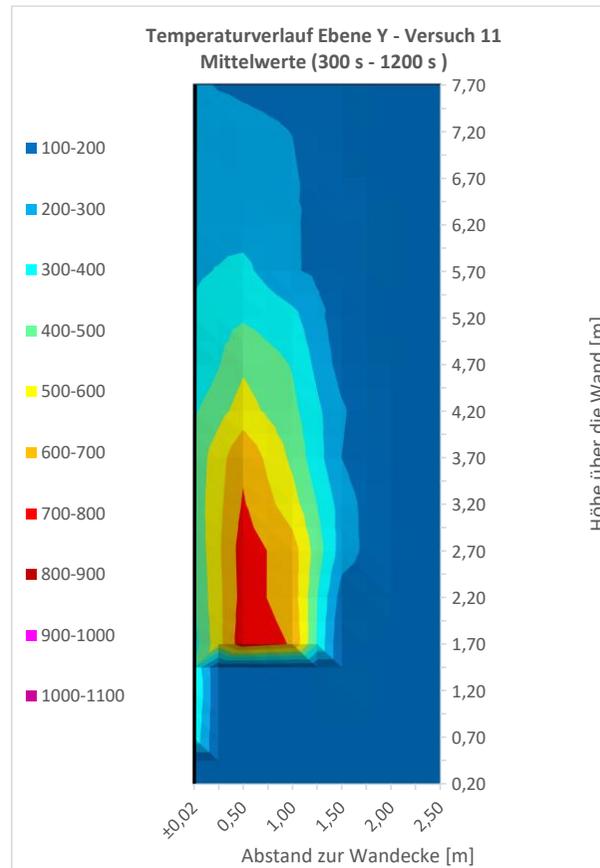
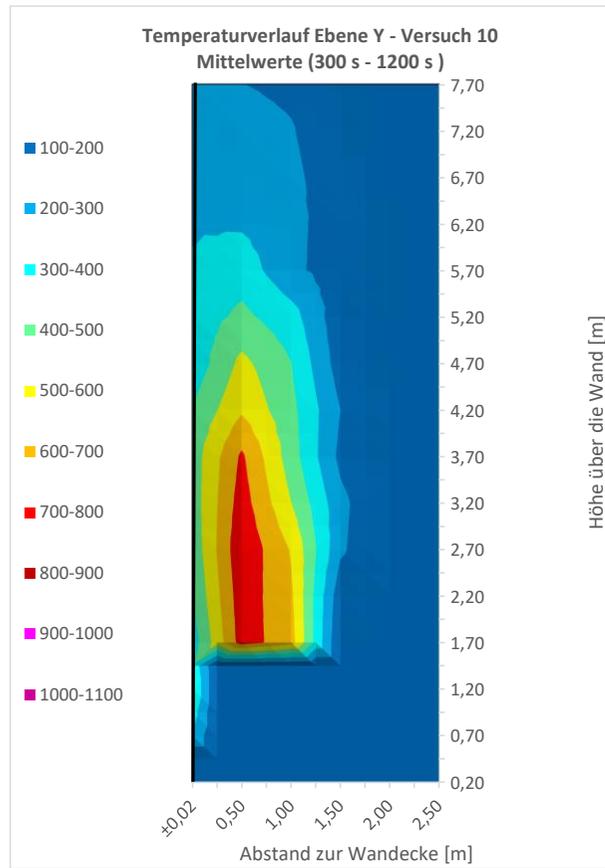


Abb. 7-205: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 10 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-206: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 11 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

Abb. 7-207: Temperaturen in der Y-Ebene bei Versuch 12 – Mittelwerte 300 s bis 1200 s

7.4 Mittelwerttemperaturen – Tabellen

7.4.1 Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 – 300 s bis 900 s

Tabelle 7-3: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 900 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	27,55	47,70	91,67	137,86	121,81	103,81	86,94	73,54
	7,20	25,40	46,40	91,85	147,25	137,91	107,58	93,74	76,09
	6,70	24,81	44,39	95,53	147,45	139,23	118,42	95,99	84,93
	6,20	23,32	37,03	102,21	176,62	159,19	141,09	111,10	90,71
	5,70	23,46	40,69	100,86	170,22	178,53	149,27	123,18	87,97
	5,20	23,85	34,54	104,15	217,32	203,91	158,06	136,32	100,08
	4,70	24,68	34,38	91,39	258,04	227,72	158,73	207,16	106,81
	4,20	25,96	34,77	102,75	258,68	276,18	255,26	183,64	119,74
	3,70	27,75	35,96	102,52	272,22	325,95	323,90	235,04	123,11
	3,20	29,26	38,22	92,85	376,35	401,88	418,08	291,65	136,79
	2,70	33,62	47,30	95,20	450,74	555,66	657,47	395,57	143,25
	2,20	35,53	48,55	95,20	546,00	695,78	830,51	558,65	159,97
	1,70	38,86	54,66	98,47	430,02	764,39	783,25	619,34	156,73
	1,20	35,09	48,48	95,72	190,36	Brandkammer			
0,70	34,16	47,20	67,97	87,20					

Tabelle 7-4: Mittelwerttemperaturen in der Y-Achse über den Zeitraum 300 s – 900 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				91,67	67,66	62,63	47,48	40,42
	7,20				91,85	80,71	68,56	46,13	40,39
	6,70				95,53	77,60	68,65	50,68	41,85
	6,20				102,21	77,82	63,54	60,11	41,09
	5,70				100,86	85,55	68,85	60,44	42,30
	5,20				104,15	81,38	64,39	56,98	40,44
	4,70				91,39	85,04	65,35	58,76	45,62
	4,20				102,75	83,06	55,61	63,38	48,19
	3,70				102,52	82,88	63,20	69,69	55,19
	3,20				92,85	68,89	72,93	73,26	53,47
	2,70				95,20	74,83	118,11	80,22	81,80
	2,20				95,20	124,76	105,00	121,98	121,24
	1,70				98,47	79,30	108,07	126,70	97,58
	1,20				95,72	77,71	99,44	86,14	74,68
0,70				67,97	56,29	93,37	45,24	38,11	

