

Forschungsbericht Raumbrände

BAM Innovationsoffensive
Projekt Brandspurenanalytik

Teil 1: Versuchsaufbau und brandtechnologische Untersuchungen

Jan H. Deubel, Martin Werrel, Simone Krüger, Tina Raspe

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachbereich 7.5 Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen



BAM

Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

Jan H. Deubel, Martin Werrel, Simone Krüger, Tina Raspe

Forschungsbericht Raumbrände

im Rahmen des BAM Innovationsoffensive Projekts Brandspurenanalytik

Teil 1: Versuchsaufbau und brandtechnologische Untersuchungen

2013

Herausgeber:

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Fachbereich 7.5 Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen

Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Telefon: +49308104-0

Telefax: +49308112029

E-Mail: info@bam.de

Internet: www.bam.de

Copyright © 2013 by

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

ISSN 0938-5533

ISBN 978-3-9815944-2-3

Bericht erstellt mit \LaTeX und pdf \LaTeX , Texmaker, bib \TeX

Diagramme erstellt mit gnuplot

Skizzen erstellt mit Inkscape

Kurzfassung

Dieser Bericht behandelt die Durchführung, Auswertung und Ergebnisse einer Versuchsserie zu Raumbränden. Diese wurde zur Untersuchung von Fragestellungen zum Einfluss von Brandbeschleuniger auf den Brandverlauf sowie zu den Möglichkeiten des Nachweises des Brandbeschleunigers in kriminaltechnischen Ermittlungen durchgeführt.

Die Versuche haben im Rahmen des Forschungsprojekts Brandspurenanalytik der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung im Jahr 2012 an der Brandprüfstelle Laue der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH stattgefunden. Im Forschungsprojekt wurden verschiedene Materialien und ihr Brandverhalten in Kombination mit flüssigen Brandbeschleunigern in der Rauchdichtekammer (DIN EN ISO 5659-2), dem Cone Calorimeter (ISO 5660-1) und dem Single Burning Item Test (DIN EN 13823) untersucht. Die Untersuchungen hatten zwei Schwerpunkte. Einerseits wurde im Anschluss an die Versuche der Brandrückstand mit analytischen Methoden mit dem Ziel des Nachweises des Brandbeschleunigers untersucht. Andererseits dienen die gemessenen Größen wie Massenverlustrate, Wärmefreisetzungsrate und Temperaturen innerhalb der Proben als Vergleichsgrößen bei der Validierung numerischer Simulationen und der genutzten Materialmodelle. Ergänzend zu den kleinskaligen Versuchen wurden die selben Materialien in den in diesem Bericht vorgestellten Raumbränden verwendet, um das Brandverhalten im Originalmaßstab zu untersuchen.

Der gesamte Bericht gliedert sich in drei Teile. Der hier vorliegende Teil 1 thematisiert den Aufbau, die Durchführung und die brandtechnologische Auswertung der Versuche und diskutiert Untersuchungsergebnisse zum Brandverlauf. In Teil 2 werden die analytischen Methoden zum Nachweis des Brandbeschleunigers in den Brandrückständen vorgestellt und ausgewertet und in Teil 3 werden Empfehlungen zur Probenahme von Proben zum Brandbeschleunigernachweis auf Basis der gewonnen Erkenntnisse im Forschungsprojekt gegeben sowie die Ergebnisse der in diesem Bericht vorgestellten Versuche vorgestellt.

Die hier beschriebenen Versuche bildeten einen typischen Wohnzimmerbrand ab. In einem Brandraum mit einer Fläche von 20 m^2 wurden verschiedene Einrichtungsgegenstände, wie Sofas, Regale, ein Esstisch, vier Stühle und ein Couchtisch, als Brandlast angeordnet. Insgesamt wurden fünf Versuche bei identischer Brandlast durchgeführt. Beim ersten Versuch erfolgte die Zündung mit einem Feuerzeug an einem der Sofas. Bei den vier weiteren Versuchen wurde mit einem Benzin-Diesel-Gemisch als Brandbeschleuniger an jew. unterschiedlichen Positionen im Brandraum gezündet. Während dem Versuch wurden die Temperaturen im Brandraum mit Mantelthermoelementen, Wärmeströme auf Oberflächen mit Plattenthermometern, die Konzentration verschiedener Gasspezies, der globale Massenverlust, der Fluidmassenstrom durch die Zuluftöffnung und die Wärmefreisetzungsrate gemessen.

Im Anschluss an den Versuch wurden Brandschutt- und Rußwischproben genommen. Diese wurden mit dem Ziel des Nachweises der verwendeten Brandbeschleuniger analysiert.

Die Zündung mit Brandbeschleuniger führte primär zu einer erhöhten Brandentwicklungsgeschwindigkeit. Der Flashover trat bei allen Versuchen, die mit Brandbeschleuniger gezündet wurden, wesentlich früher auf, als bei dem ersten Versuch, der mit einem Feuerzeug gezündet wurde. Die erreichten Maximalwerte der brandtechnologischen Kenngrößen, wie beispielsweise die Temperaturen im Brandraum oder die Wärmefreisetzungsrate, waren jedoch bei allen fünf Versuchen in der gleichen Größenordnung.

Die gewonnenen Daten zum Brandverlauf können als Vergleichswerte für numerische Simulationen verwendet werden.

Abstract

This report addresses a series of real-scale room fire tests that have been performed by the Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Berlin, Germany within a research project on fire investigations and fire debris analysis. The report describes the test setup as well as the data reduction procedure and presents an overview of some results of the test series.

The goal of the research project was to achieve a better understanding of the effects fire accelerants have on fire development and to examine methods and techniques to detect potentially involved ignitable liquids during fire investigations. Bench-scale reaction-to-fire tests on living room materials and fire accelerants were performed initially. The Smoke Density Chamber according to ISO 5659-2, the ISO 5660-1 Cone Calorimeter, and the European Single Burning Item Test (EN 13823) were used to obtain bench-scale fire data such as heat release rate, mass loss rate, total heat evolved, gas species yields, and temperature distribution within samples. The real-scale test series presented by this report allows to assess whether these bench-scale results on fire accelerant effects also apply to real-scale fires.

The real-scale tests were conducted in 2012 at the fire testing facility of the Leipzig Institute for Materials Research and Testing (MFPA Leipzig GmbH), Leipzig, Germany. A series of five identically equipped tests was performed on living room fires in a test room of roughly 20 m². The room was furnished with typically used pieces of furniture such as sofas, shelves, dining table, chairs, and a coffee table. To investigate the effect of fire accelerants on fire development a mixture of gasoline and diesel was applied for each test at different locations and remotely ignited. As reference, no fire accelerant was used during one test. During each test, however, gas species concentrations were measured at multiple locations, temperatures were detected by thermocouples, plate thermometer were used to estimate the heat flux, the actual mass was recorded, and flow velocities were measured at the room's doorway by bi-directional pressure probes. A chimney was located above the doorway to collect smoke and gases. Based on the measurement data the heat release rate by oxygen consumption, the mass loss rate, species yields, mass

flow rates etc. were calculated. Additionally, after each test fire debris was collected to possibly detect and identify fire accelerants in further chemical investigations. The purpose of these tests was to (1) obtain fire data for validation purposes of computer models and bench-scale test results and to (2) generate fire debris with fire accelerants involved from well-defined real-scale fire test conditions in order to then apply and assess common detection techniques.

The report consists of three parts. This part focuses on the test setup and data reduction procedure and discusses results regarding fire development. Part 2 will be focused on the chemical analysis to detect and identify fire accelerants and part 3 will give recommendations on how to collect fire debris based on the experience gained within this project.

Fire accelerants have a significant effect on flame spread rates. Flash-over occurred earlier during tests using the gasoline diesel mixture than the reference test without any ignitable liquids. Peak heat release rate or peak temperature values are almost not affected by the use of fire accelerants. They are each in the same order of magnitude.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Hintergrund und Ziele	4
1.2	Vergleichbare Versuche	5
2	Versuchsdurchführung	7
2.1	Versuchsaufbau	7
2.1.1	Brandraum	7
2.1.2	Brandlast und Masse im Brandraum	8
2.1.3	Brandbeschleuniger und Zündmechanismus	9
2.1.4	Messtechnik	12
2.1.5	Sonstige Brandrauminstallationen	18
2.2	Brandszenarien	21
3	Auswertung	23
3.1	Datenaufbereitung	23
3.2	Berechnungen	25
3.3	Fehlerbetrachtung	29
3.3.1	Allgemeine Fehlerquellen	29
3.3.2	Massenverlust und Massenverlustrate	31
3.3.3	Temperaturen im Brandraum und Schlot	32
3.3.4	Strahlungswärmestrom	33
3.3.5	Gasspezieskonzentrationen	33
3.3.6	Wärmefreisetzungsrate	35
3.3.7	Massenstrom durch die Brandraumöffnung	36
3.3.8	Brandbeschleunigernachweis	37
4	Ergebnisse	38
4.1	Ereignisübersicht und grundsätzlicher Brandverlauf	38
4.2	Wärmefreisetzungsrate und freigesetzte Wärme	40

4.3	Massenverlustrate und Massenverlust	40
4.4	Temperaturen	42
4.5	Einfallende Strahlungswärmestromdichte, Gesamtwärmestromdichte und adiabate Oberflächentemperatur	42
4.6	Gasspezieskonzentrationen	44
4.7	Neutrale Ebene	46
4.8	Massenstrom durch die Öffnung	46
4.9	Spanplattenprobekörper	51
4.10	Vergleichsgegenstände	51
4.11	Diskussion	51
Literaturverzeichnis		54
Abbildungsverzeichnis		67
Tabellenverzeichnis		75
Abkürzungsverzeichnis		77
A	Nomenklatur	78
B	Ermittlung von Heizwerten	81
C	Abbildungen	86
D	Tabellen	147
E	Anmerkungen zu einzelnen Geräten	173
F	Definition des Flashovers	178
G	Korrektur der Messung der Brandraumwaage	181
H	Berechnung der Wärmefreisetzungsrate	184
I	Bestimmung des Strömungsbeiwerts für den Schlot	188
J	Berechnung der Lage der neutralen Ebene	192
K	Berechnung des Massenstroms durch die Brandraumöffnung	196

L	Zeitverhalten der Mantelthermoelemente	200
M	Charakterisierung der Plattenthermometer	209
N	Messergebnisse	231

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziele

Bei der Ermittlung von Brandursachen und der Rekonstruktion von Brandverläufen spielen die Fragen, ob Brandbeschleuniger zur Zündung des Brandes verwendet wurde und falls ja, welcher Brandbeschleuniger in welchen Mengen verwendet wurde, eine wesentliche Rolle. Allerdings liegen wenige originalmaßstäbliche Raumbrandversuche vor, die den Einfluss von Brandbeschleunigern auf den Brandverlauf als zentrales Untersuchungsziel betrachten. So wurden zwar Raumbrandversuche durchgeführt, die den Einfluss von Brandbeschleunigern auf den Brandverlauf mit untersuchten [1, 2] (vgl. a. Kapitel 1.2). Die Ergebnisse hierzu sind jedoch gar nicht oder nur in Teilen veröffentlicht.

Der Nachweis von Brandbeschleunigern mit chemisch-analytischen Methoden ist tägliche Praxis der Ermittlungsbehörden. Die verwendeten Methoden sind erprobt und bewährt. Die Methoden basieren zumeist auf kleinskaligen Laborversuchen, bei denen Proben mit Brandbeschleunigern gar keine oder relativ geringen Brandbelastungen ausgesetzt wurden [3, 4, 5, 6]. Originalmaßstäbliche Versuche werden selten in die Methodenentwicklung einbezogen.

Ziel der vorliegenden Versuche war somit einerseits den Einfluss von Brandbeschleunigern auf Raumbrände im Originalmaßstab zu ermitteln und andererseits die Erzeugung von Proben für den Brandbeschleunigernachweis in realistischen, originalmaßstäblichen Versuchen.

Es wurden fünf Versuche mit identisch eingerichteten Räumen durchgeführt. Zur Charakterisierung des Brandverlaufs wurden die Wärmefreisetzungsrate, die Massenverlustrate und Temperaturen im Brandraum gemessen. Die Messung von Rauchgaspezies an mehreren Orten und der Strömungsgeschwindigkeit in der Brandraumöffnung erlauben darüber hinaus die Betrachtung des toxischen Potentials solcher Raumbrände. Somit können die gewonnenen Daten zum Vergleich mit numerischen Simulationen herangezogen werden.

Zum Nachweis des Brandbeschleunigers mit analytischen Methoden wurden die Raum-

brände nach dem Flashover gelöscht. Der Brandraum kühlte über Nacht ab und am Folgetag wurden Proben genommen. So konnte der Brandverlauf realistisch untersucht und realistische Proben für die Brandbeschleunigeranalytik gewonnen werden. Ohne den Versuchsabbruch durch Löschen wäre damit zu rechnen gewesen, dass der Nachweis von Brandbeschleuniger mit analytischen Methoden unmöglich ist. Außerdem werden Raumbrände in der Praxis im Normalfall von der Feuerwehr gelöscht.

Die Planung der Versuche und Durchführung erfolgte durch den Fachbereich 7.5 Technische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen¹ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Abstimmung mit dem Fachbereich Organische Umweltanalytik. Des Weiteren waren der Fachbereich 2.2 Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme, das Landeskriminalamt (LKA) Berlin, das LKA Sachsen und die Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA) teilweise an der Versuchsdurchführung und der Probenahme beteiligt. Die Analysen von Rückstandsprouben auf Brandbeschleuniger wurden durch den Fachbereich BAM 1.2, das LKA Berlin und das LKA Sachsen durchgeführt.

In diesem Bericht werden der Versuchsaufbau und die brandtechnologischen Ergebnisse vorgestellt. Die analytischen Methoden zum Brandbeschleunigernachweis und deren Ergebnisse werden Inhalt eines gesonderten Berichts sein.

1.2 Vergleichbare Versuche

An der MFPA Leipzig wurden in den vergangenen Jahren eine Reihe von Raumbrandversuchen durchgeführt. Durch Wilk [1, 2] wurden 2012 mehrere dutzend dieser Versuche zusammenfassend ausgewertet. Primäres Ziel der Auswertung war der Vergleich mit Rechenverfahren für Naturbrandmodelle. Bei einigen Versuchen wurde bei gleicher Brandlast das Zündinitial variiert. So wurden die Brände mit Papierknäuel, Papierkissen oder verschiedenen Mengen Isopropanol auf Polstermöbeln gezündet. Wilk berichtet, dass das Zündinitial vor allem die Brandentwicklungsgeschwindigkeit beeinflusst. Mit steigender Wärmefreisetzung der primären Zündquelle beschleunigt sich der Brandverlauf und verkürzt sich die Zeit bis zum Eintritt des Vollbrandes. Die maximale Wärmefreisetzung in der Vollbrandphase wird nicht vom Zündinitial beeinflusst.

Wolfe et. al. [7] haben eine Versuchsserie mit einem 45 m² großen Brandraum und wohnungsähnlicher Brandlast durchgeführt. Der Fokus der Untersuchungen lag auf dem

¹Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung gehörten die Mitarbeiter in diesem Forschungsprojekt noch zum Fachbereich 7.3 Brandingenieurwesen.

Brandverlauf bei limitierter Ventilation. Neben brandtechnologischen Größen wurden auch die Brandspuren bewertet.

Hopkins et.al. [8] berichten von drei Versuchen, die im Rahmen des Advanced Fire Pattern Project der National Association of Fire Investigators (NAFI) durchgeführt wurden. Ziel dieser Versuche im Originalmaßstab war der Vergleich der Brandspuren vor und nach dem Flashover und der Vergleich dieser Ergebnisse mit der bisherigen Einschätzung des Brandverlaufs auf Grund der Brandspuren in der alltäglichen Praxis der Brandursachenermittlung.

Purtori stellt in [9] eine Versuchsserie vor, die ebenfalls die Untersuchung der Brandspuren nach dem Brand als Ziel hatte. Der Versuchsraum war hierbei ein Schlafzimmer im Originalmaßstab. Zwei Versuche wurden mit Papier auf Polstermöbeln und zwei weitere Versuche mit Benzin auf dem Fußboden gezündet.

Purtori und McElroy [10] stellen Ergebnisse eines Brandversuchs an einem Einfamilienhaus amerikanischer Bauart vor. Hierbei wurde der Brand mit flüssigem Brandbeschleuniger gezündet. Die Versuchsdokumentation² dient der Ausbildung von Brandursachenermittlern.

Im Rahmen der Dalmarnock Fire Tests [11] wurden mehrere Wohnungsbrände durchgeführt. Ziel war u. a. die Gewinnung von Vergleichsdaten für numerische Simulationen. Die Zündung der Versuche fand teilweise an Polstermöbeln statt. Hierzu wurde das Brandverhalten der Polstermöbel im Vorfeld untersucht, um dieses als Quellterm in den numerischen Simulationen berücksichtigen zu können.

Lock et. al. [12] haben 2008 eine Versuchsreihe im Brandraum nach ISO 9705 zur Ermittlung der Unsicherheit solcher großmaßstäblichen Versuche durchgeführt. Der Raum war nicht möbliert und als Brandquelle wurden Gas- und Flüssigkeitsbrenner genutzt. In Tabelle 2.6 (S. 36) in [12] stellen die Autoren die Unsicherheiten der einzelnen Messgeräte vor.

Babrauskas [13] hat Untersuchungen zum Brandverhalten von Polstermöbeln durchgeführt und dabei Daten aus dem Furniture Calorimeter und von Raumbränden verglichen. Weitere Untersuchungen von Babrauskas zum Brandverhalten von Polstermöbeln sind in [14, 15, 16] zu finden.

²CD-ROM mit dem Titel *InterFIRE VR*.

2 Versuchsdurchführung

2.1 Versuchsaufbau

2.1.1 Brandraum

Die Versuche wurden im Prüfstand C an der Brandprüfstelle Laue der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH (MFPA) durchgeführt (vgl. Abb. 2.1, 2.2 und Abb. C.1 zu den Lagebezeichnungen). Die Breite des Brandraums beträgt 3,9 m, die Tiefe 5,2 m und die Höhe circa 2,9 m¹ (Innenmaße). Das Bodenniveau des Brandraums liegt circa 1,1 m über Flur. Der Zugang während der Versuchsvorbereitung erfolgte über eine rückwärtige Tür, die mit Keramikwolle isoliert ist und während der Versuchsdurchführung verschlossen war. Die Ventilation während des Versuchs erfolgte über eine Öffnung mit einer Breite von 1 m und einer Höhe von 2,2 m (ab Bodenniveau des Brandraums) auf der Vorderseite. Die Rauchgase traten durch die Brandraumöffnung aus, strömten in den Vorraum des Versuchsstandes und zogen durch einen Schlot (Länge 2,4 m, Breite 1 m, Höhe ca. 2 m) in 10 m Höhe über Flur ab. Die Strömung war rein konvektiv, es gab keine maschinelle Abzugseinrichtung. Der Vorraum ist ein geschlossener Raum, dessen Tore während der Versuchsdurchführung geöffnet waren.

Seiten- und Rückwand des Brandraums bestehen aus Feuerbetonsteinen mit einer Wandstärke von 30 cm. Die Vorderwand mit der Brandraumöffnung und der Brandraumboden wurden aus Porenbetonsteinen für die diese Versuchsserie aufgebaut. An der Innenseite der Vorderwand war ab einer Höhe von circa 1,75 m über Brandraumboden Mineralwolle (Dicke ca. 5 cm) zum Schutz des Porenbetons bis unter die Decke angebracht. Die Porenbetonsteine des Brandraumbodens waren lose aufgelegt und nicht miteinander verbunden. Die Fuge zwischen Boden und den Seitenwänden (lichte Weite ca. 4 cm) war mit Mineralwolle verfüllt. Die thermophysikalischen Eigenschaften der genannten Materialien sind in Tabelle D.1 aufgelistet.

¹Die Raumhöhe variiert auf Grund des Aufbaus des Bodens und der Deckenverkleidung aus Feuerbetonsteinen zwischen 2,8 m und 2,9 m.

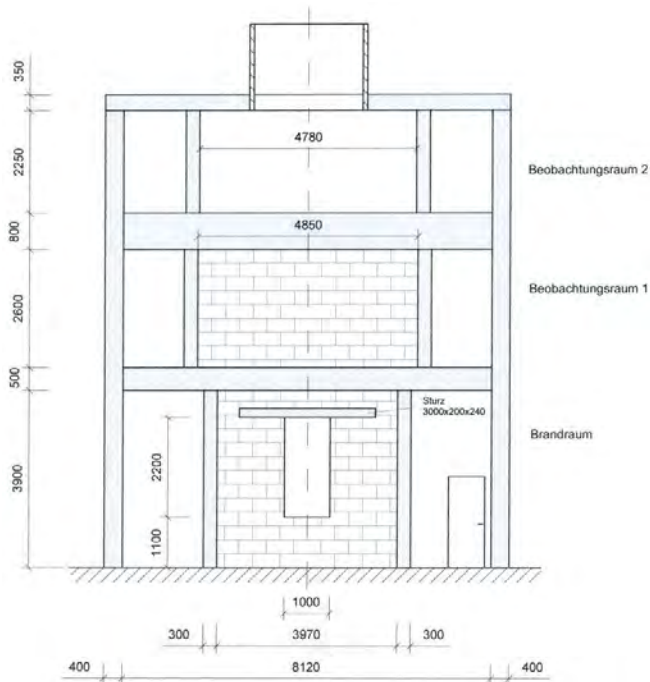


Abbildung 2.1: Prüfstand (Skizze)



Abbildung 2.2: Prüfstand (Außenansicht Vorderseite)

Weitere Abbildungen des Gebäudes und des leeren Brandraums sind in Anhang C.2.1 zu finden.

2.1.2 Brandlast und Masse im Brandraum

Die Möblierung des Brandraums wurde entsprechend einem Wohnzimmer ausgewählt und bestand aus zwei Sofas, einem Esstisch mit vier Stühlen, einem Couchtisch und fünf Regalen (vgl. Abb. 2.3 und C.2). Die Regale hatten fünf Fächer von denen drei mit Katalogen, eins mit Polyurethanschaumblöcken und eins mit zwei Polypropylenkisten, die mit Polyamidformteilen gefüllt waren, enthielten (vgl. Abb. C.3). Auf dem Brandraumboden wurde ein Teppichboden ausgelegt. Die Sofas waren keine herkömmlichen Sitzmöbel, sondern wurden aus Spanplatte, Polyurethanschaum, Polsterwatte und Möbelstoff gebaut (zum Aufbau vgl. Abb. C.5). In der hinteren rechten Ecke des Brandraums (Regalecke) befand sich ein Teppichelement. Dieses Element bestand aus Teppich, der mit Teppichkleber auf eine Faserzementplatte aufgeklebt war (Breite 50 cm, Tiefe 50 cm), die wiederum auf den Teppichboden gelegt wurde.

Das Brandverhalten der Sofamaterialien und des Teppichelements wurde zuvor im Cone Calorimeter [17] und im Single Burning Item Test [18] mit und ohne Brandbeschleuniger

untersucht. Für numerische Simulationen der Zimmerbrände sollen die Materialmodelle des Teppichs und der Sofamaterialien verwendet werden, die mit diesen kleinskaligen Versuchen abgesichert sind. Aus diesem Grund wurde das Teppichelement ergänzend zum Teppichboden verwendet und die Sofas selbst hergestellt.

Die Brandlast ist in Tabelle 2.1 erläutert. Detaillierte Informationen zu allen Gegenständen im Brandraum können Tabelle D.2 entnommen werden und in Anhang C.2.2 sind Abbildungen der Brandlastgegenstände im Brandraum enthalten.

Die Brandlast beträgt insgesamt circa 8416 MJ bzw. flächenbezogen circa 415 MJ m^{-2} (Brandlastdichte). Der Vergleich mit Angaben aus dem Eurocode 9 [19, Tab. BB1] und weiteren Literaturstellen² zeigt, dass die hier vorliegende Brandlast niedriger als die Angabe für Wohngebäude, aber in einem realistischen Bereich für Raumbrände ist.

Der mittlere Heizwert liegt somit bei 13 MJ kg^{-1} .

2.1.3 Brandbeschleuniger und Zündmechanismus

Der Brandbeschleuniger für die Versuche musste leicht entzündlich und auch nach dem Flashover mit den analytischen Methoden noch potentiell nachweisbar sein. Außerdem galt es, Explosionen bei der Zündung des Brandbeschleunigers auszuschließen. Aus diesen Gründen wurde als Brandbeschleuniger ein Gemisch aus Benzin³ und Diesel⁴ (gleiche Volumenanteile) verwendet. Durch das Benzin ist das Gemisch leicht entzündlich. Der Diesel mindert die Explosionsgefahr und erhöht auf Grund seiner geringeren Flüchtigkeit die Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Nachweises der Brandbeschleuniger mit analytischen Methoden.

Die Zündung bei allen Versuchen mit Brandbeschleunigern erfolgte mit einer Fernzündeinrichtung⁵ (s. a. Abb. C.35 und C.36).

²Angaben für die Brandlastdichte aus Eurocode 9: Wohngebäude 780 MJ m^{-2} ; Bürogebäude 420 MJ m^{-2} ; Hotelzimmer 310 MJ m^{-2}

Parkinson [20, Tab. A-1] hat eine Übersicht für die Brandlast auf Basis der Einrichtung (variable Brandlast) in versch. int. Quellen zusammengestellt. Die Werte liegen zwischen 350 MJ m^{-2} und 780 MJ m^{-2} . Geiger hat 1982 für ein Wohnzimmer in der DDR mit einer Fläche von $18,48 \text{ m}^2$ eine Brandlastdichte von $640,4 \text{ MJ m}^{-2}$ berechnet [21, S. 23].

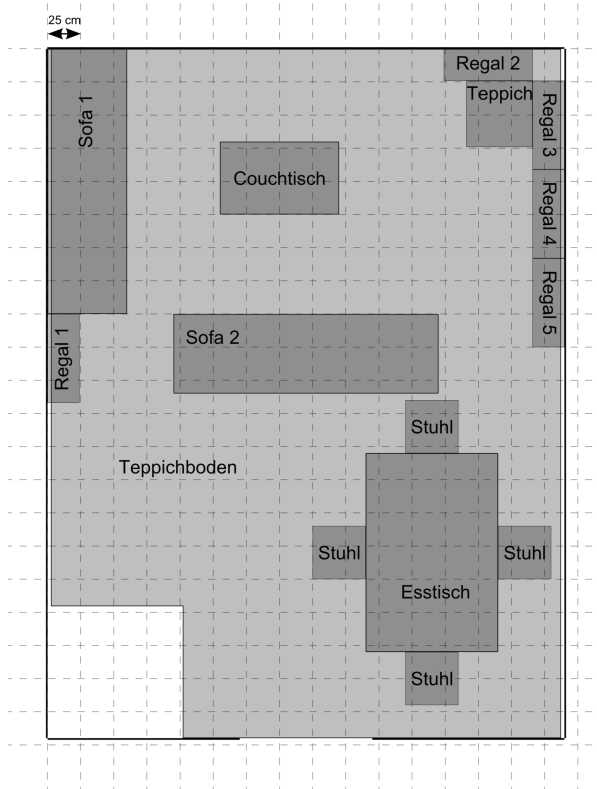
Der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein gibt für Wohnungen einen Wert von 300 MJ m^{-2} an [22, S.63].

Auch Bukowski stellt eine Übersicht über versch. Quellen zusammen [23, Tab.1]. Die Werte (Mittelwerte) liegen zwischen 300 MJ m^{-2} und 780 MJ m^{-2} .

³Aral Super 95, DIN EN 228, bleifrei, max. 5 Vol% Bioethanol

⁴Aral Diesel, DIN 51628, max. 7 Vol% Biodiesel

⁵Pyrotec PFC Advanced, Galaxis Showtechnik GmbH, Zünder aus Bleimennige und Silizium mit innen liegender Zündpille



(a) Skizze (Draufsicht)



(b) Blick durch die Brandraumöffnung



(c) Blick durch die Zugangstür

Abbildung 2.3: Brandlastanordnung im Brandraum

Tabelle 2.1: Masse brennbare Gegenstände im Brandraum und Brandlast

Nr	Gegenstand	Anzahl	Gesamtmasse in kg	Heizwert in MJ kg ⁻¹	Brandlast in MJ
1	Teppich	1	23,3	10 ^a	233
2	Regal	5	91,4	17 ^b	1553,8
3	Sofa – Spanplatte	2	79	17 ^c	1343
4	Sofa – PUR	2	12	24 ^a	288
5	Sofa – Stoff	2	2,1	15 ^a	31,5
6	Sofa – Polsterwatte	2	0,8	21 ^a	16,8
7	Regal – PUR	15	8,4	24 ^a	201,6
8	Regal – Box	10	2	43 ^d	86
9	Regal – PA in Box	10	8,5	20 ^a	170
10	Regal – Katalog	105	351,8	10 ^g	3518
11	Esstisch – Tischplatte	1	33,4	17 ^a	567,8
12	Esstisch – Tischdecke	1	0,6	15 ^a	9
13	Stuhl – Sitzfläche	4	1,4	43 ^d	60,2
14	Stuhl – Rückenlehne	4	0,6	43 ^d	25,8
15	Couchtisch	1	8,1	17 ^b	137,7
16	Tischlampe – Fuß	4	0,6	39 ^a	23,4
17	Tischlampe – Schirm	4	0,6	41 ^a	24,6
18	Vase Kunststoff	4	0,7	43 ^d	30,1
19	Spanprobekörper – Spanplatte	2	5,6	17 ^a	95,2
	Summe		630,9		8415,5

^a Messung im Bombenkalorimeter nach ISO 1716, s. a. Anhang B

^b Es wird angenommen, dass das Regal aus Spanplatte besteht und der entsprechende Wert übernommen

^c Annahme der Werte der Chargen Span02 bzw. SpanD02

^d Literaturwert für Polypropylen aus [24, Tab. C.3]

2.1.4 Messtechnik

Zur Messung physikalischer Größen wurden bei dieser Versuchsreihe folgende Messgeräte eingesetzt (in Klammern: Kurzbezeichnung für die Größe):

- Infrarot-Gassensoren (G)
- Paramagnetische Sauerstoffsensoren (G)
- Fourier-Transformations-Infrarot (FTIR) Spektrometer (G)
- Bidirektionale Sonden (D)
- Plattenthermometer (T)
- Mantelthermoelemente (T)
- Infrarotvideokamera (K)

Zusätzlich wurde der Versuch mit mehreren digitalen Fotokameras, zwei Netzwerkkameras im Brandraum und zwei Videokameras und einer Netzwerkkamera vor der Brandraumöffnung aufgezeichnet.

Die Anordnung der Messstellen im Brandraum ist als Übersicht in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Daten zu allen Messstellen inkl. der Bezeichnungen und Eigenschaften können Tabelle D.7 entnommen werden und in Anhang C.2.3 sind Fotos der Messstellen und Messgeräte zu finden.

Gasmesstechnik

Die Konzentrationen diverser Gasspezies wurden an zwei Orten im Brandraum, an der Brandraumöffnung und im Schlot mit verschiedenen Verfahren gemessen (zur Lage der Messstellen vgl. Abb. 2.4):

G1 Brandraum über Sofa 2 in 80 cm Höhe

FTIR-Spektrometer (CO₂, CO, H₂O, SO₂, NO, NO₂, NH₃, CH₄, C₂H₄, C₂H₂, C₆H₆, CH₂O, C₃H₄O, C₆H₆O, HBr, HCl, HF, HCN)

IR-Sensor (CO₂)

paramagnetischer Sensor (O₂)

G2 Brandraummitte unter der Decke

IR-Sensor (CO₂, CO)

paramagnetischer Sensor (O₂)

G3 Schlot

IR-Sensor (CO₂)

paramagnetischer Sensor (O₂)

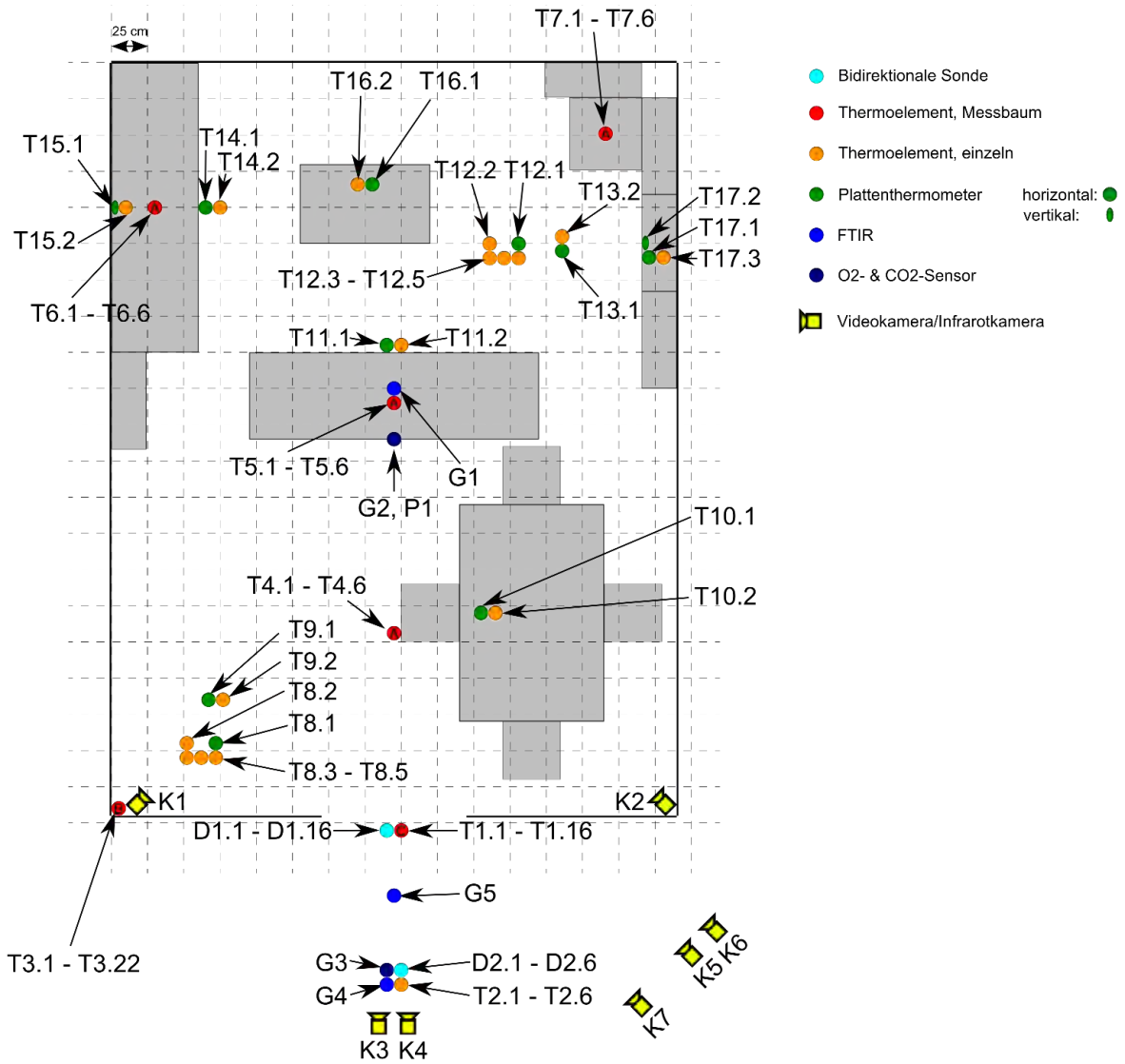


Abbildung 2.4: Lageplan der Messstellen

G4 Schlot

FTIR-Spektrometer (CO₂, CO, H₂O, SO₂, NO, NO₂, N₂O, NH₃, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₆H₆, CH₂O, COS, Cetan, HCl, HCN)

paramagnetischer Sensor (O₂)

G5 Oberkante Brandraumöffnung Außenseite

FTIR-Spektrometer (CO₂, CO, H₂O, SO₂, NO, NO₂, N₂O, NH₃, CH₄, C₂H₆, C₃H₈, C₆H₆, CH₂O, COS, Cetan, HCl, HCN)

paramagnetischer Sensor (O₂)

Die Typbezeichnungen und Parameter der einzelnen Geräte können Tabelle D.7 im Anhang entnommen werden.

Der Verlauf der Zuleitungen zu den Analysatoren, die Lage von Partikelfiltern etc. können den Abbildungen C.16, C.17, C.18, C.19 und C.20 im Anhang C.1.2 entnommen werden. In Anhang C.2.3 sind Abbildungen der einzelnen Messstellen und Messgeräte enthalten (Abb. C.40 bis C.48).

Den Analysatoren wurde je nach Typ getrocknetes oder feuchtes Messgas zugeführt. Dieser Punkt wird in Anhang E weiter diskutiert.

Die Partikelfilter in den Zuleitungen der Analysatoren wurden vor jedem Versuch erneuert.

Zur Überprüfung der Gasanalyse wurden für die Messstränge G1, G4 und G5 vor jedem Versuch die Volumenströme durch die Analysatoren gemessen. Die Werte können Tabelle D.8 entnommen werden.

Strömungsmesstechnik

Zur Bestimmung des Strömungsprofils und des Massenstroms in der Brandraumöffnung und im Schlot wurden bidirektionale Sonden verwendet. Mit dieser Methode ist die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids über die Druckdifferenz an der Sonde möglich. Die detaillierte Beschreibung des Messprinzips ist der Literatur zu entnehmen. [25, 24, 26].

Vor der Brandraumöffnung waren die Sonden an einem Gestell, das vor der Öffnung von Außen positioniert wurde, befestigt (vgl. Abb. 2.5). Die Anordnung der einzelnen Sonden ist in Abbildung C.9 (Brandraumöffnung) und Abbildung C.10 (Schlot) skizziert⁶. Abbildung C.42 zeigt die bidirektionalen Sonden im Schlot. Es wurden Sondentypen mit

⁶Für die Berechnungen wird im Folgenden an der Öffnung von einem gleichmäßigen Abstand zwischen den einzelnen Sonden von 13 cm ausgegangen.



(a) Gestell



(b) Einzelne Sonden und Mantelthermoelemente



(c) Differenzdruckaufnehmer

Abbildung 2.5: Differenzdruck- und Temperaturmessung in der Brandraumöffnung

zwei Durchmessern verwendet. Die Durchmesser der Sonden an den einzelnen Messstellen sind in Tabelle D.7 und Abbildung C.9 aufgeführt. Die Abmessungen der beiden Sondentypen können Abbildung C.8 entnommen werden.

Die verwendeten Sondentypen halten die Kriterien von McCaffrey und Heskestad [25] ein⁷.

Temperaturmesstechnik

Mantelthermoelemente Im Brandraum waren drei vertikale Messstellen mit je sechs Mantelthermoelementen (T4 bis T7) und eine vertikale Messstellen mit 22 Mantelthermoelementen (T3) angeordnet. Die Mantelthermoelemente wurden über die Brandraumdecke von oben hängend an die Messstelle verlegt und mit einem Gewicht beschwert (vgl.

⁷Verhältnis von Länge zu Durchmesser ungefähr zwei, Durchmesser zwischen 12,7 mm und 25,4 mm



Abbildung 2.6: Vertikale Temperaturmessstellen T5 und T6 im Brandraum

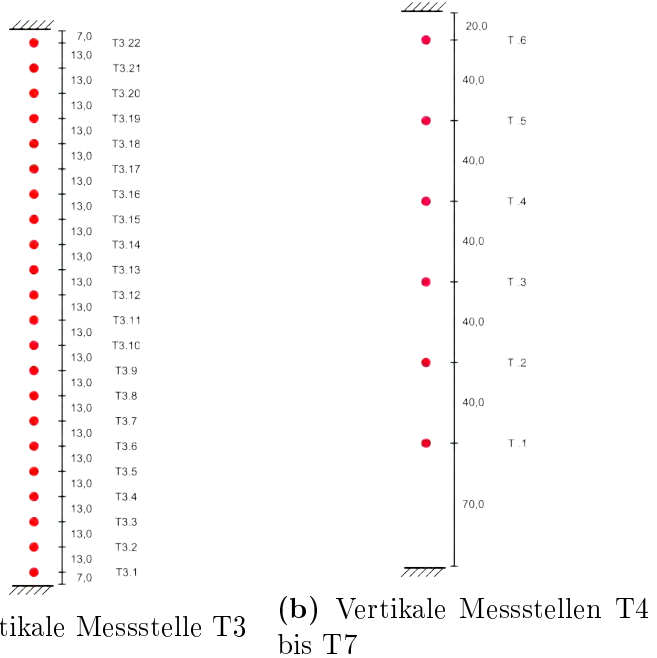


Abbildung 2.7: Projektierter Aufbau der vertikalen Temperaturmessstellen (Abmessungen in cm)

Abb. 2.6). In Abbildung 2.7 ist der Aufbau der vertikalen Temperaturmessstellen und die Anordnung der einzelnen Messstellen skizziert⁸.

In der Brandraumöffnung waren 16 Mantelthermoelemente an den Positionen der bidirektionalen Sonden angebracht (vgl. Kapitel 2.1.4 und Abb. 2.5).

Im Schlot waren sechs Mantelthermoelemente positioniert (vgl. Abb. C.10 und C.42). Die Eigenschaften und genauen Positionen der einzelnen Messstellen können Tabelle D.7 entnommen werden.

Plattenthermometer Zur Messung der adiabaten Oberflächentemperatur und der einfallenden Strahlungswärmestromdichte wurden im Brandraum neun Plattenthermometer aus Edelstahl eingesetzt. Der Aufbau und die Eigenschaften der Plattenthermometer sind in Anhang M beschrieben. Über jedem Plattenthermometer ist ein Mantelthermoelement zur Messung der Fluidtemperatur angeordnet. Die einzelnen Plattenthermometer hatten folgende Positionen:

⁸In der Abbildung ist der Aufbau dargestellt, der in der Planung vorgesehen wurde. In der realen Umsetzung ergaben sich Abweichungen zur Planung, die in den Abbildungen C.11 bis C.15 dokumentiert sind. Der Einfluss dieser Abweichungen wird für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt. Im Rahmen der Auswertung und den Berechnungen wird von dem projektierten Aufbau der vertikalen Temperaturmessstellen ausgegangen.

T9.1	horizontal auf dem Brandraumboden
T10.1	horizontal auf dem Esstisch in ca. 75 cm Höhe
T11.1	horizontal auf einem Ständer in ca. 60 cm Höhe (Sitzfläche Sofa 2)
T13.1	horizontal auf dem Brandraumboden
T14.1	horizontal auf einem Ständer in ca. 60 cm Höhe (Sitzfläche Sofa 2)
T15.1	vertikal an der Lehne von Sofa 1 in ca. 110 cm Höhe
T16.1	horizontal auf dem Couchtisch in ca. 50 cm Höhe
T17.1	horizontal auf dem Regal 3 in ca. 200 cm Höhe
T17.2	vertikal auf dem Regal 3 in ca. 200 cm Höhe

Die Eigenschaften und genauen Positionen der einzelnen Messstellen können Tabelle D.7 entnommen werden. Fotos der Plattenthermometer sind in Anhang C.2.3 (Abb. C.50 bis C.52) zu finden.

Brandraumdruck

Der Überdruck im Brandraum wurde als Differenzdruck zwischen der Messstelle in Raummitte unter der Decke und der Vergleichsstelle im Durchgang neben dem Brandraum gemessen (Foto der Messstelle in Abbildung C.41).

Foto- und Videotechnik

Im Brandraum wurden Videoaufnahmen mit zwei Netzwerkkameras (K1 und K2) an der Stirnseite gemacht (s. Abb. C.38). Die Kameras waren über ein Funknetzwerk (WLAN) mit dem aufzeichnenden Rechner verbunden. Sie versagten planmäßig durch die thermische Belastung des Brandes. Um den Zeitraum bis zum Versagen zu verlängern, wurden die Kameras mit Aluminiumfolie umhüllt.

In direkter Flucht der Brandraumöffnung waren auf einem Podest im Zugangstor des Versuchsstandes (Abstand zu Öffnung 7,5 m) eine Videokamera (K3) und eine Infrarotkamera (K4) positioniert (s. Abb. C.39).

Im Vorraum des Versuchsstandes befanden sich mit schräger Ansicht auf die Brandraumöffnung eine weitere Videokamera (K5), eine weitere Infrarotkamera (K6) und eine Netzwerkkamera (K7). Die Netzwerkkamera K7 diente vor allem der Dokumentation der gesamten Versuchphase inkl. Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung mit Standbildern.

Die technischen Daten zu den einzelnen Videokameras können Tabelle D.7 entnommen werden.

2.1.5 Sonstige Brandrauminstallationen

Vergleichsgegenstände

Zur Rekonstruktion von Brandverläufen werden Alltagsgegenstände als Temperatur- und Brandausbreitungsrichtungsindikatoren genutzt [27][28]. Beispielsweise stellt Roberts in [29] eine Methode zur Nutzung von (Wand-)Farbe als Temperaturindikator vor. Zu Temperaturabschätzung wurden in dem Brandraum vier Zusammenstellungen aus je einer Glasvase, einer Kunststoffvase und einer Tischlampe mit Glühbirne auf dem Esstisch, dem Couchtisch, dem Regalen 2 und 3 und in einer Brandraumecke platziert. Die Brandraumecke wurde nach den niedrigsten erwarteten Temperaturen ausgewählt und wird als Referenzecke bezeichnet. Um Einflüsse durch brennenden Teppichboden zu vermeiden, wurde der Teppich in dieser Ecke auf einer Fläche von einem Quadratmeter ausgeschnitten (vgl. Abb. 2.8a, Position X_0_01).

Ziel dieses Ansatzes war, aus dem Zustand der Gegenstände nach dem Versuch und den thermophysikalischen Eigenschaften der Materialien (Schmelztemperatur, Glastemperatur, Zündtemperatur) Rückschlüsse auf den Brandentstehungsort und die lokale Maximaltemperatur zu ziehen. An jedem Ort mit Vergleichsgegenständen befand sich ein Plattenthermometer mit Mantelthermoelement (s. a. Kapitel 2.1.4), um die abgeschätzten lokalen Maximaltemperaturen mit Messwerten vergleichen zu können.

Spanplattenprobekörper

Zur Untersuchung des Abbrandverhaltens von Spanplatte unter Realbrandbedingungen wurden zwei Spanplattenprobekörper im Brandraum positioniert⁹. Die Probekörper bestanden aus einem Rahmen aus Edelstahl, in den eine Spanplatte (quadratisch, Kantenlänge 50 cm, Stärke 16 mm) eingelegt wurde. Die Rückseite der Spanplatte wurde mit Glaswolle isoliert und einer Calciumsilikatplatte abgeschlossen, die gegen die Glaswolle gedrückt und mit Schrauben an ihrer Position im Rahmen fixiert wurde.