Tabelle 7-5: Mittelwerttemperaturen in der X-Achse über den Zeitraum 300 s – 900 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				47,70	44,09	31,28	25,19	25,26
	7,20				46,40	47,64	30,41	25,22	23,33
	6,70				44,39	48,02	27,15	23,76	21,98
	6,20				37,03	40,51	28,25	23,83	23,89
	5,70				40,69	38,26	29,24	24,58	23,95
	5,20				34,54	35,35	26,73	24,88	23,22
	4,70				34,38	35,65	29,13	23,34	23,96
	4,20				34,77	39,85	36,31	26,10	27,67
	3,70				35,96	39,25	34,28	30,92	28,71
	3,20				38,22	45,93	47,40	29,41	27,03
	2,70				47,30	45,69	22,28	44,64	36,72
	2,20				48,55	75,87	48,89	103,63	50,18
	1,70				54,66	89,03	65,97	101,86	54,18
	1,20				48,48	84,37	103,44	106,18	46,56
0,70				47,20	39,26	75,73	66,86	34,21	

7.4.2 Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 – 300 s bis 1200 s

Tabelle 7-6: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	28,30	47,78	91,04	137,97	120,32	101,62	84,85	71,63
	7,20	26,34	46,62	91,43	147,63	135,63	105,54	91,32	74,18
	6,70	25,77	44,72	94,98	148,98	137,39	115,84	93,89	82,34
	6,20	24,26	38,07	101,34	177,80	156,79	137,19	108,16	87,88
	5,70	24,37	41,42	100,65	170,36	175,58	145,80	119,72	85,97
	5,20	24,82	36,04	104,10	219,21	199,90	153,74	132,34	96,99
	4,70	25,62	35,93	92,55	257,11	223,13	152,85	199,94	103,44
	4,20	26,89	36,38	103,32	260,30	268,37	244,66	176,40	115,52
	3,70	28,81	37,60	103,43	275,30	315,15	308,26	223,74	118,89
	3,20	30,69	40,27	94,34	372,99	387,19	394,94	277,08	131,32
	2,70	35,85	51,13	97,09	444,01	528,82	608,21	373,60	138,08
	2,20	38,21	51,63	98,96	529,73	666,38	776,95	529,15	155,76
	1,70	42,02	59,00	106,47	431,34	729,46	754,93	607,92	155,64
	1,20	38,08	53,06	109,32	212,03	Brandkammer			
0,70	38,36	53,47	79,11	101,41					

Tabelle 7-7: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				91,04	72,25	66,42	51,44	42,08
	7,20				91,43	83,56	67,81	48,15	42,81
	6,70				94,98	80,42	68,61	50,62	43,78
	6,20				101,34	83,01	67,10	59,91	43,50
	5,70				100,65	87,46	71,05	59,34	44,32
	5,20				104,10	81,94	64,07	55,78	42,60
	4,70				92,55	84,47	64,10	57,72	48,16
	4,20				103,32	87,29	57,61	65,29	50,48
	3,70				103,43	83,31	62,47	68,78	55,33
	3,20				94,34	69,21	77,46	75,05	56,69
	2,70				97,09	74,90	122,88	84,81	84,35
	2,20				98,96	131,60	105,04	123,66	124,15
	1,70				106,47	84,63	114,30	137,40	107,12
	1,20				109,32	86,83	114,43	98,06	84,09
	0,70				79,11	65,30	114,73	52,01	42,68

Tabelle 7-8: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				47,78	46,75	32,06	26,38	27,14
	7,20				46,62	48,91	31,75	26,83	24,77
	6,70				44,72	49,62	28,40	24,99	23,16
	6,20				38,07	42,34	29,52	25,34	24,65
	5,70				41,42	41,26	30,40	26,43	25,05
	5,20				36,04	37,92	27,56	26,85	24,62
	4,70				35,93	36,84	30,05	24,65	25,51
	4,20				36,38	43,17	37,80	27,54	28,58
	3,70				37,60	40,72	35,09	33,59	29,85
	3,20				40,27	46,20	47,98	30,61	28,91
	2,70				51,13	46,76	23,61	48,50	37,44
	2,20				51,63	77,43	52,23	109,26	52,78
	1,70				59,00	95,93	71,20	109,48	57,72
	1,20				53,06	94,10	119,06	118,15	50,94
	0,70				53,47	43,56	87,21	77,08	37,48

7.4.3 Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V1 bis V3 – 0 s bis 1200 s

Tabelle 7-9: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 0 s – 1200 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70	25,99	42,03	77,70	115,61	101,27	86,18	72,54	61,83
	7,20	24,36	41,07	78,09	123,41	113,94	89,24	77,85	63,90
	6,70	23,88	39,52	81,11	124,05	114,96	97,58	79,78	70,85
	6,20	22,62	33,92	86,40	147,92	130,58	114,98	91,49	75,47
	5,70	22,68	36,61	85,84	142,66	145,89	121,66	101,00	73,79
	5,20	22,99	32,00	88,85	182,15	165,61	128,10	111,46	83,37
	4,70	23,65	31,85	79,14	214,84	184,26	128,71	165,67	89,07
	4,20	24,64	32,12	88,62	217,35	221,33	202,12	148,55	99,72
	3,70	26,15	33,01	88,87	229,87	259,44	254,32	188,81	102,94
	3,20	27,61	35,05	80,89	315,31	318,90	325,84	234,08	114,30
	2,70	31,62	43,46	82,21	381,16	437,87	505,86	315,96	120,91
	2,20	33,51	44,00	82,10	466,68	554,21	655,43	449,65	138,54
	1,70	36,52	49,87	87,35	393,27	633,33	661,93	525,37	141,32
	1,20	33,52	45,33	89,51	171,65	Brandkammer			
0,70	33,65	45,53	65,56	82,75					

Tabelle 7-10: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 0 s – 1200 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				77,70	60,15	55,59	43,64	36,59
	7,20				78,09	69,40	58,32	41,57	37,22
	6,70				81,11	67,23	58,55	44,10	38,13
	6,20				86,40	68,32	55,89	51,47	37,70
	5,70				85,84	73,02	59,41	51,37	38,47
	5,20				88,85	69,10	54,68	48,38	37,07
	4,70				79,14	71,85	54,58	49,73	41,29
	4,20				88,62	71,65	48,64	54,79	43,19
	3,70				88,87	69,50	52,70	57,90	47,40
	3,20				80,89	58,33	63,50	62,01	47,63
	2,70				82,21	62,35	98,74	69,09	69,06
	2,20				82,10	105,63	85,79	100,27	100,04
	1,70				87,35	69,80	93,64	111,00	86,94
	1,20				89,51	71,75	93,82	80,92	69,90
0,70				65,56	54,82	92,50	44,50	37,25	

Tabelle 7-11: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 0 s – 1200 s (Versuche 1-3)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				42,03	40,20	29,03	24,32	24,81
	7,20				41,07	42,34	28,58	24,65	23,01
	6,70				39,52	42,97	25,89	23,27	21,78
	6,20				33,92	36,90	26,79	23,49	23,03
	5,70				36,61	35,81	27,44	24,28	23,28
	5,20				32,00	33,24	25,29	24,58	22,90
	4,70				31,85	32,48	27,20	22,90	23,57
	4,20				32,12	37,09	33,14	25,13	26,00
	3,70				33,01	35,27	31,06	29,65	26,99
	3,20				35,05	39,61	41,04	27,51	26,12
	2,70				43,46	40,18	22,13	41,12	32,88
	2,20				44,00	64,18	44,18	88,43	44,68
	1,70				49,87	78,86	59,40	89,24	48,71
	1,20				45,33	77,76	96,30	96,40	43,60
0,70				45,53	37,77	72,19	64,12	33,04	

7.4.4 Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V4 bis V6 – 300 s bis 900 s

Tabelle 7-12: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 900 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	23,98	41,23	76,37	115,80	101,96	87,06	73,20	61,71
	7,20	22,21	40,00	76,90	122,54	114,09	91,16	78,95	63,39
	6,70	21,82	37,92	79,52	121,72	116,06	100,72	81,49	70,00
	6,20	21,08	32,47	84,36	143,97	132,44	119,38	94,34	74,68
	5,70	21,67	33,31	83,89	136,89	147,76	127,92	104,35	72,97
	5,20	22,79	29,35	85,45	171,80	168,38	133,42	116,08	82,05
	4,70	24,18	29,40	76,54	199,30	188,99	135,44	177,79	88,00
	4,20	26,03	30,73	81,84	199,11	227,98	222,27	156,80	97,91
	3,70	28,34	33,93	79,11	209,22	271,45	287,14	201,46	100,41
	3,20	31,31	39,76	77,03	287,87	346,23	376,63	253,38	108,41
	2,70	37,23	54,80	90,33	357,05	517,40	608,25	341,32	117,60
	2,20	39,79	55,38	106,17	500,31	671,39	777,64	505,56	140,02
	1,70	43,33	62,85	128,00	687,52	891,09	870,35	618,88	140,87
	1,20	38,46	53,32	107,10	193,75	Brandkammer			
0,70	37,02	48,83	62,71	55,72					

Tabelle 7-13: Mittelwerttemperaturen in der Y-Achse über den Zeitraum 300 s – 900 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				76,37	57,12	51,53	39,26	31,24
	7,20				76,90	65,49	50,70	36,20	31,40
	6,70				79,52	62,88	52,89	36,64	30,78
	6,20				84,36	66,41	54,33	44,11	29,70
	5,70				83,89	68,75	58,23	40,79	29,25
	5,20				85,45	63,28	51,21	36,73	26,92
	4,70				76,54	62,27	49,29	36,85	29,16
	4,20				81,84	70,32	42,85	43,09	29,79
	3,70				79,11	62,28	39,85	43,38	32,66
	3,20				77,03	45,76	59,79	51,31	38,20
	2,70				90,33	57,99	137,16	69,61	67,15
	2,20				106,17	184,61	151,27	131,93	122,12
	1,70				128,00	98,35	164,23	168,23	116,42
	1,20				107,10	81,70	102,10	119,08	79,87
	0,70				62,71	44,61	71,39	38,18	36,06

Tabelle 7-14: Mittelwerttemperaturen in der X-Achse über den Zeitraum 300 s – 900 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				41,23	38,43	23,48	20,32	20,52
	7,20				40,00	38,21	23,77	20,74	19,22
	6,70				37,92	37,71	21,54	19,62	18,49
	6,20				32,47	31,17	22,79	20,31	19,12
	5,70				33,31	31,57	22,94	21,99	20,06
	5,20				29,35	29,40	21,12	22,93	20,65
	4,70				29,40	30,27	25,31	21,79	22,31
	4,20				30,73	37,58	34,60	25,59	26,89
	3,70				33,93	40,13	33,58	35,12	29,42
	3,20				39,76	49,63	49,04	31,62	31,02
	2,70				54,80	48,33	18,36	58,12	43,66
	2,20				55,38	95,84	61,15	135,12	66,78
	1,70				62,85	106,97	87,10	119,22	66,73
	1,20				53,32	101,66	110,69	119,56	43,48
	0,70				48,83	40,17	83,50	76,22	34,22

7.4.5 Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V4 bis V6 – 300 s bis 1200 s