Im Mittelpunkt der Spanplatte befand sich in einem Loch ein Plattenthermometer aus Kupfer zur Messung der adiabaten Oberflächentemperatur, des Incident Heat Flux und des gesamten Wärmestroms auf die Spanplatte. Drei Mantelthermoelemente (Durchmesser 1,5 mm) wurden von der Unterseite der Spanplatte in vorgebohrte Löcher in 3 mm, 8 mm und 13 mm Tiefe (von der Oberseite der Spanplatte) positioniert, um die

⁹Ziel dieses Ansatzes war, die Vergleichbarkeit der Abbrandrate zwischen kleinskaligen und realmaßstäblichen Versuchen zu untersuchen. Da die Spanplatten vollständig verbrannten, wird die Temperaturentwicklung in der Spanplatte als Vergleichsgröße herangezogen. Die verwendete Spanplattencharge wurde zuvor im Cone Calorimeter und im Single Burning Item Test untersucht.

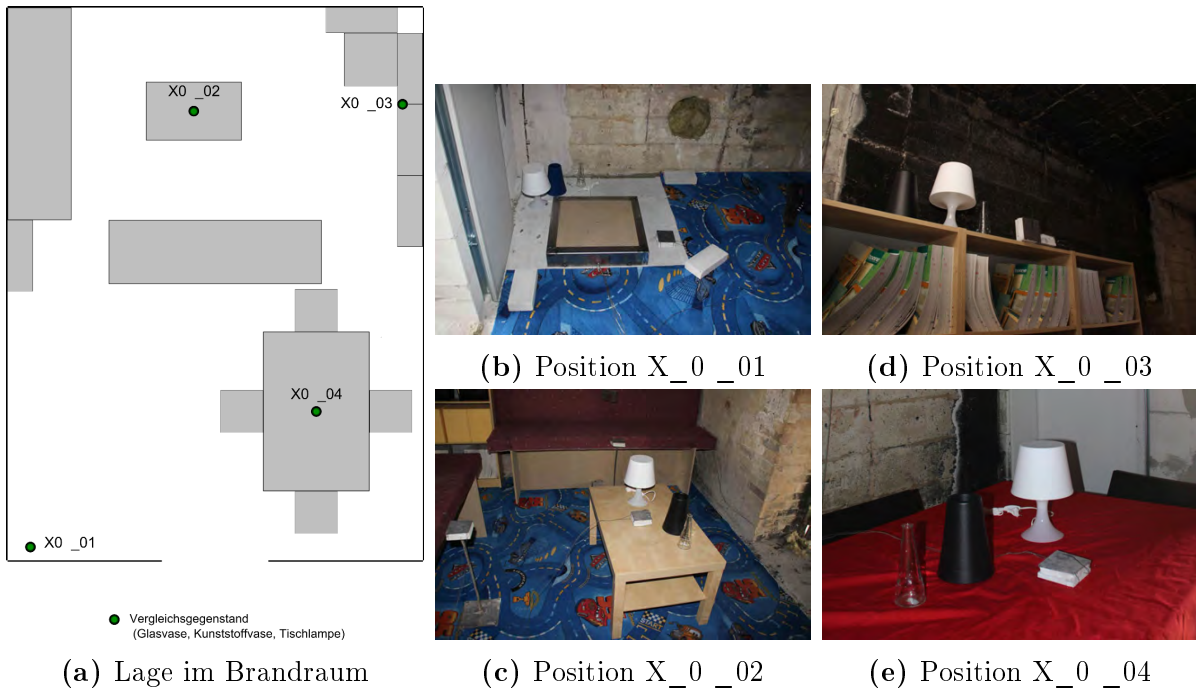


Abbildung 2.8: Vergleichsgegenstände

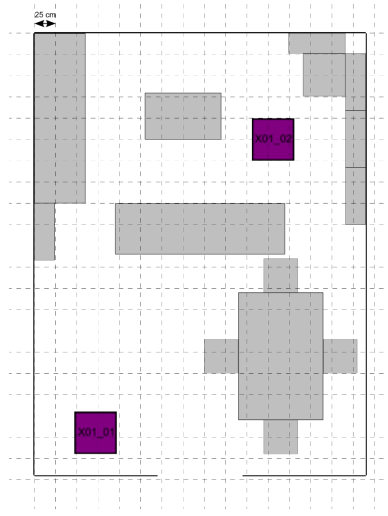
Temperatur innerhalb der Spanplatte zu messen (s. a. Abb. C.4). Ein weiteres Mantelthermoelement (Durchmesser 1,5 mm) wurde vollständig durch die Spanplatte geführt, um die Fluidtemperatur über der Spanplatte zu messen.

Weitere Informationen zum Aufbau der Probekörper und den Plattenthermometern aus Kupfer sind Anhang M.1.2 zu entnehmen.

Tapetenelemente

An der Stirnseite des Brandraums waren neben der Brandraumöffnung zwei Tapetenelemente befestigt (vgl. Abb. 2.10). Diese Elemente dienten der Probenahme von Wisch- und Tapetenproben zum Nachweis des Brandbeschleunigers auf realistischen Substraten. Sie wurden aus Gipskartonplatten, Aluminiumprofilen und Tapete angefertigt. Hierzu wurden zwei Gipskartonplatten auf zwei Aluminiumprofilen befestigt. Anschließend wurde handelsübliche Raufasertapete mit Tapetenkleister auf der oberen Gipskartonplatte angebracht. Das Tapetenelement 2 hatte zusätzlich einen circa 25 cm langen Schenkel, um Rußablagerungen in Raumecken zu erhalten.

Die Tapetenelemente wurden an der Wand aufgehängt und beeinflussten somit nicht die Brandraumwaage.

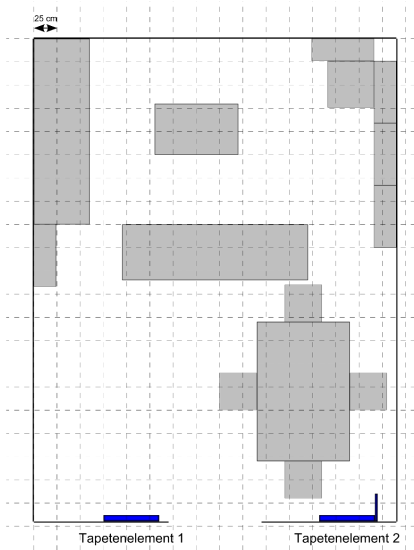


(a) Lage im Brandraum



(b) Probekörper X_01_01

Abbildung 2.9: Spanplattenprobekörper



(a) Lage im Brandraum



(b) Tapetenelement 1



(c) Tapetenelement 2

Abbildung 2.10: Tapetenelemente

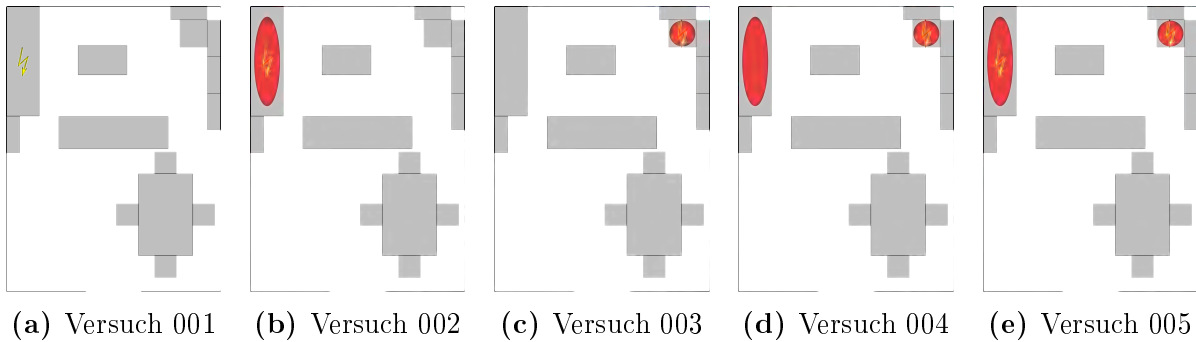


Abbildung 2.11: Szenarien (rote Flächen: Brandbeschleunigerlachen, gelber Pfeil: Zündort)

2.2 Brandszenarien

Ziel der vorliegenden Versuche war die Untersuchung des Einflusses von Brandbeschleuniger auf den Verlauf von Raumbränden.

Es wurden fünf Versuche durchgeführt, von denen der erste Versuch (MFPA_Zimmer_001) ohne Brandbeschleuniger mit einem Feuerzeug an Sofa 1 gezündet wurde. Beim Versuch MFPA_Zimmer_002 wurde ein Liter Brandbeschleuniger auf der Sitzfläche von Sofa 1 ausgebracht. Auf dem Teppichelement in der rechten hinteren Ecke des Brandraums erfolgte die Zündung mit einem halben Liter Brandbeschleuniger beim Versuch MFPA_Zimmer_003. Bei den Versuchen MFPA_Zimmer_004 und MFPA_Zimmer_005 wurden je ein Liter Brandbeschleuniger auf die Sitzfläche von Sofa 1 und ein halber Liter auf das Teppichelement ausgebracht. Während bei Versuch MFPA_Zimmer_004 nur an dem Teppichelement gezündet wurde, um den Einfluss ungezündeter Brandbeschleunigerlachen auf den Brandverlauf zu untersuchen, wurde bei Versuch MFPA_Zimmer_005 an dem Teppichelement und auf der Sitzfläche von Sofa 1 gleichzeitig gezündet.

Abbildung 2.11 gibt einen Überblick über die fünf Szenarien. Die Brandbeschleunigermengen und die entsprechende Brandlast sind in Tabelle D.5 zusammengefasst.

Alle Versuche wurden durch Löschen mit Wasser¹⁰ nach dem Flashover beendet. Es sollten hierbei ein realistischer Brandverlauf für die Brandbeschleunigeranalytik realisiert werden. Zusätzlich wurde der Zeitraum, der bis zum Folgeversuch zur Abkühlung der Umfassungsbauteile zur Verfügung stand, vergrößert. Bei der Löschwasserabgabe wurde darauf geachtet, den Brandraumboden möglichst wenig zu benetzen und primär offene Flammen niederzuschlagen. Trotzdem mussten Brandschuttanhäufungen ausreichend

¹⁰ Abgabe über ein Mehrzweckstrahlrohr Größe C mit Mundstück mit Schlauch C52 an Überflurhydrant, Volumenstrom ca. 100 l min^{-1} , Nachlöscharbeiten mit einem Gartenschlauch und Pistolenstrahlrohr.

durchfeuchtet werden, um eine Wiederentzündung oder Schwelbrände zu verhindern. Der Zeitpunkt des Löschbeginns wurde während der Versuchsdurchführung festgelegt und ist somit nicht bei allen Versuchen gleich. Bei Versuch MFPA_Zimmer_005 wurde sehr früh nach Eintritt des Flashovers gelöscht, um den analytischen Nachweis des Brandbeschleunigers zu vereinfachen.

3 Auswertung

3.1 Datenaufbereitung

Die aufgezeichneten Daten der Messgeräte (Messreihen) wurden für jeden Versuch in einer Datei zusammengefasst. Die einzelnen Messreihen wurden korrigiert und anschließend in eine kommasetrennte Textdatei (csv) exportiert. Die Korrektur der Daten umfasste die Synchronisation der einzelnen Zeitreihen¹, die Berücksichtigung von Transportzeiten und Basislinienkorrektur bei den Gasmessungen (s.u.).

Die Berechnung von konkreten Ergebnissen erfolgte auf Basis der korrigierten Daten in gesonderten Exceldateien. Zu Auswertung wurde das Programm Microsoft Excel 2010 für Windows mit den Dateiformaten *.xlsx* und *.xslm* genutzt. Alle Berechnungen wurden in Visual Basic for Applications (VBA) programmiert.

Ergänzende Anmerkungen zu einzelnen Messgeräten und Dateien sind in Anhang E zu finden.

Ansprech- und Transportzeit der Gasanalysatoren

Mit Stickstoff und Zigarettenqualm wurde die Dauer vom Aufgeben eines Gases an der Sonde bis zum ersten Ansprechen des Analysators für jede Messstelle gemessen (Transportzeit). Bei den FTIR-Spektrometern wurde die Transportzeit aus dem Ansprechen des angekoppelten Sauerstoffanalysators ermittelt. Aus diesen Messungen wurde die Transportzeit abgeschätzt (vgl. Tabelle 3.1), die in den Datenkorrekturen berücksichtigt wurde. Das Ansprechverhalten der Sensoren bleibt unberücksichtigt.

¹Die Zeitschrittweiten der einzelnen Messreihen bzw. Datenlogger sind unterschiedlich groß. Aus diesem Grund hat jedes Messgerät auch in der synchronisierten Version der Daten seine eigene Zeitreihe. Jedoch ist bei allen Zeitreihen nach der Synchronisation der Zeitpunkt Null der Versuchsstart.

Tabelle 3.1: Transportzeiten

Messgerät	Transportzeit / s
G1 (FTIR + Servomex Brandraum)	30
G2 (MFPA Brandraum)	40
G3 (MFPA Schlot)	140
G4 (FTIR + Servomex Schlot)	15
G5 (FTIR + Servomex Oeffnung)	21

Tabelle 3.2: Basiskonzentrationen zur Basislinienkorrektur

Gasspezies	Basiskonzentration $X_{trocken}$ in Vol%
Sauerstoff	20,95
Kohlendioxid	0,04
alle anderen Spezies	0,00

Basislinienkorrektur der Gasmessungen

Die Basislinien der einzelnen Messreihen (Aufzeichnung vor Versuchsbeginn) wurden mit den in Tabelle 3.2 aufgeführten Basiskonzentrationen korrigiert². Hierzu wurde der mittlere Messwert jeder Messreihe in einer ausreichend langen Phase ungestörter Messung als Basiswert ermittelt. Die Differenz zwischen diesem Mittelwert und der Basiskonzentration aus Tabelle 3.2 bildet den Korrekturwert, der von jedem Einzelwert der Messreihe subtrahiert wurde.

Die trockenen Basiskonzentrationen wurden für feucht gemessene Gase zuvor noch mit der Wasserdampfkonzentration in der Umgebungsluft auf feuchte Bedingungen umgerechnet (vgl. auch [17, Formel F.7]):

$$X_{feucht} = (1 - X_{H_2O}) X_{trocken} \quad (3.1)$$

X_{H_2O} ist hierbei die vor dem Versuch mittels Hygrometer gemessene Wasserdampfkonzentration in der Umgebungsluft und X die Konzentration des Gases in Molanteilen.

Die Daten zur Lufttemperatur, der relativen Feuchtigkeit und dem Luftdruck für den jeweiligen Versuchstag können Tabelle D.9 im Anhang entnommen werden.

Diese Basislinienkorrektur führt keinen Fehler durch Nichtberücksichtigung des Wasserdampfes aus der Verbrennung ein, da dieser Wasserdampf zu der relevanten Zeit noch

²Die Angaben zur Sauerstoffkonzentration in trockener Luft variieren je nach Literaturstelle zwischen 20,942 Vol% und 20,96 Vol%, zum Beispiel 20,95 Vol% in [30] und 20,96 Vol% (CO₂-Anteil vernachlässigt) in [31]. Für die weiteren Betrachtungen wird von 20,95 Vol% ausgegangen.

nicht vorliegt.

Bei dieser Datenbearbeitung wurden Werte kleiner Null gleich Null gesetzt.

3.2 Berechnungen

Umrechnung feucht gemessener Gase in trockene Messung

Um die gemessenen Gasspezieskonzentrationen zwischen den Messgeräten vergleichend betrachten zu können, wurden Werte feucht gemessener Gase mit folgender Formel in trockene Messung umgerechnet:

$$X_{trocken} = \frac{X_{feucht}}{(1 - X_{H_2O})} \quad (3.2)$$

X_{H_2O} ist hierbei die gemessene Wasserdampfkonzentration im Rauchgas und X die Konzentration des Gases in Molanteilen. An der Messstelle G5 sind die Zeitschrittweiten des Sauerstoffanalysators und des FTIR-Spektrometers nicht einheitlich. Die Umrechnung der gemessenen Sauerstoffkonzentration erfolgt mit einer Wasserdampfkonzentration, die mittels linearer Interpolation zwischen dem nächstfrüheren und dem nächstspäteren Zeitpunkt aus der Messreihe des FTIR-Spektrometers ermittelt wird.

Korrektur der Massenaufzeichnung - elektrischer Anschlussfehler

Die aufgezeichneten Werte der Brandraumwaage mussten rechnerisch mit der folgenden Formel korrigiert werden, da der Spannungsbereich am Datenlogger falsch eingestellt war.

$$m^*(t) = m(t) \frac{U}{U^*} = m(t) \frac{1/200 \text{ V/kg}}{1/300 \text{ V/kg}} = 1,5 \cdot m(t) \quad (3.3)$$

m^* korrigierte Masse, m unkorrigierte Masse, U^* korrekte Spannung je Kilogramm, U falsche Spannung je Kilogramm.

Weitere Hinweise zu dieser Korrektur sind Anhang G zu entnehmen.

Korrektur der Massenaufzeichnung - Überdruck im Brandraum

Durch den Verbrennungsprozess entsteht im Brandraum ein Überdruck. Dieser Überdruck übt eine Kraft auf den Brandraumboden und somit auf die Waage aus und mindert den Masseverlust. Dieser Effekt kann rechnerisch mit folgender Formel berücksichtigt

werden:

$$m_{\text{korr}}(t) = m(t) - \frac{(p(t) - p_{\text{Basislinie}}) A_{\text{Boden}}}{g} \quad (3.4)$$

m_{korr} ist die korrigierte Masse, m ist die aufgezeichnete Masse, p der Überdruck im Brandraum, $p_{\text{Basislinie}}$ der Überdruck im Brandraum vor Versuchsbeginn, A_{Boden} die Fläche des Brandraumbodens³ (19,5 m²) und g ist die Normfallbeschleunigung (9,81 m s⁻²). Für eine exakte Korrektur müsste die Druckdifferenz zwischen dem Brandraum und dem Raum unter dem Brandraum mit der Waage bekannt sein. Dies wird in Kapitel 3.3 auf Seite 31 genauer diskutiert.

Absoluter Massenverlust

Der absolute Massenverlust wird mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta m(t) = m(t) - m(t = 0) \quad (3.5)$$

Mit $\Delta m(t)$ Massenverlust zum Zeitpunkt t , $m(t)$ Masse zum Zeitpunkt t und $m(t = 0)$ Masse bei Versuchsstart.

Massenverlustrate

Die Massenverlustrate wird mit der Methode nach SAVITZKY und GOLAY [32] berechnet. Mit der Methode ist es möglich, die Messreihen zu glätten und gleichzeitig die erste Ableitung zu bestimmen. Die Formeln wurden in VBA für Microsoft Excel nach der Vorlage von GORRY [33] programmiert.

Um vergleichbare Daten zu erhalten, sollte bei allen fünf Versuchen derselbe Parametersatz (Anzahl der Stützstellen, Anzahl der Durchläufe und Ordnung des Glättungspolynoms) genutzt werden. Da es sich bei der Savitzky-Golay-Glättung im Prinzip um einen gewichteten zentrierten Mittelwert handelt, wird der einzelne geglättete Wert durch Werte, die in der Zukunft der Messreihe liegen, beeinflusst. Dies führt beim Versuch MFPA_Zimmer_005 aufgrund der kleinen Anzahl an Messwerten im Versuchszeitraum (geringe Versuchsdauer) zu einem starken Einfluss des Löschvorgangs (vgl. Abb. 3.1). Um plausible Werte zu erhalten wurde die Massenverlustrate für den fünften Versuch mit abweichenden Parametern bestimmt. Die Parameter sind in Tabelle 3.3 aufgeführt. Um den Einfluss des Löschvorgangs zu minimieren, wurde die Massenverlustrate erstens

³Unter Berücksichtigung der Isolierung zwischen Boden und Wand ergeben sich für die Bodenfläche eine Breite von 3,9 m und eine Tiefe von 5,2 m.

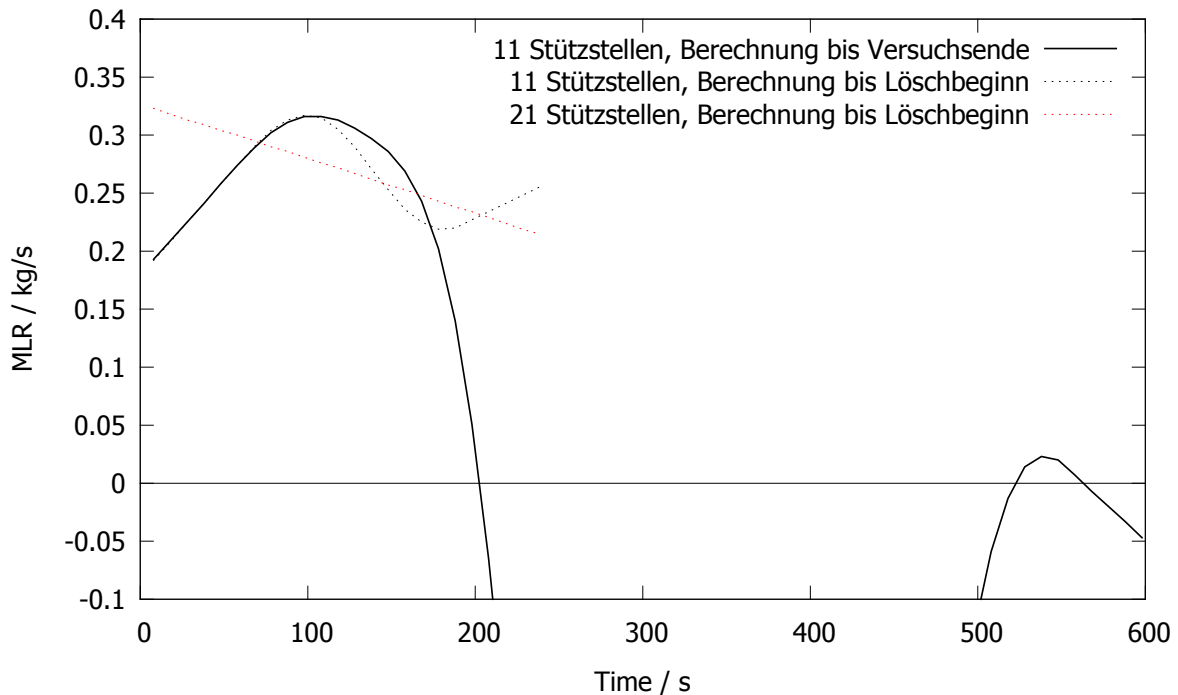


Abbildung 3.1: Vergleich der Savitzky-Golay-Parameter und Berechnungszeiträume zur Bestimmung der Massenverlustrate, Versuch MFPA_Zimmer_005, Ordnung des Glättungspolynoms: 2, Anzahl der Durchläufe: 4

bis zum Löschzeitpunkt ohne Berücksichtigung des Löschvorgangs und zweitens für die gesamte Versuchsdauer mit dem Löschvorgang berechnet.

Lage der neutralen Ebene

Im Brandraum bilden sich mit der Brandentwicklung zwei Druckzonen aus. Im oberen Volumen des Raums herrscht relativer Überdruck. Die Rauchgase strömen aus der Brandraumöffnung aus. Im unteren Volumen herrscht relativer Unterdruck. Luft strömt aus der Umgebung durch die Brandraumöffnung in den Brandraum ein.