Tabelle 7-15: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	24,28	41,43	76,68	116,49	102,72	88,28	74,76	63,29
	7,20	22,56	40,12	77,26	123,24	114,50	92,46	80,70	65,22
	6,70	22,15	37,95	79,60	122,81	116,63	102,15	83,62	71,95
	6,20	21,50	32,71	84,14	144,80	133,03	120,86	96,66	76,92
	5,70	22,09	33,39	83,69	137,00	148,51	130,02	106,91	75,41
	5,20	23,23	29,79	85,16	172,26	169,00	135,35	118,85	84,61
	4,70	24,76	30,14	76,87	198,97	189,52	138,51	180,18	90,62
	4,20	26,67	31,64	81,36	199,74	228,01	224,35	160,18	100,55
	3,70	29,07	35,15	78,68	210,84	271,21	288,45	204,17	103,32
	3,20	32,31	41,42	77,94	286,76	344,73	375,47	255,37	111,61
	2,70	38,74	57,87	93,22	355,69	513,34	601,78	342,03	121,44
	2,20	41,51	57,68	110,64	496,80	670,69	772,32	505,05	143,90
	1,70	45,17	65,59	134,55	679,44	890,34	867,41	612,36	143,35
	1,20	39,94	55,47	113,67	201,92	Brandkammer			
0,70	38,59	51,44	66,22	59,00					

Tabelle 7-16: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				76,68	58,38	52,82	40,97	32,42
	7,20				77,26	66,07	51,10	37,26	32,57
	6,70				79,60	63,51	53,23	37,47	31,87
	6,20				84,14	67,20	55,30	45,10	30,82
	5,70				83,69	68,99	59,08	41,46	30,22
	5,20				85,16	62,96	51,40	37,43	27,69
	4,70				76,87	61,49	49,44	37,37	30,15
	4,20				81,36	70,42	43,43	44,34	30,97
	3,70				78,68	62,31	40,54	44,12	33,66
	3,20				77,94	45,97	61,76	52,86	39,98
	2,70				93,22	58,80	140,39	72,45	69,59
	2,20				110,64	189,37	151,88	135,60	125,95
	1,70				134,55	101,68	167,79	173,22	121,48
	1,20				113,67	84,68	106,44	123,33	82,85
0,70				66,22	46,15	75,14	39,58	37,25	

Tabelle 7-17: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				41,43	39,08	23,95	20,91	21,33
	7,20				40,12	38,36	24,39	21,42	19,91
	6,70				37,95	38,00	22,04	20,19	19,05
	6,20				32,71	31,76	23,41	20,94	19,61
	5,70				33,39	32,61	23,48	22,93	20,57
	5,20				29,79	30,50	21,55	23,97	21,34
	4,70				30,14	31,10	25,95	22,54	23,17
	4,20				31,64	39,42	35,92	26,58	27,68
	3,70				35,15	41,31	34,54	37,02	30,36
	3,20				41,42	50,35	50,55	32,62	32,47
	2,70				57,87	49,46	18,99	60,54	44,66
	2,20				57,68	97,80	63,12	138,42	68,64
	1,70				65,59	110,31	89,52	122,23	68,51
	1,20				55,47	104,50	114,63	123,75	44,88
0,70				51,44	41,44	86,22	79,20	35,16	

7.4.6 Mittelwerte der Medium-Exposure-Tests V4 bis V6 – 0 s bis 1200 s

Tabelle 7-18: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 0 s – 1200 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	23,69	40,52	74,50	111,96	98,90	85,08	71,56	60,33
	7,20	21,98	39,22	75,01	118,39	110,68	88,81	77,12	61,90
	6,70	21,57	37,20	77,57	117,39	112,36	98,08	79,50	68,33
	6,20	20,80	31,75	82,14	138,89	128,22	116,41	91,89	72,63
	5,70	21,28	32,61	81,54	132,55	143,42	124,60	101,42	70,68
	5,20	22,27	28,62	83,17	165,45	163,63	129,78	112,60	79,48
	4,70	23,58	28,65	73,90	192,13	183,58	131,21	173,24	84,84
	4,20	25,29	29,77	79,05	190,75	222,28	216,86	151,95	94,29
	3,70	27,45	32,76	75,88	199,59	265,73	280,87	195,25	96,87
	3,20	30,22	38,21	73,40	275,94	339,53	368,97	245,31	104,98
	2,70	35,81	52,21	85,70	340,07	508,88	601,62	331,23	113,51
	2,20	38,28	52,76	100,23	475,96	653,55	765,64	492,25	135,34
	1,70	41,63	59,91	121,11	663,87	874,75	851,88	603,89	135,07
	1,20	37,13	51,19	102,29	184,49	Brandkammer			
0,70	35,86	47,13	60,37	54,05					

Tabelle 7-19: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 0 s – 1200 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				74,50	53,18	48,42	37,04	29,99
	7,20				75,01	61,72	50,14	34,61	30,02
	6,70				77,57	59,50	51,51	35,89	29,64
	6,20				82,14	61,13	50,57	42,86	28,54
	5,70				81,54	65,26	54,87	40,18	28,23
	5,20				83,17	60,79	49,82	36,58	26,04
	4,70				73,90	61,08	48,64	36,47	28,10
	4,20				79,05	65,59	40,95	41,26	28,81
	3,70				75,88	61,16	39,66	42,33	31,54
	3,20				73,40	44,75	55,92	48,24	36,01
	2,70				85,70	55,44	125,14	63,66	62,12
	2,20				100,23	166,86	138,85	122,91	111,26
	1,70				121,11	91,87	151,60	153,82	106,82
	1,20				102,29	77,19	96,35	110,59	75,64
0,70				60,37	42,91	66,87	36,96	34,95	

Tabelle 7-20: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 0 s – 1200 s (Versuche 4-6)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,25	0,50	0,75	1,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				40,52	36,34	23,23	20,08	20,21
	7,20				39,22	36,66	23,38	20,48	19,08
	6,70				37,20	36,24	21,24	19,48	18,40
	6,20				31,75	30,14	22,45	20,10	19,09
	5,70				32,61	30,24	22,60	21,66	19,78
	5,20				28,62	28,32	20,90	22,47	20,34
	4,70				28,65	29,34	24,66	21,41	21,89
	4,20				29,77	35,79	33,11	24,92	25,91
	3,70				32,76	37,89	32,30	33,29	28,30
	3,20				38,21	46,46	46,42	30,13	29,54
	2,70				52,21	45,48	18,28	53,24	41,06
	2,20				52,76	89,10	56,07	122,70	61,70
	1,70				59,91	100,08	81,31	109,73	61,89
	1,20				51,19	95,06	101,70	111,11	41,19
0,70				47,13	38,40	78,16	71,36	33,04	

7.4.7 Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 – 300 s bis 1200 s

Tabelle 7-21: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 7-9)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70	87,09	120,12	175,72	202,09	230,28	371,62	354,71	248,29
	7,20	84,25	117,65	174,42	205,26	294,80	352,50	394,27	266,10
	6,70	79,54	112,39	181,51	198,30	315,54	480,81	480,38	290,65
	6,20	76,14	114,36	186,75	224,81	330,02	553,25	548,14	313,49
	5,70	77,96	114,72	194,27	238,24	355,49	596,21	620,83	327,01
	5,20	80,93	120,90	204,63	251,07	389,68	693,09	693,53	354,95
	4,70	92,60	128,06	221,01	270,96	370,95	739,15	702,19	377,45
	4,20	93,29	118,70	225,28	265,77	460,76	859,88	856,28	415,32
	3,70	85,36	116,31	221,96	219,37	495,96	907,15	917,75	441,77
	3,20	76,08	115,21	195,30	212,09	517,43	903,53	913,50	491,10
	2,70	78,27	126,36	142,97	137,96	438,13	719,12	703,30	416,47
	2,20	79,17	93,16	120,36	79,19	Brandkammer			
	1,70	71,58	91,38	115,95	63,63				
	1,20	60,88	66,37	95,37	56,08				
0,70	56,97	64,36	70,38	47,48					

Tabelle 7-22: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 7-9)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				175,72	169,71	241,52	224,52	200,21
	7,20				174,42	218,44	274,30	238,91	190,52
	6,70				181,51	213,45	300,64	254,72	206,35
	6,20				186,75	229,15	306,69	361,73	229,98
	5,70				194,27	274,09	313,22	409,64	284,56
	5,20				204,63	264,75	376,41	460,27	303,92
	4,70				221,01	228,82	415,34	447,09	287,98
	4,20				225,28	363,23	339,43	505,21	313,55
	3,70				221,96	315,97	372,94	426,33	301,56
	3,20				195,30	228,27	412,46	419,72	294,60
	2,70				142,97	185,20	306,01	319,32	196,37
	2,20				120,36	188,80	160,17	153,02	81,68
	1,70				115,95	69,32	121,96	94,23	99,43
	1,20				95,37	58,50	76,06	109,69	149,07
0,70				70,38	47,36	51,31	60,73	75,55	

In der X-Ebene sind während des ersten Large-Exposure Brandversuchs (V7) eine sehr hohe Anzahl an Thermoelementen ausgefallen. Aus diesem Grund können für die X-Ebene keine Mittelwerte über alle drei Versuche gebildet werden. Exemplarisch werden die Mittelwerte des

Brandversuchs V7 dargestellt. Die Messstellen, welche nach Auskunft der MFPA Leipzig defekt waren, sind rot markiert.

Tabelle 7-23: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuch 7)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				139,91	125,88	201,96	167,87	158,49
	7,20				130,00	153,33	181,89	157,82	162,86
	6,70				116,54	129,99	172,64	149,15	115,55
	6,20				114,30	198,44	140,53	138,99	104,91
	5,70				111,35	202,40	174,02	149,53	117,75
	5,20				119,41	201,25	132,82	162,12	112,28
	4,70				128,64	196,42	192,71	109,77	148,86
	4,20				118,21	236,98	265,66	139,41	173,93
	3,70				123,42	292,17	230,73	227,93	143,23
	3,20				127,54	204,71	268,95	192,17	176,04
	2,70				140,94	186,36	130,97	238,09	121,43
	2,20				103,92	171,36	130,87	268,71	134,75
	1,70				102,14	144,11	130,03	179,87	97,17
	1,20				73,54	63,03	188,16	152,89	74,91
0,70				72,91	79,20	182,49	167,00	81,99	

7.4.8 Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V7 bis V9 – 300 s bis 1500 s

Tabelle 7-24: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Versuche 7-9)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]								
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00	
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	92,83	125,02	179,96	205,52	236,77	377,48	360,07	253,44	
	7,20	90,10	123,10	178,63	209,18	296,91	361,89	400,31	270,95	
	6,70	84,42	118,16	184,75	204,33	316,55	485,77	484,97	294,82	
	6,20	83,70	124,28	191,60	230,88	331,76	557,16	552,54	317,30	
	5,70	86,30	122,48	200,89	244,06	357,37	600,47	624,87	330,87	
	5,20	89,93	132,29	212,18	259,46	391,15	696,46	697,19	357,93	
	4,70	103,42	141,47	235,60	277,78	379,87	743,44	709,11	379,44	
	4,20	104,43	131,40	236,01	277,51	461,73	862,89	858,32	415,37	
	3,70	95,76	129,78	231,67	246,11	496,09	908,53	918,35	438,56	
	3,20	85,66	130,17	208,67	224,71	509,99	898,32	905,75	477,18	
	2,70	88,75	144,18	159,56	151,20	430,97	713,66	693,10	405,53	
	2,20	90,75	106,88	136,49	89,61	Brandkammer				
	1,70	82,08	106,50	138,36	73,28					
	1,20	70,42	77,15	113,58	65,63					
0,70	65,91	75,71	84,19	56,91						

Tabelle 7-25: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Versuche 7-9)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				179,96	180,96	256,40	238,10	208,37
	7,20				178,63	227,26	284,97	252,75	199,12
	6,70				184,75	224,78	313,70	267,78	213,98
	6,20				191,60	244,42	328,63	376,86	239,69
	5,70				200,89	287,54	337,46	426,12	296,29
	5,20				212,18	277,37	398,92	479,01	321,99
	4,70				235,60	238,49	438,98	470,65	302,70
	4,20				236,01	353,25	370,97	539,16	322,39
	3,70				231,67	329,69	404,44	459,97	310,31
	3,20				208,67	244,96	443,26	456,81	308,92
	2,70				159,56	204,59	332,09	350,89	217,30
	2,20				136,49	214,12	180,72	173,34	93,70
	1,70				138,36	80,61	143,32	112,51	123,86
	1,20				113,58	68,14	89,99	132,58	176,16
	0,70				84,19	56,38	62,17	81,87	96,53