Die Grenze zwischen diesen beiden Bereichen wird als neutrale Ebene bezeichnet. Idealerweise herrscht dort weder relativer Unter- noch Überdruck.

Weitere Informationen zum Brandverlauf in Räumen und zur neutralen Ebene können der Literatur entnommen werden (s. bspw. QUINTIERE [34] oder SCHNEIDER [35]). Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Lage der neutralen Ebene direkt aus dem Druckprofil in der Brandraumöffnung ermittelt, das mit den bidirektionalen Sonden gemessen wurde. Diese Ergebnisse wurden mit analytischen Berechnungen auf Basis von einfachen Zonenmodellen verglichen.

Tabelle 3.3: Savitzky-Golay-Parameter zur Berechnung der Massenverlustrate

Versuch	Anzahl Stützstellen (beidseitig)	Ordnung Glättungspolynom	Anzahl Durchläufe
MFPA_Zimmer_001	21	2	4
MFPA_Zimmer_002	21	2	4
MFPA_Zimmer_003	21	2	4
MFPA_Zimmer_004	21	2	4
MFPA_Zimmer_005	11	2	4

Der Berechnungsalgorithmus und die Ergebnisse des Methodenvergleichs sind in Anhang J dargestellt.

Massenstrom durch die Brandraumöffnung

Der Massenstrom durch die Brandraumöffnung wurde aus der Messung des Druck- und Temperaturprofils mit den bidirektionalen Sonden bzw. den Mantelthermoelementen berechnet. Der Berechnungsalgorithmus ist in Anhang K dargestellt.

Wärmefreisetzungsrate

Die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate basiert auf der Bestimmung des Massenstroms durch den Schlot mit den bidirektionalen Sonden und den Mantelthermoelementen und der Messung der Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration im Schlot. Hier erfolgt – abweichend von den Betrachtungen in der Brandraumöffnung – keine Basislinienkorrektur der Messreihen der bidirektionalen Sonden. Als Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration wurden die Werte der Messstelle G3 herangezogen.

Die Formeln zur Berechnung der Wärmefreisetzungsrate und der Einfluss verwendeter Konstanten (Kalibrierkonstante der bidirektionalen Sonden und Strömungsbeiwert des Schlots) sind in Anhang H erläutert.

Freigesetzte Wärme

Die freigesetzte Wärme kann über die bestimmte Integration der Wärmefreisetzungsrate berechnet werden. Hierbei wird die Wärmefreisetzungsrate als Treppenfunktion angenommen.

$$q(t) = \sum_{t=0}^n \dot{q}(t) \Delta t \quad (3.6)$$

$q(t)$ freigesetzte Wärme, $\dot{q}(t)$ Wärmefreisetzungsrate, Δt Zeitschrittweite (Erfassungsintervall der Datenlogger, 10 s).

Strahlungswärmestrom, Gesamtwärmestrom und adiabate Oberflächentemperatur

Aus den gemessenen Temperaturen der Plattenthermometer können der Strahlungswärmestrom und der gesamte Wärmestrom auf Oberflächen und die adiabate Oberflächentemperatur von Oberflächen bestimmt werden.

Die verwendeten Plattenthermometer wurden in Anlehnung an Vorschläge von Wickström⁴ und Denisse [36] konstruiert und im Cone Calorimeter charakterisiert (vgl. Anhang M).

Der Aufbau der Plattenthermometer, die Berechnungsvorschriften und zu Grunde liegenden Annahmen sind in Anhang M im Detail beschrieben.

3.3 Fehlerbetrachtung

Zur Einschätzung der Ungenauigkeit der einzelnen Messungen werden im Folgenden die Einflüsse auf die Messung qualitativ diskutiert. Eine quantitative Beurteilung der Messunsicherheit erfolgt nicht. Um einen Eindruck von der Größenordnung der Unsicherheit bei originalmaßstäblichen Brandversuchen zu erhalten, wird auf die Arbeit von Lock et al. [12] verwiesen.

3.3.1 Allgemeine Fehlerquellen

Rauchgasströmung im Prüfstand

Der Prüfstand, in dem sich der Brandraum befindet, ist ein geschlossenes Gebäude. Während der Versuchsdurchführung war gegenüber und seitlich des Brandraums je ein Tor als Zuluftöffnung geöffnet. Die Rauchgase zogen rein konvektionsgetrieben ohne maschinelle Absaugung durch den Schlot in die Atmosphäre ab. Durch diesen Aufbau kommt es zur Verdünnung des Rauchgases durch Zuluft. Das Rauchgas staut sich teilweise unter der Decke des Prüfstands, bevor es durch den Schlot abzieht. Im Extremfall sinkt die Rauchsicht im Prüfstand so stark ab, dass Rauchgas durch die Zulufttore austritt. Somit ist die Zeit, die das Rauchgas nach Austritt aus der Brandraumöffnung des

⁴Persönliche Kommunikation mit Ulf Wickström, April 2012

Brandraums benötigt, um durch den Schlot zu strömen nicht konstant und unbekannt. Die beschriebenen Vorgänge werden durch die Wetterlage (Windstärke und -richtung, Lufttemperatur) beeinflusst.⁵

Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt der Umfassungsbauteile des Brandraums

Auf Grund der kurzen zeitlichen Abstände zwischen den Versuchen waren die Umfassungsbauteile des Brandraums bei Versuchsbeginn nicht vollständig auf Umgebungstemperatur abgekühlt.⁶

Die Versuche wurden alle durch Löschen mit Wasser abgebrochen. Hierbei wurde versucht möglichst wenig Wasser in den Brandraum einzubringen. Trotzdem kam es stellenweise zur Durchfeuchtung des Brandraumbodens. Auf Grund der unterschiedlichen Trocknungszeiten zwischen den Versuchen, der unterschiedlichen Mengen verwendeten Löschwassers und der sich verändernden hygroskopischen Eigenschaften der Steine des Bodenbelags, die vor Beginn der Versuchsserie neu in dem Brandraum installiert wurden, ist die Feuchtigkeitsmenge in den Umfassungsbauteilen und vor allem im Boden vor jedem Versuch unterschiedlich.

Datenlogger

Es kamen zwei Datenlogger zur Abfrage der Messwerte verschiedener Messgeräte zum Einsatz (vgl. Tab. D.6). Die Datenlogger fragen hierbei die Messstellen in einer vorgegeben Reihenfolge ab. Die Daten der jeweiligen Abfrage werden mit dem Zeitpunkt der ersten abgefragten Messstelle gespeichert. Beim Datenlogger der MFPA beträgt die Dauer für die Abfrage aller Messstellen circa 7s. Somit erfolgte die Aufnahme einiger Messwerte mit einer maximalen Abweichung von 7s zu dem Zeitpunkt, der in den Messreihen gespeichert wurde. Dieser Effekt wurde nicht rechnerisch korrigiert.

Beim Datenlogger der BAM liegt die Abfragedauer unter einer Sekunde.

⁵Zu Beurteilung auffälliger Messwerte sind in Tabelle D.9 die Daten zu Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Wetterlage zusammengefasst.

⁶Temperaturen vor Versuch MFPA_Zimmer_002 am 13.06.2012 11:00 Uhr: Decke 60 °C, Wände 40 bis 80 °C, Boden 30 °C,

Temperaturen vor Versuch MFPA_Zimmer_003 am 14.06.2012 12:15 Uhr: Decke 45 °C, Wände 35 °C, Boden 25 °C,

Temperatur vor Versuch MFPA_Zimmer_005 am 19.06.2012 13:30 Uhr: Decke maximal 44 °C, Messungen mit Pyromether (Emissionsgrad 0,9)

3.3.2 Massenverlust und Massenverlustrate

Elektrischer Anschlussfehler der Massenaufzeichnung

Die Einstellung der Spannungsbereiche der Brandraumwaage war nicht korrekt. In Kapitel 3.2 (S. 25) wird eine rechnerische Korrektur für dieses Problem vorgestellt. In welcher Größenordnung der Fehler liegt, der durch diese Korrektur eingeführt wird, ist unbekannt.

Überdruck im Brandraum

Durch Überdruck im Brandraum wird eine Kraft auf die Bodenfläche ausgeübt, die von der Waage als Masse erfasst wird. Die rechnerische Korrektur wird in Kapitel 3.2 auf Seite 25 vorgestellt. Um die Druckkraft auf die Bodenfläche möglichst genau abschätzen zu können, müsste die Druckdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite der Bodenplatte gemessen werden. In dieser Versuchsreihe wurde der Druck im Brandraum als Druckdifferenz zwischen einer Messstelle unter der Decke in Raummitte und einer Messstelle an der Außenseite des Brandraums gemessen. Es ist anzunehmen, dass diese Druckdifferenz größer ist, als die Druckdifferenz zwischen der Ober- und der Unterseite der Bodenplatte. Somit wird die Kraft, die auf die Bodenfläche ausgeübt wird, mit den hier zur rechnerischen Korrektur verwendeten Messdaten, überschätzt.

Die reale Masse im Brandraum liegt somit zwischen der druckkorrigierten und der nicht druckkorrigierten Masse.

Feuchtigkeit in den Steinen des Brandraumbodens

In den Steinen waren zu Beginn der jeweiligen Versuche unterschiedliche Mengen Feuchtigkeit vorhanden (vgl. a. Abschnitt *Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt der Umfassungsbauteile des Brandraums* in diesem Kapitel). Das Wasser kam durch den Löschvorgang in den Brandraum. Durch unterschiedliche Löschwassermengen und Trocknungszeiten zwischen den einzelnen Versuchen unterscheidet sich die Feuchtigkeitsmenge.

In Tabelle G.1 sind die aufgezeichneten Massen bei Versuchsbeginn m_0 aufgeführt. Die Masse nimmt vom ersten bis zum dritten Versuch kontinuierlich zu. Zwischen dem dritten und dem vierten Versuch lagen vier Tage anstatt einem Tag. Der Zeitraum für die Trocknung der Steine des Brandraumbodens war somit wesentlich größer und die Masse bei Versuchsbeginn lag wieder niedriger.

Während dem Versuch wird für die Verdampfung des Wassers Energie benötigt. Dem Brandraum wird Wasserdampf als Inertgas zugeführt. Somit beeinflusst die Feuchtigkeit

im Boden bzw. in den Umfassungsbauteilen allgemein den Brandverlauf. Die Größenordnung dieses Einflusses wurde nicht abgeschätzt.

Zusätzliche Masse durch Brandschutt

Die Tapetenelemente waren von der Waage entkoppelt an den Wänden aufgehängt. Im Verlauf der Versuche wurde die Gipskartonplatten so stark belastet, dass die obere Hälfte der Elemente einstürzte. Die Trümmer belasteten dann die Waage.

Dies führte zu einer zusätzlichen Masse von etwa 23 kg im Laufe des Versuchs (entsprechend ca. 3 % der gesamten Masse im Brandraum). Der absolute Massenverlust wird somit unterschätzt.

Abstützungen von Gegenständen an den Wänden

Alle Brandlastgegenstände (v. a. Regale und Sofa 1) wurden bei Versuchsbeginn so aufgestellt, dass sie sich nicht an den Wänden abstützten. Bei allen Versuchen kam es jedoch zum Einsturz der Regale 2, 3, 4 und 5, die sich dann an der Wand abstützten.

Dieser Effekt ist rechnerisch nicht kompensierbar und nicht quantifizierbar. Er muss bei der Interpretation der Masseverluste und aller, auf Basis der Masseaufzeichnung berechneten Größen, berücksichtigt werden. Der absolute Massenverlust wird hierdurch unterschätzt.

3.3.3 Temperaturen im Brandraum und Schlot

Die Fluidtemperaturen im Schlot und im Brandraum wurden mit Mantelthermoelementen mit Durchmessern von 1,5 und 3 mm gemessen (vgl. a. Tab. D.7). Diese Thermoelemente reagieren verzögert auf Temperaturänderungen des sie umgebenden Fluids.

Somit werden steigende Temperaturen mit Zeitverzug bzw. bezogen auf einen Zeitpunkt niedriger als real gemessen.

Die Mantelthermoelemente stehen im Strahlungsenergieaustausch mit ihrer Umgebung. Sie messen also nicht rein die Temperatur des umgebenden Fluids, sondern werden auch durch die Temperatur der Umgebung beeinflusst. Ob die Fluidtemperatur unter- oder überschätzt wird, hängt von der Oberflächentemperatur der Umgebung, der geometrischen Anordnung und dem Emissionsgrad der Gegenstände und der Konzentration Wärmestrahlung emittierender Gase und Rußpartikel ab.

Sowohl das Zeitverhalten als auch der Einfluss durch Wärmestrahlung wurden für die verwendeten Thermoelementtypen theoretisch und experimentell unter kontrollierten

Bedingungen in einem Kalibrierofen untersucht. Die Ergebnisse und weitere Informationen aus der Literatur sind Anhang L zu entnehmen.

Eine rechnerische Korrektur der aufgezeichneten Messdaten hinsichtlich Zeitverhalten und Wärmestrahlungseinfluss ist nur möglich, wenn die Strömungsbedingungen an der Messstelle und der Strahlungsenergieaustausch mit der Umgebung zumindest abschätzbar ist. Die hierzu notwendigen Informationen liegen bei Brandversuchen nicht vor.

3.3.4 Strahlungswärmestrom

Der Strahlungswärmestrom auf Oberflächen im Brandraum wurde mit Plattenthermometern gemessen.

Bei Messungen im Cone Calorimeter wurde für die verwendeten Plattenthermometer aus Edelstahl ein relativer Fehler in der Größenordnung von 10 % und für die Plattenthermometer aus Kupfer von 30 % ermittelt (vgl. Kap. M.4.8).

Es wird angenommen, dass der Fehler bei den anderen Größen, die auf Basis der Plattenthermometer ermittelt wurden (adiabate Oberflächentemperatur, Gesamtwärmestrom), in ähnlichen Größenordnungen liegen.

Die Plattenthermometer wurden teilweise durch Brandschutt verschüttet oder durch einstürzende Gegenstände in ihrer Position wesentlich verändert. Ab diesem Moment sind die Messwerte nicht mehr interpretierbar. Tabelle D.10 gibt einen Überblick über die Zeitpunkte, ab denen die Plattenthermometer als ausgefallen betrachtet werden müssen. In der Auswertung werden die Daten ab diesen Zeitpunkten nicht mehr dargestellt.

3.3.5 Gasspezieskonzentrationen

Kondensation in den Leitungen

Die Leitungen zwischen dem Ort der Gasentnahme im Brandraum bzw. im Schlot und den jeweiligen Messgeräten waren nur bei der Messstelle G1 teilweise geheizt. Somit kam es zu Kondensation von Feuchtigkeit in den Leitungen. Hierdurch verändern sich die Volumenanteile der einzelnen Gasspezies zwischen Entnahmestelle und Messung. Dieser Effekt ist im Rahmen dieses Berichts nicht quantifizierbar.

Adsorption von Gasspezies an den Partikelfiltern

Den FTIR-Spektrometern waren zu Filterung von Rußpartikeln Glasfaserfilter vorgeschaltet. Diese Filter können Chlorwasserstoff und Bromwasserstoff (durch Adsorption

an den Filtern selbst oder Adsorption der Moleküle an ausgefilterten Rußpartikeln) zurückhalten [37, 38, 39]. Dieser Effekt ist im Rahmen dieses Berichts nicht quantifizierbar.

Trocknung des Messgases

Paramagnetischen Sauerstoffsensoren und Infrarotsensoren muss üblicherweise trockenes Messgas, das keinen Wasserdampf enthält, zugeführt werden (vgl. Tabelle E.1). Wenn die Wasserdampfkonzentration während dem Versuch nicht an der Messstelle gemessen wurde, ist es nicht möglich, den Wasserdampf, der durch die Verbrennungsreaktion entstanden ist, durch eine Korrekturrechnung zu berücksichtigen.

Nach Umstellung von Formel 3.2 kann die relative Abweichung, die sich durch die Trocknung des Messgases zwischen der Konzentration im trockenen und der Konzentration im feuchten Messgas ergibt, in Abhängigkeit von der Wasserdampfkonzentration bestimmt werden.

$$\frac{X_{trocken} - X_{feucht}}{X_{feucht}} = \frac{X_{H_2O}}{1 - X_{H_2O}} \quad (3.7)$$

Bei einer Wasserdampfkonzentration X_{H_2O} im Messgas von 5 Vol% liegt die relative Abweichung bei 5,3 %, bei 10 Vol% bei 11,1 %.

Kalibrierung der paramagnetischen Sauerstoffanalysatoren

Die Sauerstoffanalysatoren an den Messstellen G1, G4 und G5 wurden vor den Versuchen mit Umgebungsluft auf eine Konzentration von 20,95 Vol% Sauerstoff kalibriert. Dies wurde sowohl bei Analysatoren, denen trockenes Messgas zugeführt wurde (G1, tlw. G5), als auch bei denjenigen, denen feuchtes Messgas zugeführt wurde (G4, tlw. G5), durchgeführt. Bei feuchtem Messgas ist die eingestellte Sauerstoffkonzentration im Messgas jedoch nicht korrekt, da sich der Wert von 20,95 Vol% auf trockene Luft bezieht. Sie müsste mit Formel 3.1 an die aktuelle Luftfeuchtigkeit angepasst werden.

Durch die manuell durchgeführte Basislinienkorrektur bei der Datenaufbereitung (vgl. Kapitel 3.1) wird dieser Effekt rechnerisch korrigiert.

Ansprechverhalten der Sensoren

Die Sensoren der Infrarot- und der paramagnetischen Gasanalysatoren reagieren verzögert auf Konzentrationsänderungen der jeweiligen Spezies am Sensor. Dieses Ansprechverhalten lässt sich bei definierten Laborversuchen rechnerisch berücksichtigen (vgl. bspw. ISO

5660-1 [17]). Im Rahmen dieser Versuchsserie wurde das Ansprechverhalten auf Grund des Aufwandes nicht ermittelt und nicht in den Berechnungen berücksichtigt. Steigende Spezieskonzentrationen werden hierdurch unterschätzt, fallende überschätzt. Typische Ansprechzeiten von Sensoren der verwendeten Bauarten bewegen sich in Bereich von 5 bis 20 s.

Scananzahl der FTIR-Spektrometer

Zur Ermittlung eines Spektrums, das anschließend qualitativ ausgewertet wird, führen die FTIR-Spektrometer in Abhängigkeit von ihrer Kalibrierung mehrere Scans durch. Während der Aufnahme des Spektrums wird die Messzelle kontinuierlich von Messgas durchflossen, das sich in seiner Zusammensetzung ändert. Das so ermittelte Spektrum ist also eine Art mittleres Spektrum über den Zeitraum der Aufnahme. Spitzenkonzentrationen werden hierdurch tendenziell unterschätzt.

3.3.6 Wärmefreisetzungsrate

Die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate basiert aus den Messwerten der bidirektionalen Sonden, der Mantelthermoelemente und der Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentration im Schlot. Die oben gemachten Anmerkungen diesen Messgeräten gelten hier entsprechend.

Grundsätzlich sorgen die Rauchgasströmung im Prüfstand und das Ansprechverhalten der Gasanalytoren zu einer zeitlichen Verschiebung der Wärmefreisetzungsrate hin zu späteren Zeitpunkten und zu einer Reduzierung von Spitzenwerten.

Durch die Nichtberücksichtigung des Wasserdampfes aus der Verbrennungsreaktion wird die Sauerstoffkonzentration tendenziell überschätzt (Abweichung im Bereich von bspw. 11,1 % bei einer Wasserdampfkonzentration von 10 Vol%, s. o.). Die Wärmefreisetzungsrate wird somit unterschätzt.

Das verzögerte Ansprechen der Mantelthermoelemente auf Temperatursteigerungen führt bei der Berechnung der Gasmassenstroms zu einer Überschätzung der Fluidichte, zu einer Überschätzung des Massenstroms und somit zu einer Überschätzung der Wärmefreisetzungsrate. Bei fallender Temperatur gilt der umgekehrte Zusammenhang.

Bei der Berechnung der Wärmefreisetzungsrate wird die Unvollständigkeit der Verbrennung nicht berücksichtigt. Die Formel geht mit einem Proportionalitätsfaktor von $13,1 \text{ MJ kg}^{-1}$ (freigesetzte Energie pro Kilogramm verbrauchtem Sauerstoff) von vollständiger Verbrennung aus und die Konzentration von Kohlenmonoxid geht nicht in die

Berechnung ein⁷. Somit wird die Wärmefreisetzungsrate vor allem in unterventilierten Brandphasen unterschätzt.

Kalibrierfaktor der bidirektionalen Sonden

Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit an den bidirektionalen Sonden aus der Druckdifferenz wird ein Kalibrierfaktor benötigt (s. a. Anhang H). Der Kalibrierfaktor ist eine Funktion der Reynoldszahl und wird hier als konstant angenommen. Der hierdurch eingeführte relative Fehler liegt im Bereich von 8 %.

Wirksame Öffnungsfläche des Schlots (Strömungsbeiwert)

Die Strömungsgeschwindigkeit im Schlot ist nicht über den gesamten Querschnitt homogen. Da nicht das Geschwindigkeitsprofil im Schlot ermittelt wird, sondern nur an sechs einzelnen Punkten Messwerte erfasst werden, wird dieser Effekt durch den Strömungsbeiwert berücksichtigt.

Der Strömungsbeiwert für den Schlot wurde durch numerische Simulationen ermittelt und mit Abschätzungen und Messungen anderer Wissenschaftler für den selben Prüfstand verglichen (vgl. Anhänge H und I). Die Unsicherheit des Strömungsbeiwerts ist nicht bekannt.

3.3.7 Massenstrom durch die Brandraumöffnung

Temperaturmessung

Die Messung der Fluidtemperatur mit den Mantelthermoelementen in der Brandraumöffnung wird durch Wärmestrahlung beeinflusst (s. o. und Anhang L.3). Dies führt zu einer Unterschätzung des Einstroms in den Brandraum, da die Temperatur der einströmenden Gase überschätzt wird. Dieser Einfluss wird in Kapitel K diskutiert.

Zur Kompensation dieses Effekts kann die Temperatur einströmender Gase als Umgebungstemperatur angenommen werden, anstatt sie aus der Messung zu bestimmen.

⁷An der Messstelle G3, auf deren Werten die Berechnung der Wärmefreisetzungsrate beruht, war kein Messgerät für Kohlenmonoxid vorhanden. Theoretisch ließe sich über die Messstelle G4 (FTIR-Spektrometer Schlot) Kohlenmonoxid in die Betrachtung einbeziehen. Da aber an dieser Messstelle ein anderes Messprinzip eingesetzt wurde, das Messgas nicht getrocknet wurde und die Zuleitungen zum Analysator und somit die Transportzeit different waren, wird diese Messstelle nicht einbezogen.

Kalibrierfaktor der bidirektionalen Sonden

Es gelten die selben Aussagen wie in Abschnitt 3.3.6 Wärmefreisetzungsrate auf Seite 36.

Wirksame Öffnungsfläche der Brandraumöffnung (Strömungsbeiwert)

Der Strömungsbeiwert ist für die Ein- und Ausströmung unterschiedlich und von der Reynoldszahl abhängig. PRAHL und EMMONS [40, S.382] schlagen einen konstanten Wert von 0,68 vor und zeigen, dass der resultierende Fehler innerhalb der üblichen Abweichungen großskaliger Brandversuche liegt.

Für weitere Informationen zum Strömungsbeiwert der Brandraumöffnung s. Anhang K.

3.3.8 Brandbeschleunigernachweis

Um den Brandraum abzukühlen, wurde vor Versuch MFPA_Zimmer_002 am 13. Juni 2012 ein Lüfter mit Verbrennungsmotor (Ottokraftstoff) – positioniert in der hinteren Zugangstür – eingesetzt. Eine Kontamination des Brandraums mit Kraftstoff ist theoretisch möglich. Bei den folgenden Versuchen wurde ein Lüfter mit Elektromotor genutzt.

4 Ergebnisse

4.1 Ereignisübersicht und grundsätzlicher Brandverlauf

Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über den Flashoverzeitpunkt und den Zeitpunkt des Löschbeginns bei allen Versuchen. Der Zeitpunkt *Flashover* stellt den während der Versuchsdurchführung notierten Zeitpunkt dar und wurde nicht anhand von eindeutigen Kriterien, sondern anhand des visuellen Eindrucks festgelegt. In Anhang F werden Kriterien auf Basis von Messwerten miteinander verglichen. Anhand dieser Betrachtung wird im Folgenden immer der visuell beobachtete Flashover zur Definition des Flashoverzeitpunkts herangezogen.

Detaillierte Beobachtungen können Tabelle D.11 im Anhang entnommen werden. In Abbildung 4.1 sind die Zeiträume bis zur Probenahme für alle fünf Versuche dargestellt und in Anhang C.2.4 kann der Brandverlauf anhand von Bildern nachvollzogen werden. Die Zeiträume zwischen dem Aufbringen des Brandbeschleunigers und der Zündung und zwischen dem Löschbeginn und der Probenahme sind bei allen Versuchen vergleichbar (vgl. Abb. 4.1).

Beim Flashoverzeitpunkt zeigt sich deutlich der Einfluss des Brandbeschleunigers. Mit Brandbeschleuniger tritt der Flashover früher ein als ohne.

Bei Versuch MFPA_Zimmer_001 war die Brandentwicklung erwartungsgemäß am lang-

Tabelle 4.1: Ereignisübersicht, Zeitpunkte in Sekunden

Versuch	Brandbeschleuniger	Flashover	Löschbeginn
MFPA_Zimmer_001	–	780	1200
MFPA_Zimmer_002	-60	390	720
MFPA_Zimmer_003	-50	260	1800
MFPA_Zimmer_004	-70	300	1800
MFPA_Zimmer_005	-56	210	240

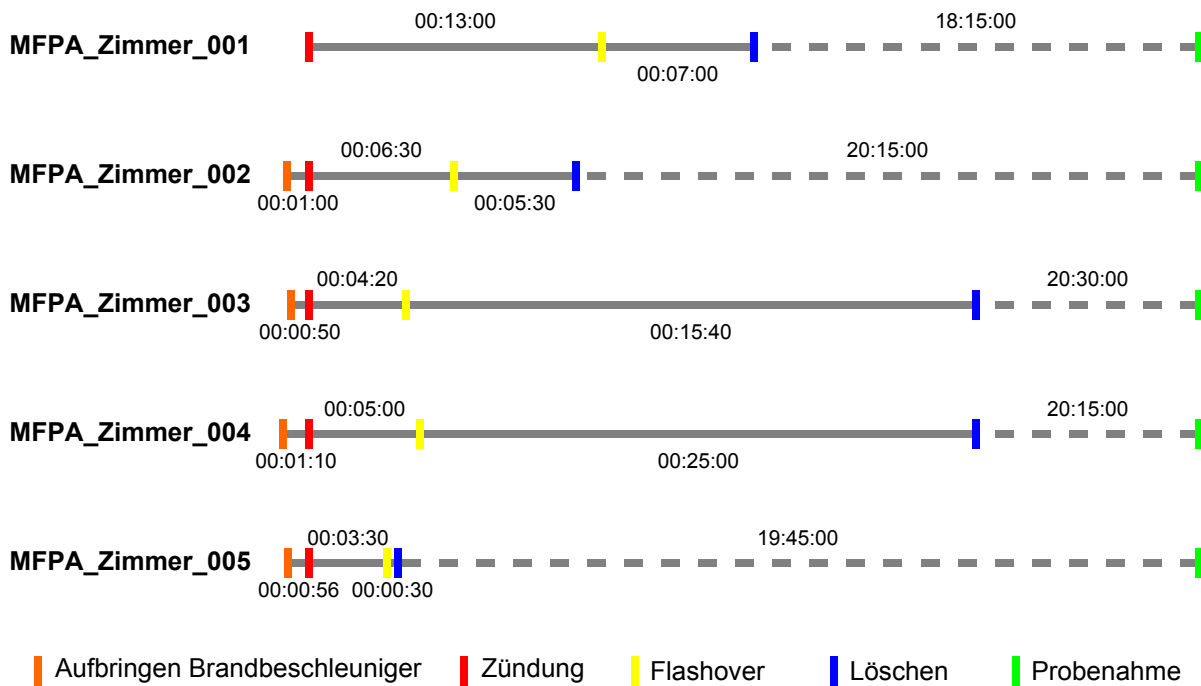


Abbildung 4.1: Ereignisübersicht, Angaben in [Stunden:Minuten:Sekunden]

samsten. Nach der Zündung breitete sich der Brandbereich zuerst auf dem gezündeten Sofa aus und griff nach 350 Sekunden auf das Regal neben dem Sofa über. Bei der Entzündung des Sofas mit Brandbeschleuniger (Versuch MFPA_Zimmer_002) fing bereits nach 75 Sekunden der Polyurethanschaum im Regal Feuer und nach 90 Sekunden war das Regal selbst am Brand beteiligt. Der Flashover wurde nach 780 Sekunden (Versuch MFPA_Zimmer_001) und nach 390 Sekunden (Versuch MFPA_Zimmer_002) erreicht. Zündungen in der Regalecke (Versuche MFPA_Zimmer_003 und MFPA_Zimmer_004) führten schneller zum Flashover als die Zündung an Sofa 1 (Versuch MFPA_Zimmer_002). Bei der Zündung an Sofa 1 und in der Regalecke (Versuch MFPA_Zimmer_005) verging am wenigsten Zeit bis zum Flashover.

Die Versuche lassen sich nach ihrer Brandentwicklungsgeschwindigkeit in folgender Reihenfolge staffeln: Versuch MFPA_Zimmer_005 wies die schnellste Brandentwicklung auf, folgend die Versuche MFPA_Zimmer_003, MFPA_Zimmer_004 und MFPA_Zimmer_002 und die langsamste Brandentwicklung gab es bei Versuch MFPA_Zimmer_001. Diese Staffelung zeigt sich auch in den im Folgenden präsentierten Messergebnissen.

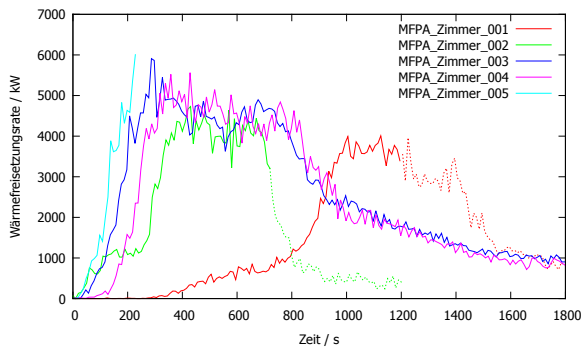


Abbildung 4.2: Wärmefreisetzungsrate, Vergleich der fünf Versuche (ab Löschbeginn gestrichelte Linien)

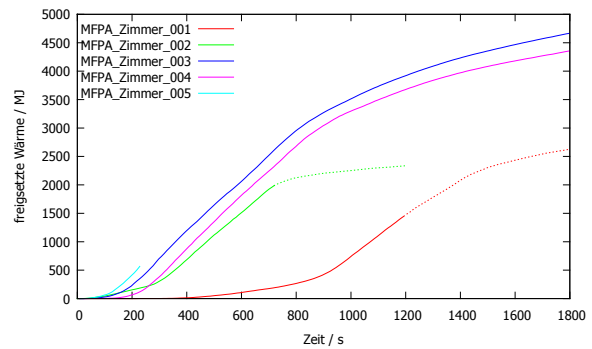


Abbildung 4.3: Freigesetzte Wärme, Vergleich der fünf Versuche (ab Löschbeginn gestrichelte Linien)

4.2 Wärmefreisetzungsrate und freigesetzte Wärme

Der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate ist in Abbildung 4.2 dargestellt, jener der freigesetzten Wärme in Abbildung 4.3. Diagramme für die einzelnen Versuche sind in Abbildung N.1 im Anhang zu finden.

Die beschriebene Staffelung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit zeigt sich auch in der Wärmefreisetzungsrate. Die gemessenen Maximalwerte liegen zwischen 4 MW bei Versuch MFPA_Zimmer_001 und 6 MW bei Versuch MFPA_Zimmer_005. Bei Versuch MFPA_Zimmer_005 wäre bei einem späteren Löschbeginn ein höherer Spitzenwert gemessen worden, da der Versuch vor der vollständigen Ausbildung der Hauptbrandphase abgebrochen wurde. Die langsamere Brandentwicklung bei Zündung an Sofa 1 (Versuche MFPA_Zimmer_001 und MFPA_Zimmer_002) im Vergleich zur Zündung in der Regalecke ist deutlich an einer längeren Brandentwicklungsphase erkennbar. Die Zündung in der Regalecke führt auf Grund der vertikalen Brandausbreitung und der höheren Brandlast in diesem Bereich zu einer wesentlich schnelleren Brandentwicklung.

Der theoretische Maximalwert der freigesetzten Wärme lässt sich aus der Brandlast ermitteln und liegt bei 8416 MJ. Dieser Wert wird nicht überschritten.

4.3 Massenverlustrate und Massenverlust

Die Massenverlustrate und der absolute Massenverlust sind in den Abbildungen 4.4 und 4.5 dargestellt. Ergänzende Abbildungen sind im Anhang zu finden (Masse Abb. N.5, Massenverlustrate Abb. N.6, Massenverlust Abb. N.7).

Grundsätzlich zeigt sich auch in dieser Größe die gleiche Staffelung der Brandentwick-

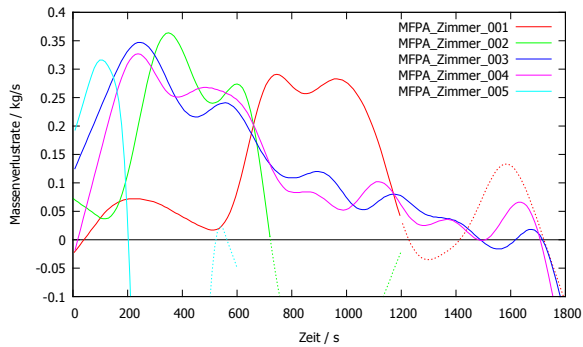


Abbildung 4.4: Massenerlossrate, druckkorrigiert, Vergleich der fünf Versuche (ab Löscheintritt gestrichelte Linien)

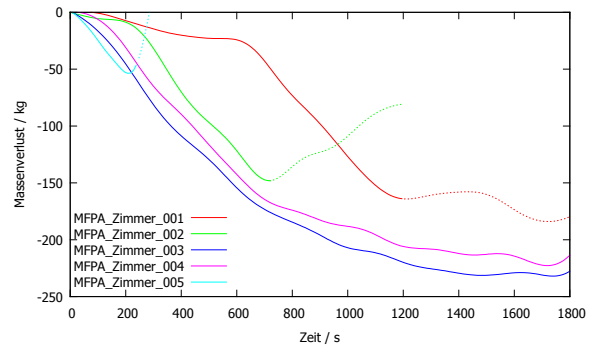


Abbildung 4.5: Absoluter Massenerloss, druckkorrigiert und geglättet, Vergleich der fünf Versuche (ab Löscheintritt gestrichelte Linien)

lungsgeschwindigkeit wie bei den zuvor beschriebenen Größen.

Bei der Massenerlossrate kommen Werte kleiner bzw. größer Null bei Versuchsstart durch das mathematische Berechnungsverfahren zu Stande (vgl. Kapitel 3.2).

Durch die Korrektur des elektrischen Aufzeichnungsfehlers (vgl. Kapitel 3.2) und die im Kapitel 3.3.2 beschriebenen Einflüsse ist die Unsicherheit der Massenaufzeichnung nicht abschätzbar.

Der theoretische maximale Massenerloss beträgt 631 kg und wurde bei keinem Versuch erreicht. Die Kataloge in den Regalen machten den größten Teil der brennbaren Masse aus, waren aber auch die am wenigsten konsumierten brennbaren Gegenstände. Auch die Tischplatte und die Spanplatte in den Sofas war relativ spät am Brand beteiligt und wurde somit bei Versuchen mit einem Löscheintritt früher als 1800 s nicht vollständig konsumiert (vgl. auch Abb. C.54 und C.54 für Versuch MFWA_Zimmer_004 und C.55, C.56 und C.57 für Versuch MFWA_Zimmer_002). Der Massenerloss erscheint relativ gering. Der Vergleich der Wärmefreisetzungsrates mit dem Produkt aus der Massenerlossrate und dem mittleren Heizwert der Brandlast (vgl. Abb. N.3) bzw. der freigesetzten Wärme mit dem Produkt aus dem Massenerloss und dem Heizwert (vgl. Abb. N.4) zeigt, dass der gemessene Massenerloss in realistischen Größenordnungen liegt und durch die sauerstoffkalorimetrische Messung der Wärmefreisetzung bestätigt wird.

4.4 Temperaturen

Der Temperaturverlauf unter der Brandraumdecke ist in Abbildung 4.6 dargestellt¹. Weitere Diagramme zu den gemessenen Temperaturen sind in Anhang N.3 aufgeführt. Die Temperaturverläufe unterscheiden sich in der Entwicklungsgeschwindigkeit. Die in der Vollbrandphase erreichten Maximaltemperaturen liegen innerhalb von 10 K (vgl. Tab. 4.2)². Die Charakteristika der Temperaturverläufe sind bei Betrachtung gleicher Zündorte sehr ähnlich (Versuche MFPA_Zimmer_001 und MFPA_Zimmer_002 mit Zündung am Sofa, Versuche MFPA_Zimmer_003, MFPA_Zimmer_004 und MFPA_Zimmer_005 mit Zündung zumindest in der Regalecke).

Ohne Brandbeschleuniger ist die Brandentwicklung am langsamsten. Zündungen in der Regalecke führen zu einer schnelleren Brandentwicklung als die Zündung an Sofa 1.

Bei Betrachtung der Temperaturverläufe unter der Decke in Abbildung 4.6 scheint die Temperaturentwicklung bei einer Zündung mit Brandbeschleuniger an Sofa 1 (Versuch MFPA_Zimmer_002) schneller zu verlaufen als bei Zündung mit Brandbeschleuniger in der Regalecke (Versuch MFPA_Zimmer_003 und MFPA_Zimmer_004). Hierbei ist jedoch der Ausfall der Thermoelements an der Messstelle T7.6 in der Regalecke zu berücksichtigen, auf Grund dessen die Temperatur in der Regalecke unter der Decke nicht gemessen wurde. Somit wird die Temperatur unter der Decke potentiell unterschätzt, was sich besonders bei den Versuchen mit Zündung in der Regalecke auswirkt und bei einem Vergleich der Zündorte in der Entwicklungsphase des Brandes berücksichtigt werden muss.

Die hier gemessenen (Maximal-)Werte sind mit Daten anderer Autoren vergleichbar (Wilk [2], Knaust [41, S.91], Fang [42, S.92]).

4.5 Einfallende Strahlungswärmestromdichte, Gesamtwärmestromdichte und adiabate Oberflächentemperatur

Durch Einsturz von Regalen, Tapetenelementen, der Tische oder Sofarückenlehnen kann es zu wesentlichen Lageveränderungen einzelner Plattenthermometer oder zur Abde-

¹Da das Thermoelement an der obersten Messstelle in der Regalecke (T7.6) ausgefallen war, wurde in diese Betrachtungen die Messstelle T7.5 einbezogen.

²Versuch MFPA_Zimmer_005 wird bei dieser Aussage auf Grund der kurzen Versuchsdauer und somit der kurzen Vollbrandphase nicht berücksichtigt. Es ist davon auszugehen, dass bei diesem Versuch höhere Temperaturen erreicht worden wären, wenn später gelöscht worden wäre.

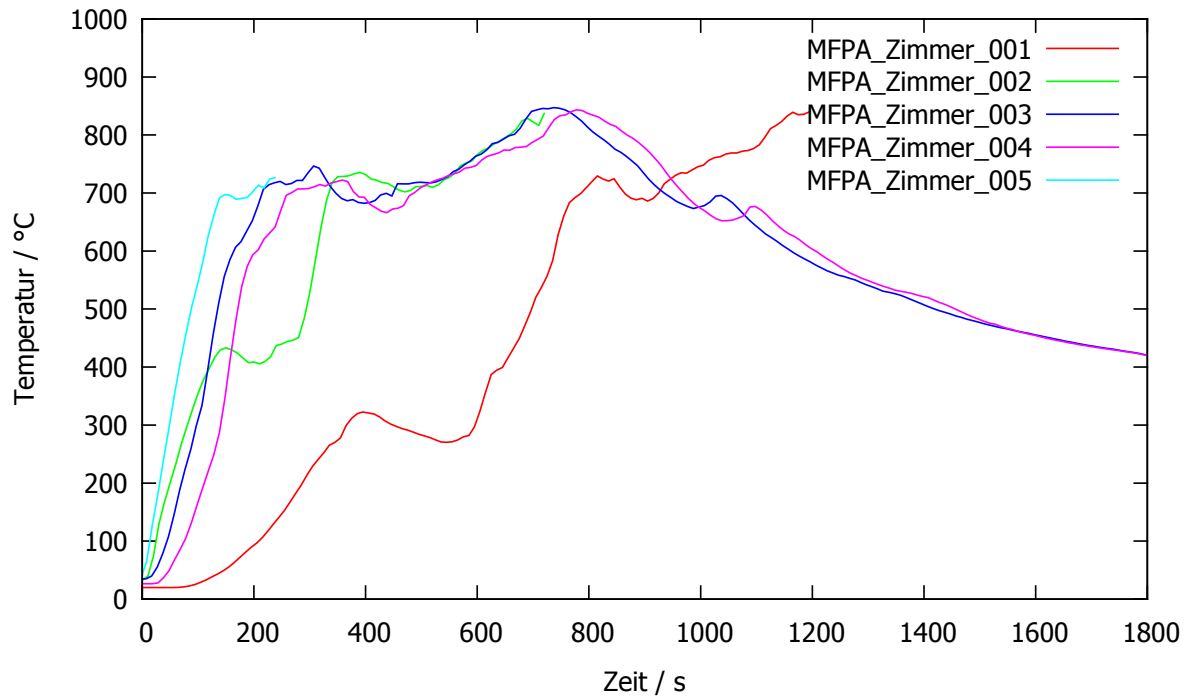


Abbildung 4.6: Temperaturverlauf unter der Brandraumdecke (Mittelwerte aus den Messstellen T3.22, T4.6, T5.6, T6.6 und T7.5, Darstellung bis Löschbeginn)

Tabelle 4.2: Maximaltemperatur unter der Brandraumdecke (Mittelwerte aus den Messstellen T3.22, T4.6, T5.6, T6.6 und T7.5)

Versuch	Temperatur in °C
MFPA_Zimmer_001	843
MFPA_Zimmer_002	837
MFPA_Zimmer_003	847
MFPA_Zimmer_004	843
MFPA_Zimmer_005	726

ckung der Plattenthermometer durch Brandschutt kommen. Dies muss bei der Interpretation der Messwerte berücksichtigt werden. Aus den Videos, den Notizen zur Versuchsdurchführung, den Fotos während und nach der Versuchsdurchführung und den Temperaturverläufen der Plattenthermometer wurden Zeitpunkte definiert, bis zu denen die aufgezeichneten Messwerte der einzelnen Plattenthermometer gültig sind. Diese können Tabelle D.10 im Anhang entnommen werden. Im folgenden werden die auf Basis der Plattenthermometer berechneten Größen bis zu diesen Zeitpunkten, längstens jedoch bis zum Löschbeginn, dargestellt.

In Abbildung 4.7 ist die einfallende Strahlungswärmestromdichte vergleichend für alle Versuche an vier Messstellen, die gar nicht oder wenig durch Brandschutt beeinflusst wurden, dargestellt. Die Werte für alle Messstellen sind in Anhang N.4 aufgeführt.

Vor allem bei den Versuchen MFPA_Zimmer_003 bis MFPA_Zimmer_005, die alle mindestens in der Regalecke gezündet wurden, sind Spitzenwerte sowohl in der Brandentwicklungsphase als auch in der Vollbrandphase gut reproduzierbar. Die Staffelung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit dieser drei Versuche ist analog der beobachteten Flahoverzeitpunkte (MFPA_Zimmer_005 am schnellsten, MFPA_Zimmer_004 am langsamsten). Die erreichten Spitzenwerte liegen in der Vollbrandphase je nach Messstelle zwischen etwa 50 kW m^{-2} und 150 kW m^{-2} .

Da die Gesamtwärmestromdichte und die adiabate Oberflächentemperatur primär für den Vergleich mit numerischen Simulationen relevant sind, findet hier keine weitere Betrachtung statt. Die Diagramme mit den Ergebnisse sind in Anhang N.4.2 (Gesamtwärmestromdichte) und N.4.3 (adiabate Oberflächentemperatur) zu finden.

4.6 Gasspezieskonzentrationen

Der Verlauf der Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid ist in den Abbildungen 4.8, 4.9 und 4.10 dargestellt. Diagramme zu den Konzentrationsverläufen der anderen gemessenen Gase – soweit sie nachgewiesen wurden – sind in Anhang N.7 aufgeführt³.

Die Sauerstoff-, Kohlenmonoxid und Kohlendioxidkonzentration erreichen in der Vollbrandphase bei allen Versuchen Minimal- bzw. Maximalkonzentrationen in vergleichbarer Größenordnung. Einzig an der Messstelle G1 (in 70 cm über Sofa 2) ist der Un-

³Folgende Spezies konnten gar nicht nachgewiesen werden: Chlorwasserstoff (HCl), Bromwasserstoff (HBr), Fluorwasserstoff (HF), Cetan, Kohlenoxidsulfid (COS).

Formaldehyd (CH₂O) konnte an den Messstellen G4 und G5 und Schwefeldioxid (SO₂) konnte an der Messstelle G1 nicht nachgewiesen werden.