In der X-Ebene sind während des ersten Large-Exposure Brandversuchs (V7) eine sehr hohe Anzahl an Thermoelementen ausgefallen. Aus diesem Grund können für die X-Ebene keine Mittelwerte über alle drei Versuche gebildet werden. Exemplarisch werden die Mittelwerte des Versuchs 7 dargestellt. Die Messstellen, welche nach Auskunft der MFGPA Leipzig defekt waren, sind rot markiert.

Tabelle 7-26: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Versuch 7)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				145,71	136,44	209,74	175,98	170,90
	7,20				136,17	163,45	181,23	164,88	170,01
	6,70				123,22	144,38	176,56	158,38	125,49
	6,20				125,98	193,12	150,52	151,33	114,16
	5,70				121,37	227,62	179,89	164,77	130,77
	5,20				134,12	229,38	147,00	177,25	128,07
	4,70				145,85	198,42	212,00	126,03	166,68
	4,20				134,07	263,78	289,18	148,64	189,24
	3,70				140,23	273,62	248,26	248,58	155,69
	3,20				146,09	201,71	290,52	205,96	195,82
	2,70				162,01	197,74	142,54	232,23	134,07
	2,20				120,15	186,98	143,77	280,20	153,82
	1,70				118,79	158,42	144,00	198,26	118,03
	1,20				84,53	73,81	188,58	171,27	128,48
	0,70				84,31	96,67	190,67	138,17	142,04

7.4.9 Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V10 bis V12 – 300 s bis 1200 s

Tabelle 7-27: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 10-12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70	98,54	147,90	215,36	254,68	223,86	224,25	161,70	115,00
	7,20	94,31	151,96	223,44	263,17	285,83	224,02	159,30	109,61
	6,70	96,76	155,97	251,17	255,79	313,75	252,09	171,33	106,10
	6,20	92,79	150,36	267,71	291,63	334,36	272,45	172,97	100,76
	5,70	92,02	182,94	285,63	257,14	369,61	264,59	177,43	92,35
	5,20	87,98	180,31	319,22	297,93	417,15	299,05	168,37	85,49
	4,70	79,90	188,64	305,18	323,41	380,00	210,46	176,51	79,39
	4,20	78,01	196,37	382,58	306,69	464,99	328,27	164,19	76,84
	3,70	75,70	187,86	422,58	285,43	442,15	303,86	150,70	71,86
	3,20	74,98	172,41	425,64	317,71	432,07	256,88	138,94	68,34
	2,70	83,50	154,37	413,57	313,32	405,93	234,47	132,89	73,59
	2,20	90,61	139,74	397,27	320,16	389,65	228,35	120,03	67,07
	1,70	87,45	159,99	351,36	316,12	399,29	254,23	127,30	70,69
	1,20	94,62	228,76	396,19	281,19	441,40	225,01	93,99	57,00
0,70	89,81	290,94	317,19	252,99	388,08	320,53	66,66	52,93	

Tabelle 7-28: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 10-12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfrahmboden [m]	7,70				215,36	194,76	176,73	126,54	95,24
	7,20				223,44	241,70	208,51	110,41	75,18
	6,70				251,17	246,22	224,42	112,49	66,39
	6,20				267,71	274,89	216,60	153,81	63,94
	5,70				285,63	346,40	214,12	147,09	70,32
	5,20				319,22	407,14	333,87	126,85	68,29
	4,70				305,18	509,22	383,53	142,85	57,87
	4,20				382,58	573,37	395,87	197,04	44,73
	3,70				422,58	698,94	410,22	169,84	53,94
	3,20				425,64	742,73	468,81	224,82	77,87
	2,70				413,57	780,81	579,94	224,89	93,26
	2,20				397,27	752,07	614,18	142,63	91,21
	1,70				351,36	722,78	649,83	92,91	58,78
	1,20				396,19	Holzkrippe		99,20	72,32
0,70				317,19	59,00			47,11	

Tabelle 7-29: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1200 s (Versuche 10-12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				147,90	139,26	132,81	78,81	71,30
	7,20				151,96	127,23	118,11	77,78	66,37
	6,70				155,97	171,87	107,43	67,82	38,81
	6,20				150,36	147,04	98,20	66,01	36,61
	5,70				182,94	178,01	133,87	76,04	38,68
	5,20				180,31	189,66	142,11	71,79	47,55
	4,70				188,64	190,12	158,49	108,82	69,29
	4,20				196,37	210,97	158,31	108,17	83,37
	3,70				187,86	364,11	146,96	111,91	70,44
	3,20				172,41	265,51	242,51	103,83	76,40
	2,70				154,37	323,37	151,97	93,76	70,73
	2,20				139,74	294,31	170,61	59,62	82,68
	1,70				159,99	293,63	232,51	99,08	77,07
	1,20				228,76	Holzkrippe		101,74	34,90
	0,70				290,94	Holzkrippe		99,65	34,11