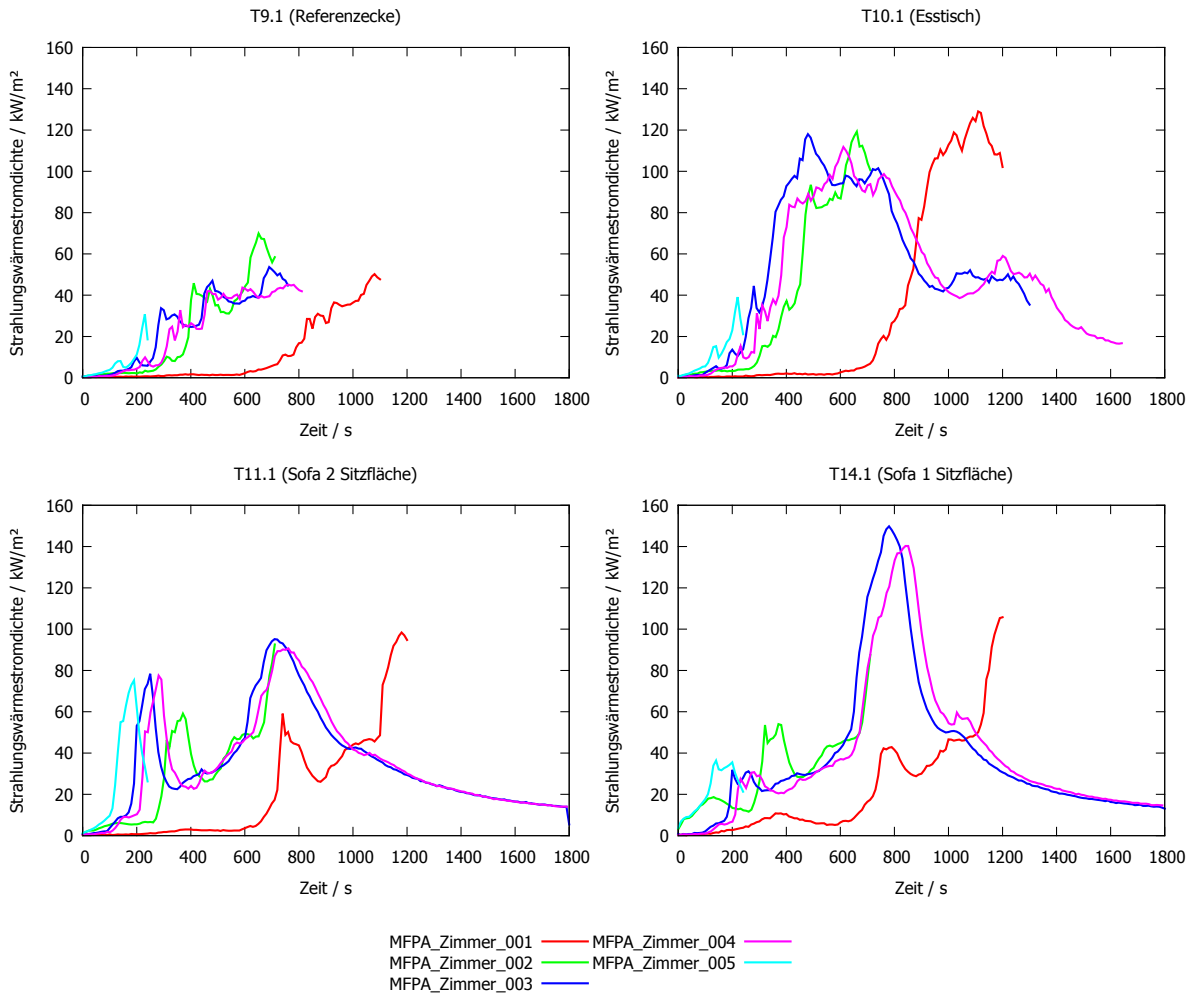


Abbildung 4.7: Einfallende Strahlungswärmestromdichte: Vergleich der Versuche für ausgesuchte Messstellen

terschied zwischen den Versuchen, die an Sofa 1 gezündet wurden (MFPA_Zimmer_001 und MFPA_Zimmer_002) und denjenigen, die in der Regalecke gezündet wurden (MFPA_Zimmer_003, MFPA_Zimmer_004 und MFPA_Zimmer_005), an den erreichten Minimal- bzw. Maximalkonzentrationen erkennbar. Der Konzentrationsverlauf bis zur Vollbrandphase zeigt den zuvor bei den anderen Größen beschriebenen, beschleunigenden Einfluss des Brandbeschleunigers auf den Brandverlauf.

Die Kohlendioxidkonzentration wurde im Brandraum (Messstelle G1) und im Schlot Messstellen (G3 und G4) mit zwei Systemen (Infrarotsensor und FTIR-Spektrometer) gemessen. Die Konzentrationsverläufe sind zwischen den beiden Systemen vergleichbar, die gemessenen Werte weichen jedoch teilweise erheblich voneinander ab.

4.7 Neutrale Ebene

Die Lage der neutralen Ebene ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Es zeigt sich die zuvor beschriebene Staffelung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit. In der Vollbrandphase liegt die neutrale Ebene bei allen Versuchen zwischen 90 ± 10 cm.

In der visuellen Beschreibung des Brandverlaufs (vgl. Tab. D.11) wird die Höhe der Rauchsicht mit wesentlich niedrigeren Werten (u. a. 30 cm bis 50 cm) angegeben. Dies liegt einerseits in der Unsicherheit visueller Abschätzungen der Höhe und andererseits in dem Bezugspunkt (Beobachtung Höhe der Rauchsicht im Brandraum und Messung der Lage der neutralen Ebene in der Brandraumöffnung) begründet.

4.8 Massenstrom durch die Öffnung

Der Gesamtmassenstrom durch die Brandraumöffnung ist in Abbildung 4.12 und die einzelnen Massenteilströme in Abbildung N.40 dargestellt.

Beim Vergleich des kumulierten Massenstroms mit dem Massenverlust zeigt sich, dass der kumulierte Massenstrom teilweise die Gesamtmasse brennbarer Gegenstände übersteigt (vgl. Abb. N.41 im Anhang). Dies ist nicht möglich und muss in einem Mess- oder Berechnungsfehler begründet liegen⁴.

⁴Koched et. al. haben nach der Durchführung der Berechnungen für diesen Bericht ihre Arbeit zum Strömungsbeiwert von Türöffnungen veröffentlicht [43] und geben wesentlich niedrigere Werte, als der hier angenommenen Wert von 0,68, an.

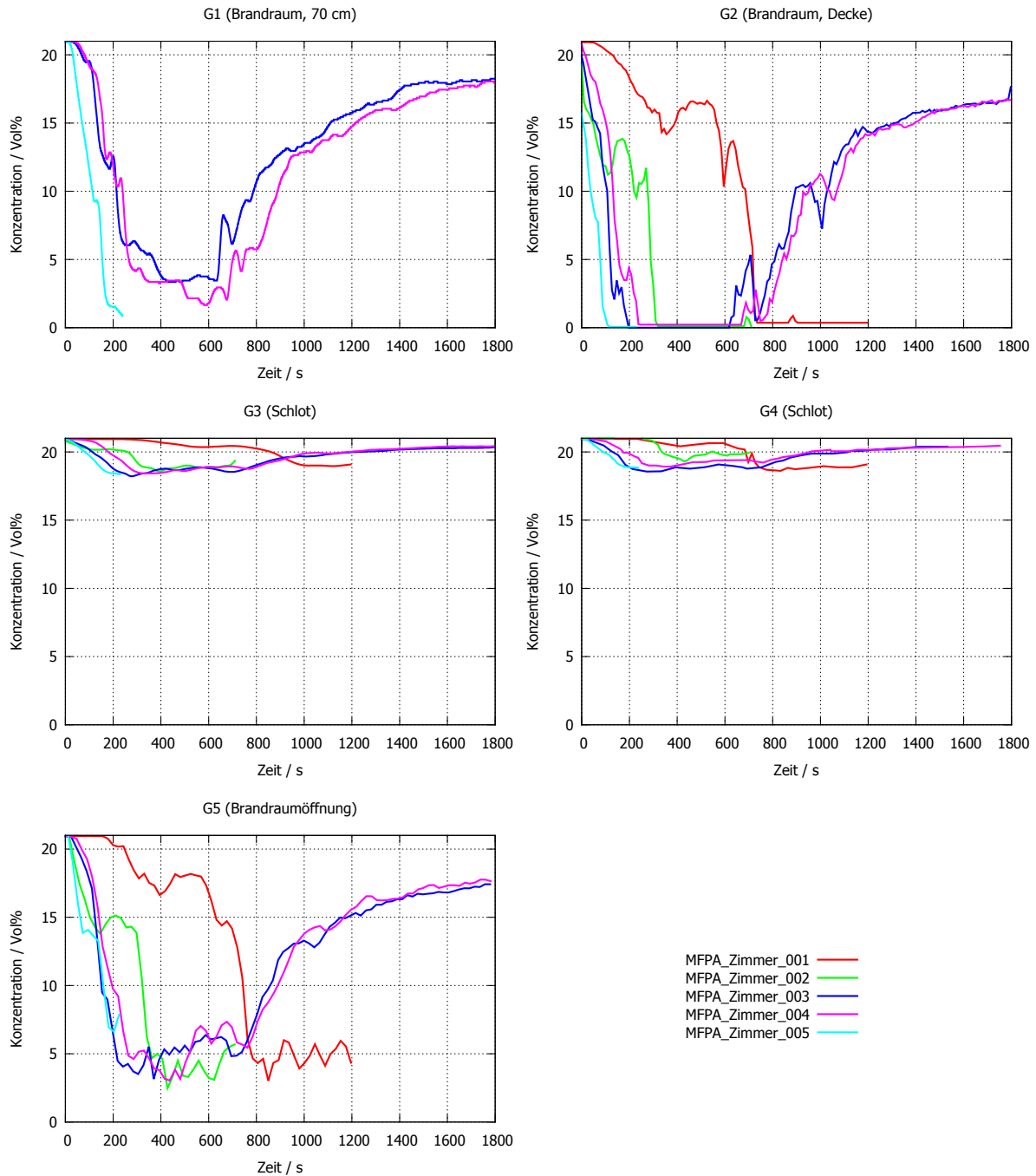


Abbildung 4.8: Konzentrationsverlauf Sauerstoff (O₂), Vergleich der Messstellen, Werte auf Basis getrocknetem Messgas, Darstellung bis Löschbeginn (bei den Versuchen MFPA_Zimmer_001 und MFPA_Zimmer_002 ist die Aufzeichnung an der Messstelle G1 fehlgeschlagen, vgl. Anhang E)

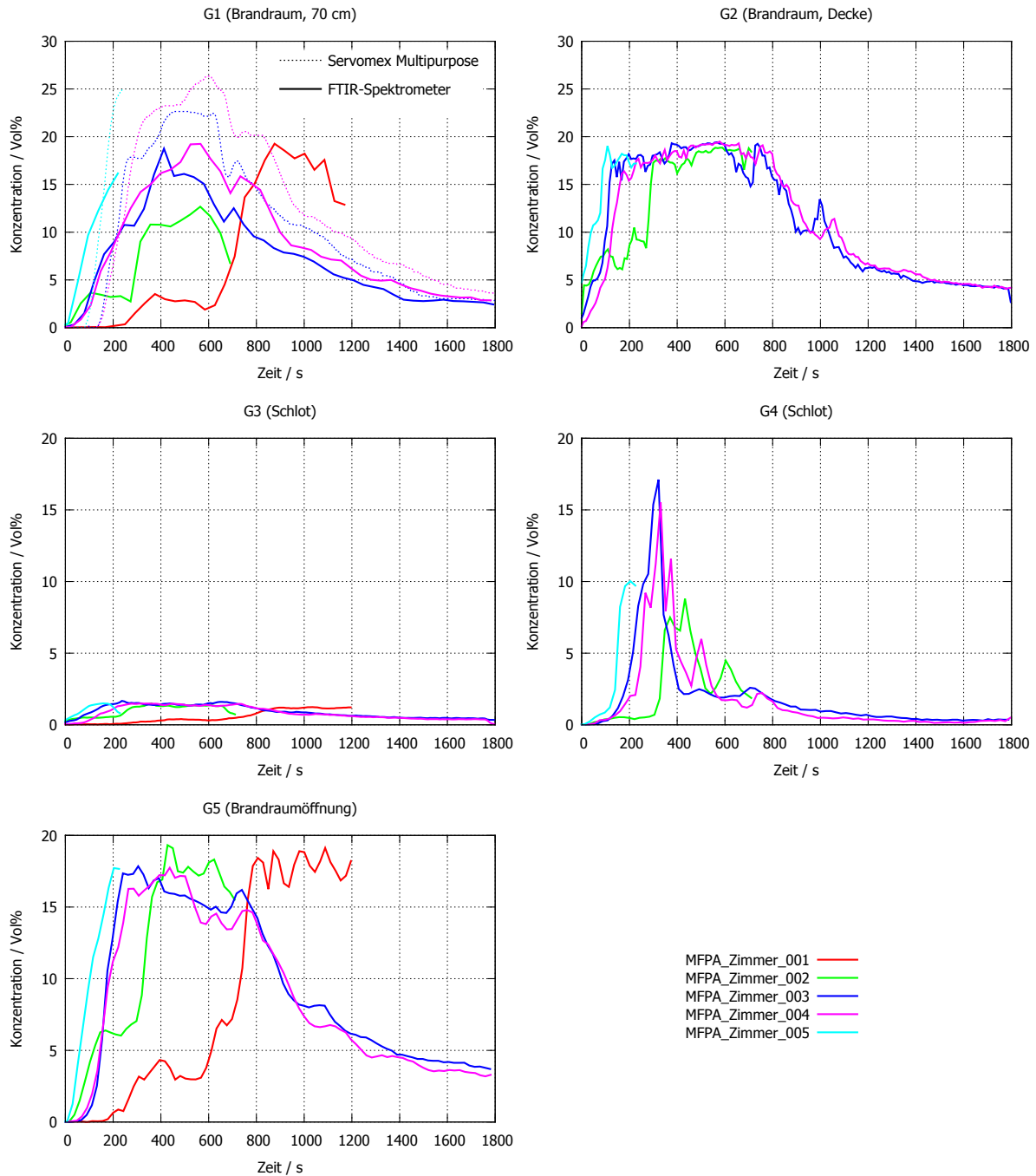


Abbildung 4.9: Konzentrationsverlauf Kohlendioxid (CO₂), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn (bei den Versuchen MFPA_Zimmer_001 und MFPA_Zimmer_002 ist die Aufzeichnung an der Messstelle G1 und bei Versuch MFPA_Zimmer_001 an den Messstellen G2 und G4 fehlgeschlagen, vgl. Anhang E)

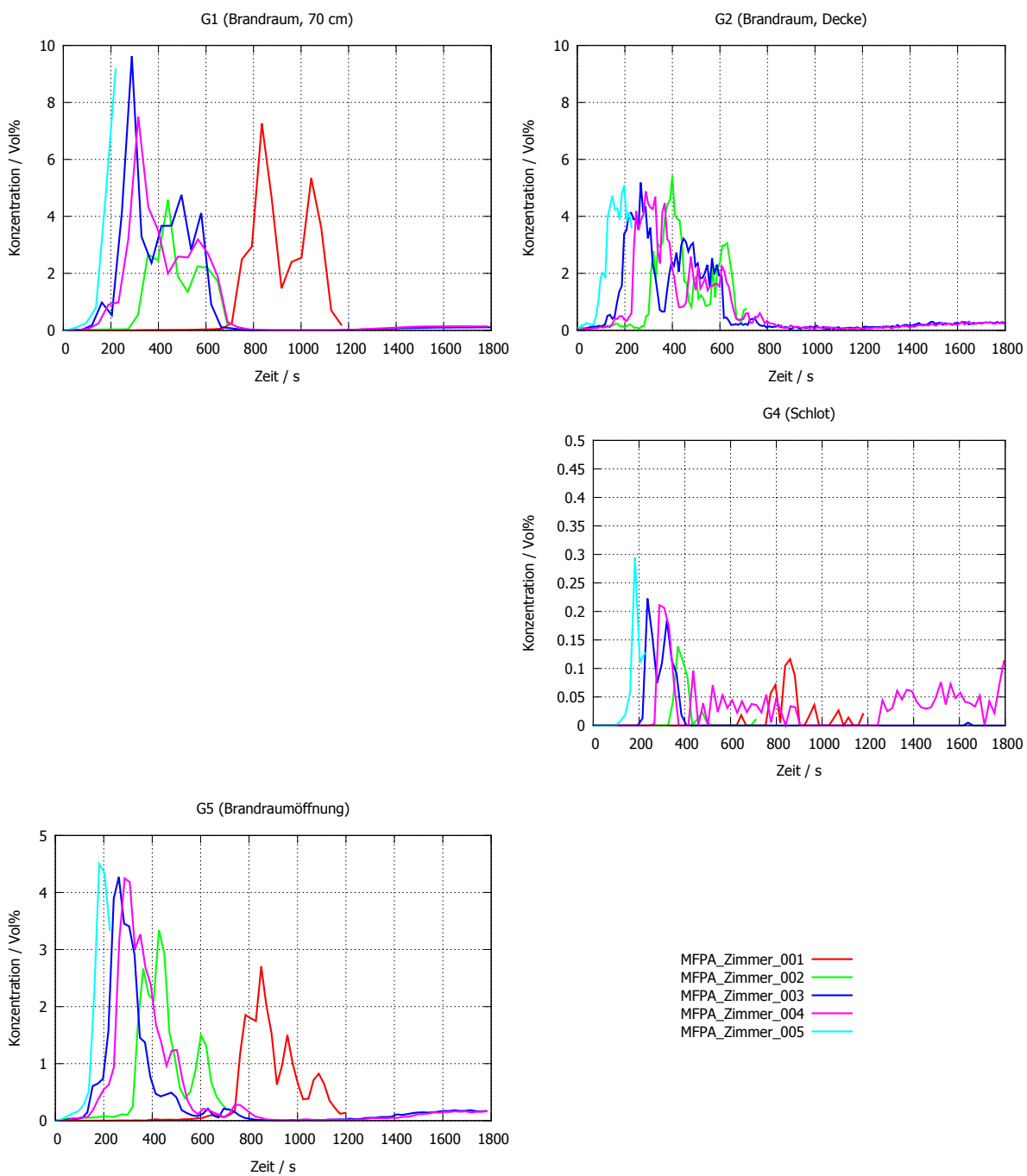


Abbildung 4.10: Konzentrationsverlauf Kohlenmonoxid (CO), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn (bei Versuch MFPA_Zimmer_001 ist an der Messstelle G2 die Aufzeichnung fehlgeschlagen, vgl. Anhang E)

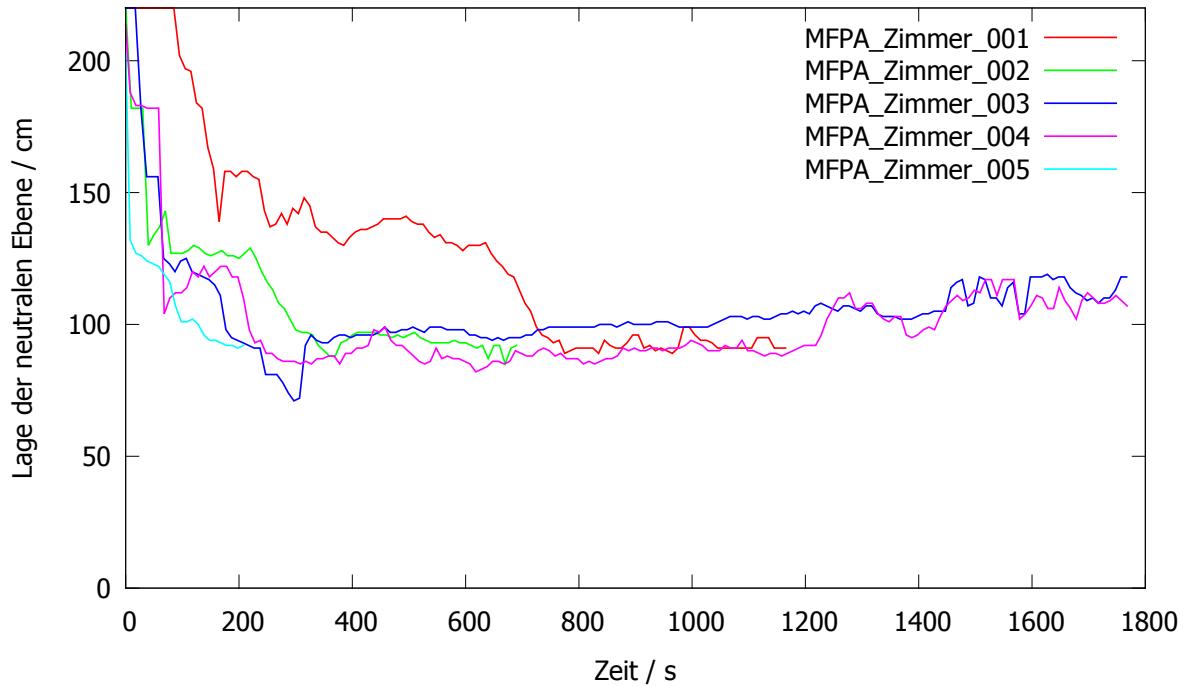


Abbildung 4.11: Lage der neutralen Ebene (Angabe ab Fußbodenniveau, Darstellung bis Löschbeginn)

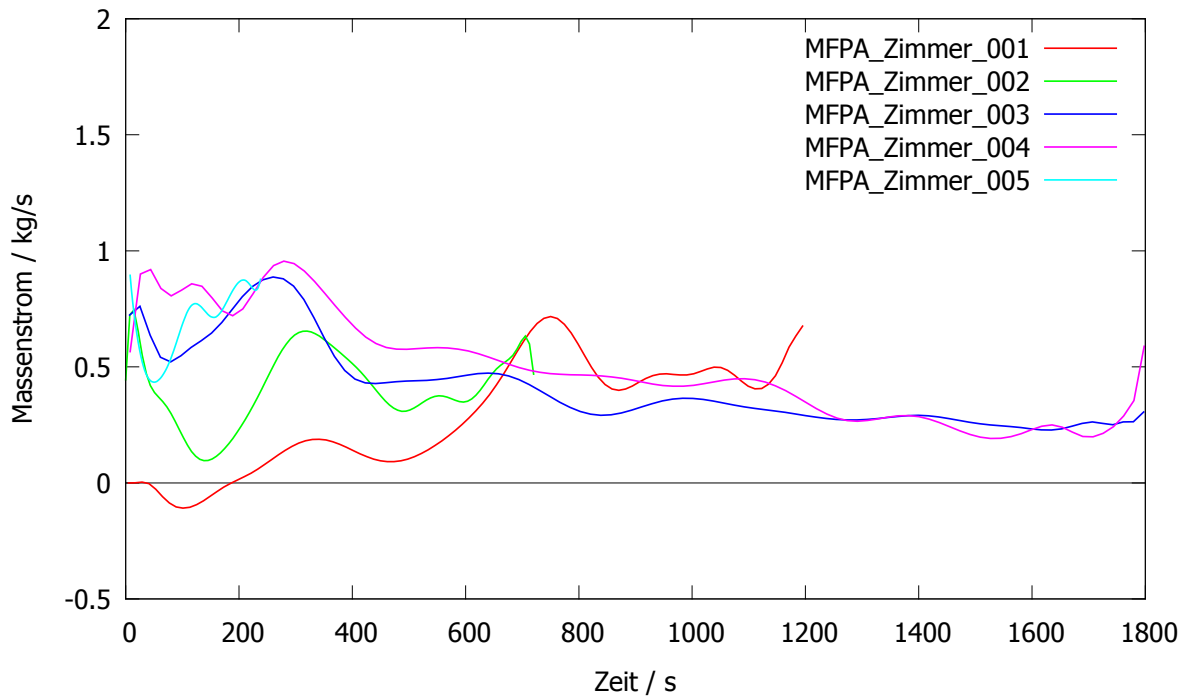


Abbildung 4.12: Gesamtmassenstrom durch die Brandraumöffnung als Differenz aus Ausstrom und Einstrom (Werte mit Bezierkurven geglättet)

4.9 Spanplattenprobekörper

Die gemessenen Temperaturen innerhalb der Spanplatten, die einfallende Strahlungswärmestromdichte auf die Spanplatte, der Gesamtwärmestrom auf die Spanplatte und die adiabate Oberflächentemperatur, die an den Spanplattenprobekörpern ermittelt wurden, werden primär als Vergleichsgrößen mit numerischen Simulationen benötigt. Sie werden deswegen in diesem Bericht nicht gesondert betrachtet.