7.4.10 Mittelwerte der Large-Exposure-Tests V10 bis V12 – 300 s bis 1500 s

Tabelle 7-30: Mittelwerttemperaturen an der Oberfläche über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Versuche 10-12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70	98,89	147,00	213,83	256,66	225,83	222,53	163,03	117,03
	7,20	94,56	150,70	221,55	266,07	283,20	223,61	161,07	112,09
	6,70	95,84	154,16	247,02	260,88	310,17	250,35	172,68	109,35
	6,20	92,60	150,33	263,28	297,50	331,44	270,77	175,05	104,65
	5,70	92,19	179,05	281,02	268,51	366,02	265,75	180,28	96,71
	5,20	89,19	177,96	312,72	310,40	412,20	298,94	172,16	89,91
	4,70	82,81	186,32	304,05	338,36	381,68	215,18	179,81	83,29
	4,20	81,76	192,85	372,01	328,91	459,18	330,55	168,16	80,28
	3,70	79,91	187,23	408,21	314,59	437,66	308,67	154,47	78,34
	3,20	79,41	177,04	411,63	357,74	426,03	264,69	144,14	72,43
	2,70	89,76	162,13	403,50	361,37	408,06	244,16	142,95	79,44
	2,20	100,15	149,87	391,08	379,54	402,22	240,03	129,67	73,85
	1,70	98,20	174,10	376,12	383,21	433,61	270,76	139,74	79,17
	1,20	116,44	253,24	464,87	372,62	513,58	256,25	111,67	66,42
	0,70	120,29	336,19	447,14	374,87	519,72	406,04	89,32	65,02

Tabelle 7-31: Mittelwerttemperaturen in der Y-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Versuche 10-12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				213,83	199,48	182,58	133,23	100,70
	7,20				221,55	240,72	204,13	117,01	79,90
	6,70				247,02	246,12	221,60	115,72	69,00
	6,20				263,28	278,74	224,22	155,43	69,77
	5,70				281,02	340,32	219,63	147,23	77,25
	5,20				312,72	392,75	325,10	127,53	76,67
	4,70				304,05	486,36	369,93	144,02	65,16
	4,20				372,01	562,72	387,96	207,42	48,61
	3,70				408,21	668,81	399,45	175,63	59,17
	3,20				411,63	722,96	473,22	235,76	89,55
	2,70				403,50	773,85	595,40	242,85	105,48
	2,20				391,08	763,68	649,68	151,58	103,77
	1,70				376,12	747,40	699,16	101,58	65,14
	1,20				464,87	Holzkrippe		118,14	85,26
0,70				447,14	76,90			58,40	

Tabelle 7-32: Mittelwerttemperaturen in der X-Ebene über den Zeitraum 300 s – 1500 s (Versuche 10-12)

		Abstand der Messstellen aus der Innenecke [m]							
		-1,50	-1,00	-0,50	±0,02	0,50	1,00	1,50	2,00
Höhe über Prüfraumboden [m]	7,70				147,00	140,44	132,53	86,85	79,50
	7,20				150,70	126,45	115,70	80,92	73,44
	6,70				154,16	169,11	104,87	70,75	42,62
	6,20				150,33	141,88	98,81	66,82	40,55
	5,70				179,05	169,96	130,52	78,25	43,79
	5,20				177,96	189,70	139,01	73,12	54,86
	4,70				186,32	182,51	155,48	111,86	76,85
	4,20				192,85	201,24	158,67	107,90	89,22
	3,70				187,23	350,61	145,77	117,31	74,01
	3,20				177,04	264,14	246,02	107,31	85,37
	2,70				162,13	324,54	154,62	101,54	74,69
	2,20				149,87	301,55	179,20	65,61	92,18
	1,70				174,10	296,46	240,12	108,20	88,16
	1,20				253,24	Holzkrippe		110,15	40,59
0,70				336,19	112,08			40,06	

7.5 THR, HRR und Wärmestromdichten

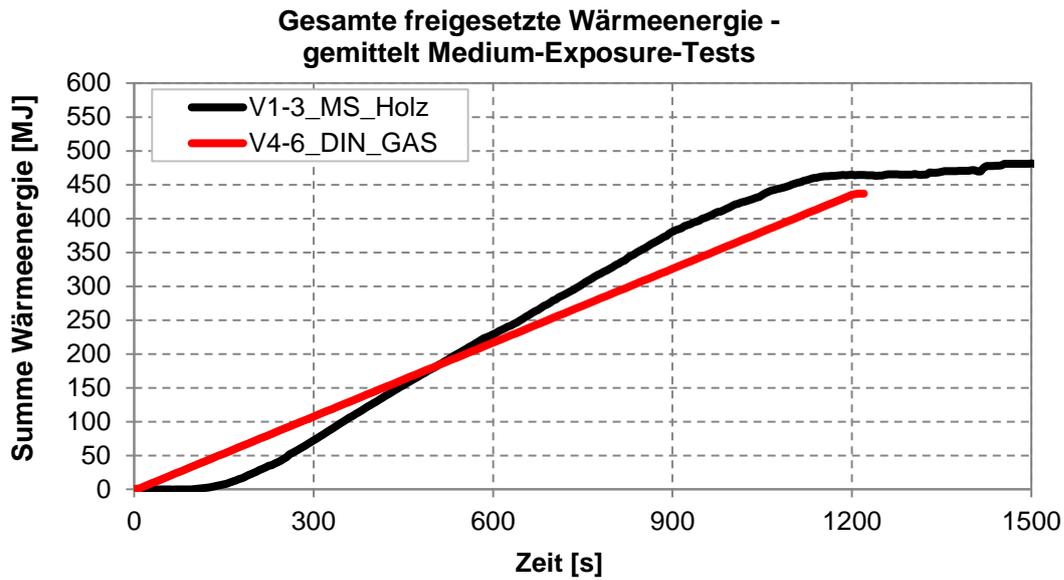


Abbildung 7-208: Ermittelte Wärmeenergie (THR) für die Brandversuche V1 bis V3 und V4 bis V6