Der Vollständigkeit halber sind die genannten Größen in Anhang N.6 (Abb. N.42 und N.43) dargestellt.

Der Spanplattenprobekörper im Raum (Regalecke) wurde in der Entwicklungsphase des Brandes durch einstürzende Teile der Regale verschüttet. Es liegen somit nur für einen kurzen Zeitraum Daten vor.

4.10 Vergleichsgegenstände

Auf Grund der langen Branddauer wurden alle Vergleichsgegenstände bei den Versuchen MFPA_Zimmer_001 bis MFPA_Zimmer_004 fast vollständig zerstört.

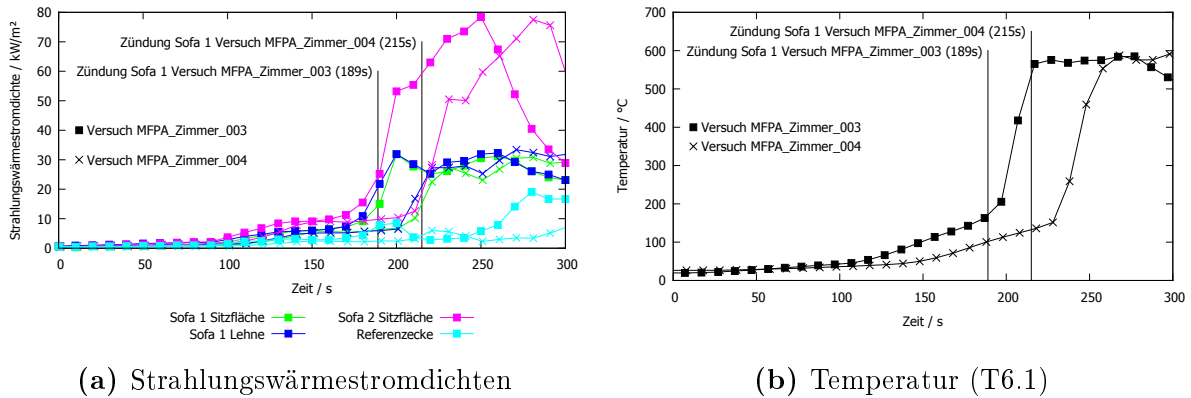
Einzig bei Versuch MFPA_Zimmer_005 sind die Vergleichsgegenstände als größere Brandrückstände erhalten.

Abbildungen der Vergleichsgegenstände sind in Abbildung 2.8 (vor dem Versuch) und in Anhang C.2.6 (nach dem Versuch) zu finden. Eine weitere Auswertung der Vergleichsgegenstände findet vorerst nicht statt.

4.11 Diskussion

Einfluss von Brandbeschleunigern auf den Brandverlauf

Die Zündung eines Raumbrands mit Brandbeschleunigern führt in dem vorgestellten Versuchsaufbau zu einer beschleunigten Brandentwicklung im Vergleich zu einer Zündung ohne Brandbeschleuniger. Dies lässt sich sowohl anhand der visuellen Beobachtungen als auch an gemessenen und berechneten Größen wie Temperaturen im Brandraum und der Wärmefreisetzungsrate belegen. Die Maximalwerte werden also in ihrem zeitlichen Eintreten, nicht aber in ihrer Quantität, beeinflusst. So weisen vor allem die Temperatur unter der Brandraumdecke und einfallende Strahlungswärmestromdichten in ihren Maximalwerten zwischen den fünf Versuchen nur geringe Differenzen auf. Der beschleunigende Einfluss von Brandbeschleunigern auf die Brandentwicklungsgeschwindigkeit ist



(a) Strahlungswärmestromdichten

(b) Temperatur (T6.1)

Abbildung 4.13: Vergleich der einfallenden Strahlungswärmestromdichten an versch. Positionen und der Temperatur über der Sitzfläche von Sofa 1 zwischen den Versuchen MFPA_Zimmer_003 und MFPA_Zimmer_004

erheblich. So kam es beim zweiten Versuch 390 Sekunden früher zum Flashover als bei Versuch eins, der ohne Brandbeschleuniger am gleichen Sofa gezündet wurde.

Einfluss des Zündorts auf den Brandverlauf

Bei Zündung in der Regalecke entwickelte sich der Brand grundsätzlich schneller als bei der Zündung an Sofa 1, sowohl mit als auch ohne Brandbeschleuniger. Gründe hierfür sind die höhere Brandlastdichte in der Regalecke und die vertikale Brandausbreitung am Regal. Die Zündung in der Regalecke und an Sofa 1 führte zum schnellsten Brandverlauf.

Einfluss ungezündeter Brandbeschleunigerlachen

Bei den Versuchen MFPA_Zimmer_003 und MFPA_Zimmer_004 fand die Zündung mit Brandbeschleuniger in der Regalecke statt. Bei Versuch MFPA_Zimmer_004 war jedoch zusätzlich Brandbeschleuniger auf Sofa 1 ausgebracht, der initial nicht gezündet wurde. Der Flashover trat bei Versuch MFPA_Zimmer_004 40s später auf. Die Zündung von Sofa 1 wurde bei Versuch MFPA_Zimmer_003 26s vor der Zündung bei Versuch MFPA_Zimmer_004 beobachtet.

Ein beschleunigender oder verzögernder Einfluss der ungezündeten Brandbeschleunigerlache auf die Zündung von Sofa 1 und somit auf den Brandverlauf könnte nur festgestellt werden, wenn bis zur Zündung der Brandverlauf vergleichbar wäre. Sowohl die Strahlungswärmestromdichten als auch die Temperatur über Sofa 1 waren bei Versuch MFPA_Zimmer_003 jedoch systematisch höher als beim Versuch MFPA_Zimmer_004 (s. Abb. 4.13). Die Unterschiede in den Zündzeitpunkten von Sofa 1 und in den Flasho-

zeitpunkten sind somit auf die Unsicherheit des Brandverlaufs zurückzuführen. Ein Einfluss der ungezündeten Brandbeschleunigerlache ist nicht identifizierbar.

Literaturverzeichnis

- [1] WILK, Erhardt ; KOTTHOFF, Ingolf: Der Brand in Räumen – Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit rechnerischen Lösungen. In: *vfdb-Zeitschrift* 61 (2012), Mai, Nr. 2, S. 87–89
- [2] WILK, Erhardt ; KOTTHOFF, Ingolf: Der Brand in Räumen – Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren – Teil 1. In: *vfdb-Zeitschrift* 61 (2012), November, Nr. 4, S. 172–187
- [3] LLOYD, Julie A. ; EDMISTON, Paul L.: Preferential extraction of hydrocarbons from fire debris samples by solid phase microextraction. In: *Journal of Forensic Sciences* 48 (2003), Januar, Nr. 1, S. 130 – 134. – ISSN 0022-1198
- [4] REN, QL. ; BERTSCH, W.: A comprehensive sample preparation scheme for accelerants in suspect arson cases. In: *Journal of Forensic Sciences* 44 (1999), Mai, Nr. 3, S. 504 – 515. – ISSN 0022-1198
- [5] BORUSIEWICZ, R. ; ZIEBA-PALUS, J. ; ZADORA, G.: The influence of the type of accelerant, type of burned material, time of burning and availability of air on the possibility of detection of accelerants traces. In: *Forensic science international* 160 (2006), S. 115 – 126
- [6] AHMAD, Umi K. ; VOON, Chin K.: Detection of Accelerants in Fire Debris using Headspace Solid Phase Microextraction-Capillary Gas Chromatography. In: *Malaysian Journal of Analytical Sciences* 7 (2001), Nr. 1, S. 57 – 63. – URL http://pkukmweb.ukm.my/~mjas/v7_n1/10-umiKahmad.pdf
- [7] WOLFE, Andrew J. ; MEALY, Christopher L. ; GOTTUK, Daniel T.: Fire Dynamics and Forensic Analysis of Limited Ventilation Compartment Fires Volume 1: Experimental / Hughes Associates, Inc. Baltimore, MD, USA, Oktober 2009. – Forschungsbericht. – URL <http://www.ncjrs.gov/App/Publications/abstract.aspx?ID=252196>. NIJ Award Number: 2007-DN-BX-K240, NCJ 230164

- [8] HOPKINS, Ronald L. ; GORBETT, Gregory ; KENNEDY, Patrick M.: Fire Pattern Persistence and Predictability in Pre and Post Flashover Compartment Fires. In: *Proceedings of the International Symposium on Fire Investigation Science and Technology*. Sarasota, FL, USA, 2008. – URL <http://tracefireandsafety.com/FireInvestigationResearch/ISFIPatternPersistence-F1-08.pdf>
- [9] PURTORI, Anthony D. ; MCELROY, J.: Full-Scale House Experiment for InterFIRE VR May 6, 1998 / National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, MD, USA, November 1999. – Forschungsbericht. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire00/art136.html>. Report of Test FR 4009
- [10] PURTORI, Anthony D.: Full Scale Room Burn Pattern Study / National Institute of Justice. Washington, DC, USA, Dezember 1997. – Forschungsbericht. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire98/art072.html>. National Institute of Justice (NIJ) Report 601-97
- [11] REIN, Guillermo ; EMPIS, C. A. ; CARVEL, R.: The Dalmarnock Fire Tests: Experiments and Modelling / University of Edinburgh. Edinburgh, 2007. – Forschungsbericht. – URL <http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/1152>
- [12] LOCK, Andrew ; BUNDY, Matthew ; JOHANSSON, Erik L. ; HAMINS, Anthony ; KO, Gwon H. ; HWANG, Cheolhong ; FUSS, Paul ; HARRIS, Richard: Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Distribution and Vent Size on Full-Scale Underventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room / National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, MD, USA, October 2008. – Forschungsbericht. NIST Technical Note 1603
- [13] BABRAUSKAS, Vytenis: Upholstered Furniture Room Fires – Measurements, Comparison With Furniture Calorimeter Data, and Flashover Predictions. In: *Journal of Fire Sciences* 2 (1984), Nr. 1, S. 5–19. – URL <http://jfs.sagepub.com/content/2/1/5.abstract>
- [14] BABRAUSKAS, Vytenis: Full-scale burning behavior of upholstered chairs / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1979. – Forschungsbericht. TN 1103
- [15] BABRAUSKAS, Vytenis ; WETTERLUND, Ingrid: Optimising foil thickness for cone calorimeter tests of furniture composites. In: *Fire Safety Journal* 22 (1994),

- Nr. 4, S. 417 – 422. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V37-482B2M7-27/2/3e7bc5ff65bd0933a58bd07c15323e30>. – ISSN 0379-7112
- [16] BABRAUSKAS, V. ; WETTERLUND, I.: Testing of furniture composites in the Cone Calorimeter: A new specimen preparation method and round robin results. In: *Fire Safety Journal* 30 (1998), Nr. 2, S. 179 – 194. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V37-3T4DB8G-4/2/50487ba54018120cec63e67cbab23733>. – ISSN 0379-7112
- [17] ISO 5660-1: *Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Heat release rate (cone calorimeter method)*. 2002
- [18] DIN EN 13823: *Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen*. 2010
- [19] DIN EN 1991-1-2/NA: *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Dezember 2010
- [20] PARKINSON, David L. (Hrsg.) ; KODUR, Venkatesh (Hrsg.) ; SULLIVAN, Paul D. (Hrsg.): *Performance based design of structural steel for fire conditions: A calculation methodology*. Reston , VA, USA : ASCE American Society of Civil Engineers, 2009. – URL <http://books.google.de/books?id=LkWvTKqv76gC>. – Manual of Practice No. 114
- [21] GEIGER, Andreas: *Ermittlung der aus der Sicht des Brandschutzes relevanten stoffspezifischen und toxischen Eigenschaften von Stoffen und Materialien, die bei der Herstellung von Wohnraummöbeln Verwendung finden, sowie Berechnung der Brandlast von Wohnungen verschiedener Wohnungstypen mit durchschnittlichem Ausstattungsgrad*. Heyrothsberge, Fachschule des Ministeriums des Innern „Herrmann Matern“ Heyrothsberge, Abschlussarbeit, 1982. – Lehrgang 20/1
- [22] Brandrisikobewertung Berechnungsverfahren / SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Zürich, Schweiz, 1984. – Forschungsbericht. SIA-Dokumentation 81
- [23] BUKOWSKI, Richard W.: Determining Design Fires for Design-level and Extreme Events. In: EVANS, D. D. (Hrsg.) ; GORDON, J. (Hrsg.) ; HASEMI, Y. (Hrsg.) ;

- SEKIZAWA, A. (Hrsg.): *Proceedings of the SFPE 6th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods*. Tokyo, Japan, Juni 2006, S. 1–11. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire06/art014.html>
- [24] DINENNO, Philip. J. (Hrsg.) ; DRYSDALE, Dougal (Hrsg.) ; BEYLER, Craig L. (Hrsg.) ; WALTON, W. D. (Hrsg.) ; CUSTER, Richard L. P. (Hrsg.) ; HALL, John R. (Hrsg.) ; WATTS, John M. (Hrsg.): *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3. Boston, Quincy, MA, USA : Society of Fire Protection Engineers, National Fire Protection Association, Juni 2002. – ISBN 0-87765-354-2
- [25] MCCAFFREY, B.J. ; HESKESTAD, G.: A robust bidirectional low-velocity probe for flame and fire application. In: *Combustion and Flame* 26 (1976), S. 125–127. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010218076900626>. – ISSN 0010-2180
- [26] KRAUL, Alexander: *Experimentell Untersuchungen zur Kalibrierung bidirektionaler Sonden*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Hochschule Magdeburg Stendal, Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt, Bachelorarbeit, 2009
- [27] HOFMANN, Anja ; KNAUST, Christian ; KRÜGER, Simone ; RASPE, Tina ; DEUBEL, Jan H.: Assessment of Development Time of a Smouldering Fire at a Crime Scene – Experimental and Numerical Investigations. In: *Fire and Materials 2011 – 12th International Conference*. San Francisco, CA, USA : Interscience Communications Ltd, Januar 2011, S. 791 – 802
- [28] National Fire Protection Association (NFPA) (Veranst.): *NFPA 921: Guide for fire and Explosion Investigations*. 2008
- [29] ROBERTS, Kelly ; ALMOND, Matthew J. ; BOND, John W.: Using Paint to Investigate Fires: An ATR-IR Study of the Degradation of Paint Samples Upon Heating. In: *Journal of Forensic Sciences* (2012). – URL <http://dx.doi.org/10.1111/1556-4029.12049>. – ISSN 1556-4029
- [30] ISO 19706: *Guidelines for assessing the fire threat to people*. 2007
- [31] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VDI (Hrsg.) ; GESELLSCHAFT VERFAHRENS-TECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN (GVC) (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. 10. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2006

- [32] SAVITZKY, Abraham ; GOLAY, M. J. E.: Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. In: *Analytical Chemistry* 36 (1964), Nr. 8, S. 1627 – 1639. – URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60214a047>
- [33] GORRY, Peter A.: General least-squares smoothing and differentiation by the convolution (Savitzky-Golay) method. In: *Analytical Chemistry* 62 (1990), Nr. 6, S. 570 – 573. – URL <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac00205a007>
- [34] QUINTIERE, James G.: *Principles of Fire Behavior*. 1. Delmar Cengage Learning, 1998
- [35] SCHNEIDER, Ulrich ; BARTZ, Wilfried J. (Hrsg.) ; WIPPLER, Elmar (Hrsg.): *Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz*. 4. Renningen : expert verlag, 2001
- [36] DENISSE, Bastien: Development of the cdPT – a new Plate Thermometer design / SP Research Institute of Sweden. Borås, Schweden, 2011. – Praktikumsbericht. Supervisor: Ulf Wickström
- [37] MIKKOLA, Esko: SAFIR Project – Fire gas Analysis using FTIR Technique. In: *Flame Retardants 1998 Proceedings*, 1998, S. 15–19
- [38] HAKKARAINEN, Tuula (Hrsg.): Smoke gas analysis by Fourier transform infrared spectroscopy – The SAFIR project / VTT Technical Research Centre of Finland. Espoo, Finnland, 1999. – Forschungsbericht
- [39] HAKKARAINEN, Tuula ; MIKKOLA, Esko ; LAPERRE, Jan ; GENSOUS, Francis ; FARDELL, Peter ; TALLEC, Yannick L. ; BAIOCCHI, Claudio ; PAUL, Keith ; SIMONSON, Margaret ; DELEU, Caroline ; METCALFE, Edwin: Smoke gas analysis by Fourier transform infrared spectroscopy – summary of the SAFIR project results. In: *Fire and Materials* 24 (2000), Nr. 2, S. 101 – 112
- [40] PRAHL, J. ; EMMONS, H.W.: Fire induced flow through an opening. In: *Combustion and Flame* 25 (1975), S. 369–385. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010218075901091>. – ISSN 0010-2180
- [41] KNAUST, Christian: *Modellierung von Brandszenarien in Gebäuden*. Berlin, Technische Universität Wien, Dissertation, 2009

- [42] FANG, Jin B. ; BREESE, J. N.: Fire Development in Residential Basement Rooms / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1980. – Forschungsbericht. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire80/art008.html>. NBSIR 80-2120
- [43] KOCHED, A. ; PRETREL, H. ; VAUQUELIN, O. ; AUDOUIN, L.: Experimental Determination of the Discharge Coefficient of a Doorway using the SPIV Technique for Fire-Induced Flow Applications. In: *INTERFLAM 2013 – Proceedings of the 13th international conference*. London, England : Interscience Communications Limited, 2013, S. 229–240. – ISBN 978-0-9556548-7-9
- [44] DIN EN ISO 1716: *Prüfungen zum Brandverhalten von Produkten – Bestimmung der Verbrennungswärme (des Brennwertes) (ISO 1716:2010); Deutsche Fassung EN ISO 1716:2010*. 2010
- [45] PEACOCK, Richard D. ; RENEKE, Paul A. ; BUKOWSKI, Richard W. ; BABRAUSKAS, Vytenis: Defining flashover for fire hazard calculations. In: *Fire Safety Journal* 32 (1999), Nr. 4, S. 331–345. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711298000484>. – ISSN 0379-7112
- [46] HAGGLUND, Bengt ; JANSSON, Rolf ; ONNERMARK, Bengt: Fire Development in Residential Rooms After Ignition from Nuclear Explosions / Forsvarets Forskningsanstalt. Stockholm, Schweden, 1974. – Forschungsbericht. FOA C20016-DG (A3)
- [47] FANG, Jin B.: Fire buildup in a room and the role of interior finish materials / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1975. – Forschungsbericht. TN 879
- [48] LEE, B. T. ; BREESE, J. N.: Submarine compartment fire study – fire performance evaluation of hull insulation / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1979. – Forschungsbericht. NBSIR 78-1584
- [49] BABRAUSKAS, Vytenis: Combustion of mattresses exposed to flaming ignition sources, Part I, Full-scale tests and hazard analysis / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1977. – Forschungsbericht. NBSIR 77-1290
- [50] BUDNICK, Edward K. ; KLEIN, David P.: Mobile Home Fire Studies: Summary and Recommendations / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg,

- MD, USA, März 1979. – Forschungsbericht. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire79/art011.html>. NBSIR 79-1720
- [51] BUDNICK, Edward K.: Mobile Home Living Room Fire Studies: The Role of Interior Finish / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1978. – Forschungsbericht. NBSIR 78-1530
- [52] KLEIN, David P.: Characteristics of incendiary fires in the living room of a mobile home / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1978. – Forschungsbericht. NBSIR 78-1522
- [53] BUDNICK, Edward K. ; KLEIN, David P. ; O'LAUGHLIN, R. J.: Mobile Home Bedroom Fire Studies: The Role of Interior Finish / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1978. – Forschungsbericht. NBSIR 78-1531
- [54] QUINTIERE, James G. ; MCCAFFREY, Bernard J.: The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure: Volume 1 / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, 1980. – Forschungsbericht. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire80/art002.html>. NBSIR 80-2054
- [55] MCCAFFREY, Bernard J. ; ROCKETT, J. A.: Static Pressure Measurements of Enclosure Fires. In: *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 82 (1977), Nr. 2, S. 107–117. – URL <http://cdm16009.contentdm.oclc.org/cdm/ref/collection/p13011coll16/id/59302>
- [56] THOMAS, P. H.: Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms. In: *Fire and Materials* 5 (1981), Nr. 3, S. 103–111. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/fam.810050305>. – ISSN 1099-1018
- [57] BABRAUSKAS, Vytenis ; PEACOCK, Richard D. ; RENEKE, Paul A.: Defining flashover for fire hazard calculations: Part II. In: *Fire Safety Journal* 38 (2003), Nr. 7, S. 613–622. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711203000274>. – ISSN 0379-7112
- [58] EMMONS, Howard W.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Kap. Vent Flows, S. 2–32 – 2–41, National Fire Protection Association, 2002
- [59] STARKE, Horst: Kalibrierung von bidirektionalen Sonden. In: *Jahresbericht 2006/2007/2008*. Heyrothsberge : Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt,

- 2009, S. 180–191. – URL http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Feuerwehr/idf_dokumente/publikationen/jb_artikel/jb06-08/JB06-08_Starke.pdf
- [60] COOPER, Leonard Y.: Calculation of the Flow Through a Horizontal Ceiling/Floor Vent / National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, MD, USA, März 1989. – Forschungsbericht. NISTIR 89-4052
- [61] DIN 18232-2: *Rauch- und Wärmefreihaltung – Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau.* 2007
- [62] HUGGETT, Clayton: Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. In: *Fire and Materials* 4 (1980), Nr. 2, S. 61–65. – URL <http://dx.doi.org/10.1002/fam.810040202>. – ISSN 1099-1018
- [63] JANSSENS, Marc L.: Measuring rate of heat release by oxygen consumption. In: *Fire Technology* 27 (1991), August, Nr. 3, S. 234–249. – URL <http://www.springerlink.com/content/uh95t177682rv215/>
- [64] BABRAUSKAS, Vytenis (Hrsg.) ; GRAYSON, Stephen J. (Hrsg.): *Heat Release in Fires.* London, New York : Elsevier Applied Science, 1992
- [65] PARKER, W. J.: Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, März 1982. – Forschungsbericht. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/>. NBSIR 81-2427-1
- [66] PARKER, W.J.: Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications. In: *Journal of Fire Sciences* 2 (1984), Nr. 5, S. 380–395. – URL <http://jfs.sagepub.com/content/2/5/380.abstract>
- [67] THORNTON, W.M.: The relation of oxygen to the heat of combustion of organic compounds. In: *Philosophical Magazine Series 6* 33 (1917), Nr. 194, S. 196–203. – URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14786440208635627>
- [68] DEMIDOW, P. G. ; EVTJUSKIN, N. K. ; PANARIN, V. M. ; PAUTELEBV, G. I. ; REICHEL, Heinz L. (Hrsg.): *Taktik der Brandbekämpfung, Teil I Allgemeine Grundlagen der Taktik der Brandbekämpfung, Abschnitt I – Der Brand und seine Entwicklung.* Fachschule des Mdl – Feuerwehr – Heyrothsberge, 1967