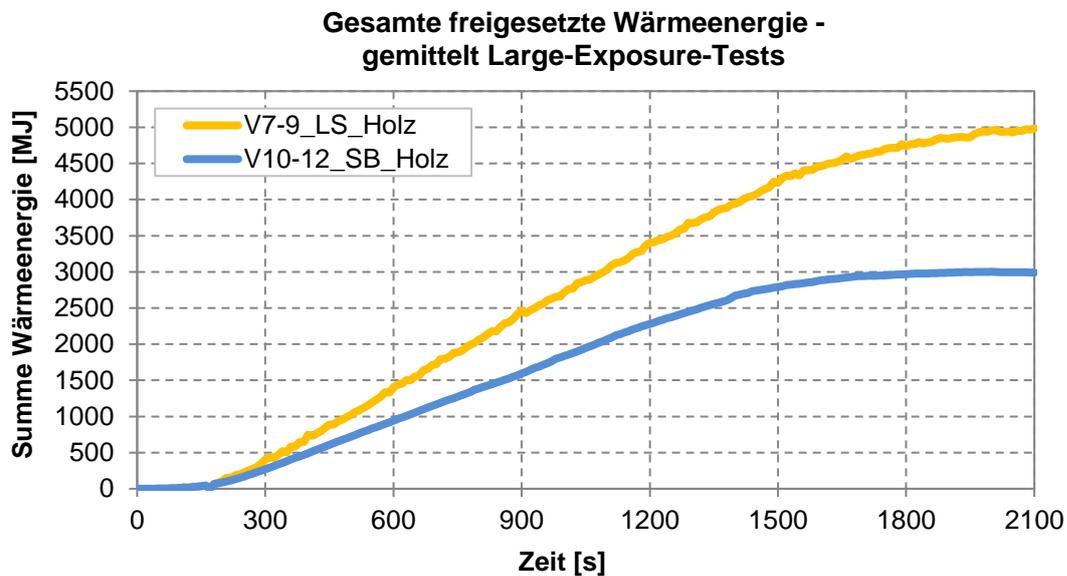


Abbildung 7-209: Ermittelte Wärmeenergie (THR) für die Brandversuche V7 bis V9 und V10 bis V12

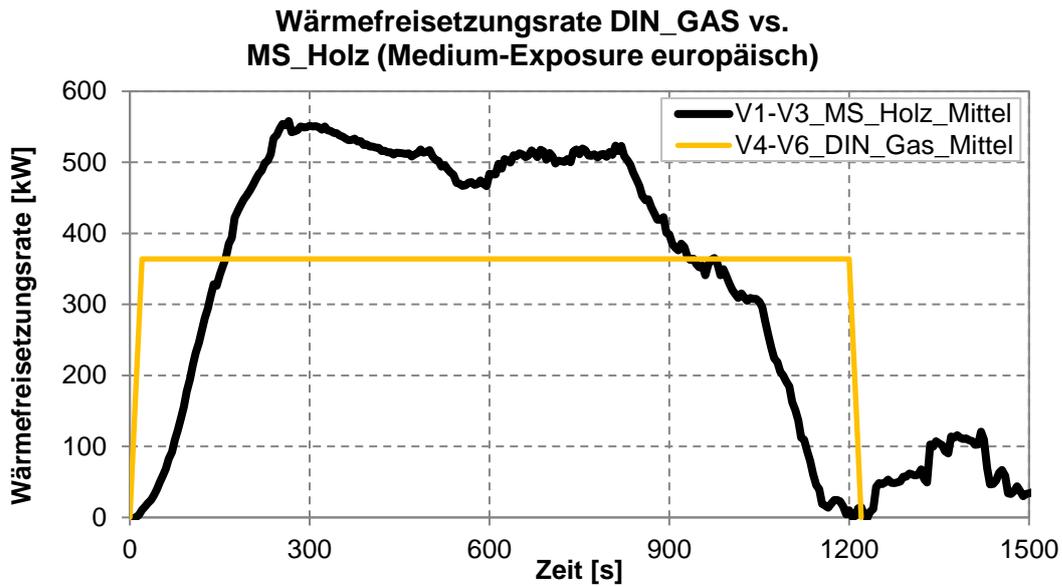


Abbildung 7-210: Ermittelte Wärmefreisetzungsrate (HHR) für die Brandversuche V1 bis V3 und V4 bis V6

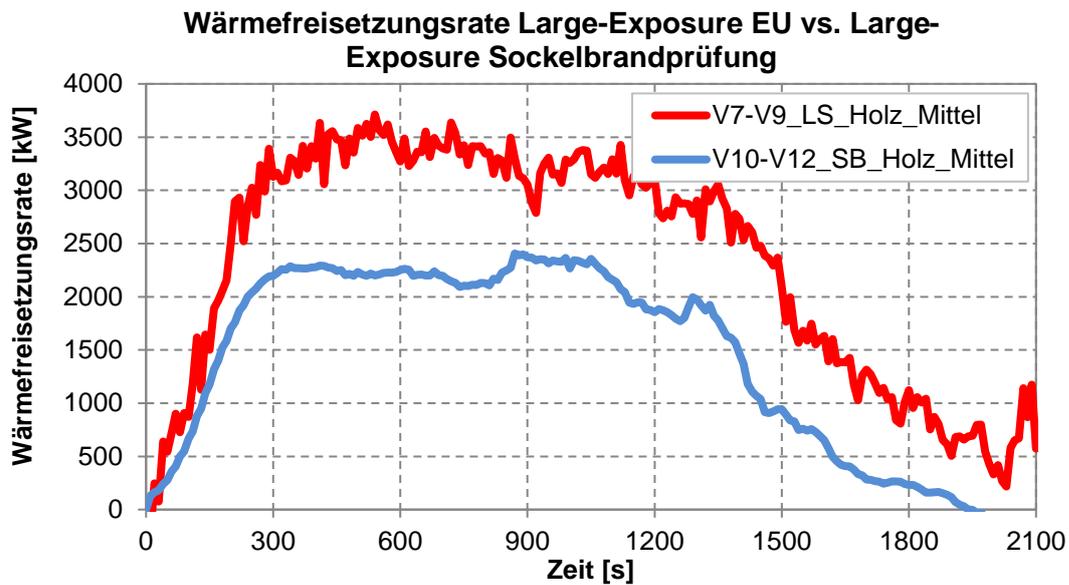


Abbildung 7-211: Ermittelte Wärmefreisetzungsrate (HHR) für die Brandversuche V7 bis V9 und V10 bis V12