- [69] FORELL, Burkhard: *A Methodology to assess Species Yields of Compartment Fires by means of an extended Global Equivalence Ratio Concept*. Braunschweig, Universität Braunschweig, Dissertation, 2007. – URL <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00020916>
- [70] LÖNNERMARK, Anders ; BABRAUSKAS, Vytenis: TOXFIRE – Fire Characteristics and Smoke Gas Analyses in Under-ventilated Large-scale Combustion Experiments - Theoretical Background and Calculations / SP Swedish National Testing and Research Institute. Borås, Schweden, 1996. – Forschungsbericht. – URL <http://www-v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=528>. SP REPORT 1996:49
- [71] STECKLER, K.D. ; QUINTIERE, James G. ; RINKINEN, W.J.: Flow Induced by Fire in a Compartment / National Bureau of Standards (NBS). Gaithersburg, MD, USA, September 1982. – Forschungsbericht. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire82/art001.html>. NBSIR 82-2520
- [72] WEICHERT, Lothar ; BÖHNER, Georg ; GLOCKMANN, Walter ; HESSE, Lutz ; HUNSINGER, Walter ; MARCHEVKA, Franz ; MENZEL, Kurt ; MESTER, Ilrich ; OBROWSKI, Walter ; VANVOR, Herbert ; KRUPPKE, Eugen (Hrsg.) ; WIPPLER, Elmar (Hrsg.): *Temperaturmessung in der Technik – Grundlagen und Praxis*. Lexika-Verlag, 1976
- [73] HOFMANN, Dietrich ; TRUMPOLD, Harry (Hrsg.) ; WOSCHNI, Eugen-Georg (Hrsg.): *Dynamische Temperaturmessung*. 1. Berlin : VEB Verlag Technik Berlin, 1976
- [74] LÖNNERMARK, Anders ; INGASON, Haukur: Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels. In: *Fire Safety Journal* 40 (2005), Nr. 6, S. 506–527. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711205000494>. – ISSN 0379-7112
- [75] LÖNNERMARK, Anders ; INGASON, Haukur: In response to the letter: Thermocouple configuration and heat transfer effects. In: *Fire Safety Journal* 42 (2007), Nr. 2, S. 168. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711206001470>. – ISSN 0379-7112
- [76] JONES, J.C.: Thermocouple configuration and heat transfer effects. In: *Fire Safety Journal* 42 (2007), Nr. 2, S. 167. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711206001482>. – ISSN 0379-7112

- [77] BABRAUSKAS, Vytenis ; WILLIAMSON, Robert B.: Temperature measurement in fire test furnaces. In: *Fire Technology* 14 (1978), S. 226–238. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF01983057>. – 10.1007/BF01983057. – ISSN 0015-2684
- [78] BRUNDAGE, Aaron L. ; DONALDSON, A. B. ; GILL, Walt ; KEARNEY, Sean P. ; NICOLETTE, Vern F. ; YILMAZ, Nadir: Thermocouple Response in Fires, Part 1: Considerations in Flame Temperature Measurements by a Thermocouple. In: *Journal of Fire Sciences* 29 (2011), Nr. 3, S. 195–211. – URL <http://jfs.sagepub.com/content/29/3/195.abstract>
- [79] KARLSSON, Björn ; QUINTIERE, James G.: *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2000
- [80] PITTS, W. M. ; BRAUN, E. ; PEACOCK, R. D. ; MITLER, H. E. ; JOHNSON, E. L. ; RENEKE, P. A. ; BLEVINS, L. G.: Temperature Uncertainties for Bare-Bead and Aspirated Thermocouple Measurements in Fire Environments. In: GRITZO, L. A. (Hrsg.) ; ALVARES, N. J. (Hrsg.): *Thermal Measurements: The Foundation of Fire Standards. American Society for Testing and Materials (ASTM). Proceedings*. West Conshohocken, PA, USA, 1998, S. 3–15. – URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire03/art052.html>. – ASTM STP 1427
- [81] PITTS, W. M. ; BRAUN, E. ; PEACOCK, R. D. ; MITLER, H. E. ; JOHNSON, E. L. ; RENEKE, P. A. ; BLEVINS, L. G.: Temperature Uncertainties for Bare-Bead and Aspirated Thermocouple Measurements in Fire Environments. In: *Combustion Institute, 1st Joint Meeting of the U.S. Sections: Western States, Central States, Eastern States. Proceedings*, URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire99/art149.html>, 1999, S. 709–712. – NISTIR 6242
- [82] SULTAN, Mohamed A.: Performance of Different Temperature Sensors in Standard Fire Resistance Test Furnaces. In: *Fire Technology* 46 (2010), S. 853–881. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-010-0166-9>. – ISSN 0015-2684
- [83] TAGAWA, M. ; OHTA, Y.: Two-thermocouple probe for fluctuating temperature measurement in combustion—Rational estimation of mean and fluctuating time constants. In: *Combustion and Flame* 109 (1997), Nr. 4, S. 549–560. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010218097000448>. – ISSN 0010-2180

- [84] LUO, Mingchun: Effects of Radiation on Temperature Measurement in a Fire Environment. In: *Journal of Fire Sciences* 15 (1997), Nr. 6, S. 443–461. – URL <http://jfs.sagepub.com/content/15/6/443.abstract>
- [85] BLEVINS, Linda G.: Behavior of bare and aspirated thermocouples in compartment fires. In: *Proceedings of the 33rd National Heat Transfer Conference*, URL <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire99/PDF/f99112.pdf>, 1999
- [86] JONES, J.C.: On the Use of Metal Sheathed Thermocouples in a Hot Gas Layer Originating from a Room Fire. In: *Journal of Fire Sciences* 13 (1995), Nr. 4, S. 257–260. – URL <http://jfs.sagepub.com/content/13/4/257.abstract>
- [87] WICKSTRÖM, Ulf: *Heat Transferfer in Fire Technology*. 2012. – in Bearbeitung
- [88] WELCH, S. ; RUBINI, P.: Three-dimensional simulation of a Fire-Resistance Furnace. In: *International Association for Fire Safety Science, Proceedings of the 5th Symposium International Association for Fire Safety Science (Veranst.)*, 1997, S. 1009–1020
- [89] MCGRATTAN, Kevin ; HOSTIKKA, Simo ; FLOYD, Jason: Fire Dynamics Simulator (Version 5) User’s Guide / National Institute of Standards and Technology (NIST). Gaithersburg, MD, USA, Oktober 2009. – Forschungsbericht. NIST Special Publication 1019-5
- [90] JONES, J. C.: Suggestions towards improved reliability of thermocouple temperature measurements in combustion tests. In: GRITZO, Louis A. (Hrsg.) ; ALVARES, Norm (Hrsg.): *Thermal Measurements – The foundation of fire Standards*. Philadelphia, PA, USA, 2003, S. 16–31. – URL <http://books.google.de/books?id=IZzxfmNS9kcC>
- [91] BIBUS METALS AG: *Materialdatenblatt Inconel 2.4816*
- [92] ISO 834-1: *Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements*. 1999
- [93] PROMAT GMBH: *Materialdatenblatt Promaglaf HTI 1200*. – URL <http://www.promat.de/twd/default.aspx?Pagename=PROMAGLAF&CL=DE-de>
- [94] SILCA SERVICE- UND VERTRIEBSGESELLSCHAFT FÜR DÄMMSTOFFE MBH: *Materialdatenblatt Silcapan 850*. – URL http://www.silca-online.de/pdf/silca_12-6.pdf

- [95] CALSITHERM SILIKATBAUSTOFFE GMBH: *Materialdatenblatt Silcapan 850*. – URL http://www.calsitherm.de/pdf/20071206-silcapan_de.pdf
- [96] WICKSTRÖM, Ulf ; JANSSON, Robert ; TUOVINEN, Heimo: Validation fire tests on using the adiabatic surface temperature for predicting heat transfer / SP Technical Research Institute of Sweden. Boras, Schweden, 2009. – Forschungsbericht. – URL http://www.brandforsk.se/MediaBinaryLoader.axd?MediaArchive_FileID=cd8545b3-b2fd-4b8a-a4cf-2e7736fdf442&MediaArchive_ForceDownload=true. SP Report 2009:19
- [97] HÄGGKVIST, Andreas: *The plate thermometer as a mean of calculating incident heat radiation a practical and theoretical study*. Lulea, Schweden, Lulea University of Technology, Master's Thesis, 2009. – URL <http://epubl.ltu.se/1402-1617/2009/183/index-en.html>
- [98] WICKSTRÖM, Ulf: The Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer. In: *International Association for Fire Safety Science, Proceedings of the 10th Symposium*. College Park, MD, USA, Juni 2011, S. 1001–1011
- [99] KUCHLING, Horst: *Taschenbuch der Physik*. 18. München, Wien : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004
- [100] WICKSTRÖM, Ulf: Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer for Calculating Heat Transfer and Controlling Fire Resistance Furnaces. In: *International Association for Fire Safety Science, Proceedings of the 9th Symposium* International Association for Fire Safety Science (Veranst.), 2008, S. 1227–1238
- [101] INGASON, Haukur ; WICKSTRÖM, Ulf: Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer. In: *Fire Safety Journal* 42 (2007), Nr. 2, S. 161–166. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711206001093>. – ISSN 0379-7112
- [102] ZHANG, J. ; DELICHATSIOS, M.A.: Determination of the convective heat transfer coefficient in three-dimensional inverse heat conduction problems. In: *Fire Safety Journal* 44 (2009), Nr. 5, S. 681–690. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037971120900006X>. – ISSN 0379-7112
- [103] JANSSENS, Marc L. ; GOMEZ, Christina: Convective heat transfer in the cone calorimeter revisited. In: *INTERFLAM 2010 – Proceedings of the twelfth interna-*

tional conference. London, England : Interscience Communications Limited, 2010, S. 281 – 290

- [104] STAGGS, J.E.J.: A reappraisal of convection heat transfer in the cone calorimeter. In: *Fire Safety Journal* In Press, Corrected Proof (2011), S. –. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V37-51YXM64-1/2/30f736edecb97349cc093060c112949b>. – ISSN 0379-7112
- [105] STAGGS, J.E.J.: Convection heat transfer in the cone calorimeter. In: *Fire Safety Journal* 44 (2009), Nr. 4, S. 469–474. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711208001410>. – ISSN 0379-7112

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prüfstand (Skizze)	8
2.2	Prüfstand (Außenansicht Vorderseite)	8
2.3	Brandlastanordnung im Brandraum	10
2.4	Lageplan der Messstellen	13
2.5	Differenzdruck- und Temperaturmessung in der Brandraumöffnung	15
2.6	Vertikale Temperaturmessstellen T5 und T6 im Brandraum	16
2.7	Projektierter Aufbau der vertikalen Temperaturmessstellen	16
2.8	Vergleichsgegenstände: Position und Anordnung im Brandraum	19
2.9	Spanplattenpropbekörper: Position und Anordnung im Brandraum	20
2.10	Tapetenelemente: Position und Anordnung im Brandraum	20
2.11	Szenarien: Zündorte und Brandbeschleunigerapplikation	21
3.1	Vergleich der Savitzky-Golay-Parameter und Berechnungszeiträume zur Bestimmung der Massenverlustrate	27
4.1	Ereignisübersicht: Zeitpunkte von Brandbeschleunigerapplikation, Zündung, Flashover, Löschbeginn und Probenahme	39
4.2	Wärmefreisetzungsrate	40
4.3	Freigesetzte Wärme	40
4.4	Massenverlustrate	41
4.5	Absoluter Massenverlust	41
4.6	Temperaturverlauf unter der Brandraumdecke	43
4.7	Einfallende Strahlungswärmestromdichte: Vergleich der Versuche für ausgesuchte Messstellen	45
4.8	Konzentrationsverlauf Sauerstoff	47
4.9	Konzentrationsverlauf Kohlendioxid	48
4.10	Konzentrationsverlauf Kohlenmonoxid	49
4.11	Lage der neutralen Ebene	50
4.12	Gesamtmassenstrom durch die Brandraumöffnung	50

4.13 Vergleich der einfallenden Strahlungswärmestromdichten an versch. Positionen und der Temperatur über der Sitzfläche von Sofa 1 zwischen den Versuchen MFPA_Zimmer_003 und MFPA_Zimmer_004	52
C.1 Brandraum: Lagebezeichnungen	87
C.2 Brandraum: Skizze der Brandlastanordnung	88
C.3 Anordnung der Brandlast in den Regalen	89
C.4 Spanplattenprobekörper: Position der Löcher für die Mantelthermoelemente	89
C.5 Sofas: Konstruktion und Abmessungen	90
C.6 Position der Messgeräte im Versuchsstand und Leitungsverlauf	91
C.7 Lage der Messstelle G5 (Skizze)	92
C.8 Abmessungen der bidirektionalen Sonden	92
C.9 Position der Thermoelemente und bidirektionalen Sonden vor der Brandraumöffnung	92
C.10 Anordnung der Messstellen im Schlot	92
C.11 Vertikale Messstelle T3: tatsächlicher Aufbau	93
C.12 Vertikale Messstelle T4: tatsächlicher Aufbau	93
C.13 Vertikale Messstelle T5: tatsächlicher Aufbau	93
C.14 Vertikale Messstelle T6: tatsächlicher Aufbau	93
C.15 Vertikale Messstelle T7: tatsächlicher Aufbau	93
C.16 Messstelle G1: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen . . .	94
C.17 Messstelle G2: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen . . .	94
C.18 Messstelle G3: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen . . .	94
C.19 Messstelle G4: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen . . .	94
C.20 Messstelle G5: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen . . .	94
C.21 Versuchsgebäude (Außenansicht)	95
C.22 Brandraum: rückseitige Zugangstür	95
C.23 Schlot: Außenansicht	95
C.24 Brandraum: Blick in Richtung Zugangstür	96
C.25 Brandraum: Blick in Richtung Brandraumöffnung	96
C.26 Esstisch im Brandraum	96
C.27 Regal 1 im Brandraum	96
C.28 Couchtisch im Brandraum	97
C.29 Regalecke im Brandraum (frontal)	97
C.30 Regalecke im Brandraum (seitlich)	97
C.31 Sofa 1 im Brandraum	97

C.32 Sofa 2 im Brandraum	97
C.33 Spanplattenprobekörper 1 in der Referenzecke	98
C.34 Spanplattenprobekörper 2 im Brandraum	98
C.35 Zünder auf Sofa 1	98
C.36 Zünder auf Sofa 1 (Detailansicht)	98
C.37 Zünder auf Teppichelement	98
C.38 Kamera K2	99
C.39 Podest für Kameras K3 und K4	99
C.40 Messstelle G1	99
C.41 Messstellen G2 und P1	99
C.42 Messstellen im Schlot	100
C.43 FTIR-Spektrometer G1 und G5	100
C.44 Messstelle G5	100
C.45 Sauerstoffanalysatoren G1 und G5	100
C.46 Analysator G2	101
C.47 Analysatoren G3	101
C.48 Analysatoren G4	101
C.49 Plattenthermometer T14 und T15	101
C.50 Plattenthermometer T10	102
C.51 Plattenthermometer T16	102
C.52 Plattenthermometer T17	102
C.53 MFPA_Zimmer_004: Brandschutt Regal 1	122
C.54 Brandschutt Regalecke Versuch MFPA_Zimmer_004	122
C.55 MFPA_Zimmer_002: Brandschutt Sofa 1	122
C.56 MFPA_Zimmer_002: Brandschutt Esstisch	122
C.57 MFPA_Zimmer_002: Brandschutt Regalecke	123
C.58 Brandraum nach Versuch MFPA_Zimmer_005: Übersichtsaufnahme durch die Brandraumöffnung	123
C.59 Brandrückstand Sofa 2 nach Versuch MFPA_Zimmer_005	123
C.60 Brandrückstand Esstisch nach Versuch MFPA_Zimmer_005	123
C.61 MFPA_Zimmer_005: Tapetenelement 1 nach dem Versuch	124
C.62 MFPA_Zimmer_005: Tapetenelement 2 und Referenzecke nach dem Ver- such	124
C.63 MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand Teppichboden vor der Brandraum- öffnung	124

C.64 MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand Regal 1	124
C.65 MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand Sofa 1	125
C.66 MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand Couchtisch	125
C.67 MFPA_Zimmer_005: Regalecke nach dem Versuch	125
C.68 MFPA_Zimmer_005: Brandschutt in der Regalecke	125
C.69 MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand PUR in Regal 5	125
C.70 MFPA_Zimmer_005: Teppichboden in der Regalecke nach dem Versuch, Teppichelement entfernt	125
C.71 Bildtafel der Vergleichsgegenstände in der Referenzecke (Position X0_01) vor und nach dem Versuch im Fundkontext	126
C.72 Bildtafel der Vergleichsgegenstände auf dem Couchtisch (Position X0_02) vor und nach dem Versuch im Fundkontext	127
C.73 Bildtafel der Vergleichsgegenstände auf Regal 3 (Position X0_03) vor und nach dem Versuch im Fundkontext	128
C.74 Bildtafel der Vergleichsgegenstände auf dem Esstisch (Position X0_04) vor und nach dem Versuch im Fundkontext	129
C.75 Detailansichten der Proben X02_01 (Glasvasen in der Referenzecke) au- ßerhalb des Fundkontexts	130
C.76 Detailansichten der Proben X02_02 (Glasvasen auf dem Couchtisch) au- ßerhalb des Fundkontexts	131
C.77 Detailansichten der Proben X02_03 (Glasvasen auf Regal 3) außerhalb des Fundkontexts	132
C.78 Detailansichten der Proben X02_04 (Glasvasen auf dem Esstisch) außer- halb des Fundkontexts	133
C.79 Detailansichten der Proben X04_01 (Tischlampe in der Referenzecke) und X03_01 (Kunststoffvase in der Referenzecke) außerhalb des Fund- kontexts	134
C.80 Detailansichten der Proben X04_02 (Tischlampe auf dem Couchtisch) außerhalb des Fundkontexts	135
C.81 Detailansichten der Proben X04_04 (Tischlampe auf dem Esstisch) und X03_04 (Kunststoffvase auf dem Esstisch) außerhalb des Fundkontexts . .	136
C.82 Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_001	137
C.83 Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_001	138
C.84 Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_002	139
C.85 Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_002	140

C.86 Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_003	141
C.87 Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_003	142
C.88 Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_004	143
C.89 Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_004	144
C.90 Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_005	145
C.91 Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_005	146
J.1 Schema zur Berechnung der Lage der neutralen Ebene	192
J.2 Beispiele zur manuellen Ermittlung der neutralen Ebene aus den Druck- profilen	193
J.3 Vergleich der Methoden zur Ermittlung der Lage der neutralen Ebene aus den Druckprofilen	194
J.4 Vergleich der Modelle zur Berechnung der neutralen Ebene	195
L.1 Geräte zur Messung der Zeitkonstanten	202
L.2 Berechnetes Zeitverhalten der Mantelthermoelemente auf Basis der Zeit- konstanten	204
L.3 Berechneter Strahlungseinfluss auf Thermoelemente verschiedener Durch- messer im stationären Zustand	206
L.4 Berechnetes Zeitverhalten von Thermoelementen verschiedener Durch- messer unter Wärmestrahlungseinfluss	207
M.1 Plattenthermometer aus Edelstahl	210
M.2 Plattenthermometer aus Kupfer	213
M.3 Plattenthermometer: Energiebilanz	213
M.4 Plattenthermometer: Größe C_{PT}	215
M.5 Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Plattenthermometer im Cone Calorimeter	221
M.6 Zeitverhalten der Plattenthermometer bei konstanter einfallender Strah- lungswärmestromdichte	222
M.7 Wärmestrom in die Isolierung der Plattenthermometer \dot{q}''_{cond} in Abhängig- keit von der Plattenthermometertemperatur	223
M.8 Kalibrierkurve zur Darstellung der Strahlungswärmestromdichte des Cone Calorimeter Heizers in Abhängigkeit von seiner Temperatur	228

M.9 Vergleich der Berechnungsmethoden für den Wärmestrom durch Wärmeleitung in die Isolierung und Abweichung der berechneten Strahlungswärmestromdichte zur Strahlungswärmestromdichte des Heizers	229
M.10 Berechnete Strahlungswärmestromdichte und Abweichung zur Strahlungswärmestromdichte des Heizers, Berechnung mit den in Kapitel M.4.8 erläuterten Annahmen	230
N.1 Wärmefreisetzungsrates: vergleichende Darstellung der Versuche (ab Löschbeginn gestrichelte Linien)	232
N.2 Freigesetzte Wärme: vergleichende Darstellung der Versuche (ab Löschbeginn gestrichelte Linien)	233
N.3 Vergleich Massenverlustrate und Wärmefreisetzungsrates	234
N.4 Vergleich Massenverlust und freigesetzte Wärme	235
N.5 Masse: vergleichende Darstellung der Versuche	236
N.6 Massenverlust: vergleichende Darstellung der Versuche	237
N.7 Absoluter Massenverlust: geglättete, vergleichende Darstellung der Versuche	238
N.8 Temperaturen vertikale Messstelle T1 (Brandraumöffnung): vergleichende Darstellung ausgesuchter Messstellen für alle Versuche	239
N.9 Temperaturen vertikale Messstelle T3 (Referenzecke): vergleichende Darstellung ausgesuchter Messstellen für alle Versuche	240
N.10 Temperaturen vertikale Messstelle T4 (Brandraummitte): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche	241
N.11 Temperaturen vertikale Messstelle T5 (Sofa 2): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche	242
N.12 Temperaturen vertikale Messstelle T6 (Sofa 1): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche	243
N.13 Temperaturen vertikale Messstelle T7 (Regalecke): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche	244
N.14 Temperaturen vertikale Messstelle T1 (Brandraumöffnung): vergleichende Darstellung der Versuche für ausgesuchte Messstellen	245
N.15 Temperaturen vertikale Messstelle T3 (Referenzecke): vergleichende Darstellung der Versuche für ausgesuchte Messstellen	246
N.16 Temperaturen vertikale Messstelle T4 (Brandraummitte): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen	247
N.17 Temperaturen vertikale Messstelle T5 (Sofa 2): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen	248

N.18 Temperaturen vertikale Messstelle T6 (Sofa 1): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen	249
N.19 Temperaturen vertikale Messstelle T7 (Regalecke): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen	250
N.20 Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_001, alle Messstellen	251
N.21 Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_002, alle Messstellen	252
N.22 Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_003, alle Messstellen	252
N.23 Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_004, alle Messstellen	253
N.24 Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_005, alle Messstellen	253
N.25 Einfallende Strahlungswärmestromdichte: ausgesuchte Messstellen	254
N.26 Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_001, alle Messstellen	255
N.27 Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_002, alle Messstellen	255
N.28 Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_003, alle Messstellen	256
N.29 Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_004, alle Messstellen	256
N.30 Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_005, alle Messstellen	257
N.31 Gesamtwärmestromdichte: Vergleich der Versuche, Messstellen T9.1, T10.1, T11.1, T14.1	258
N.32 Gesamtwärmestromdichte: Vergleich der Versuche, Messstellen T13.1, T15.1, T16.1, T17.1 und T17.2	259
N.33 Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_001, alle Messstellen	260
N.34 Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_002, alle Messstellen	260
N.35 Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_003, alle Messstellen	261
N.36 Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_004, alle Messstellen	261
N.37 Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_005, alle Messstellen	262
N.38 Adiabate Oberflächentemperatur: Vergleich der Versuche, Messstellen T9.1, T10.1, T11.1, T14.1	263
N.39 Adiabate Oberflächentemperatur: Vergleich der Versuche, Messstellen T13.1, T15.1, T16.1, T17.1 und T17.2	264
N.40 Massenstrom durch die Brandraumöffnung	265

N.41 Kumulierter Massenstrom durch die Brandraumöffnung und absoluter Massenverlust	266
N.42 Spanplattenprobekörper Referenzecke: Temperaturen und Wärmestromdichten	267
N.43 Spanplattenprobekörper Raum: Temperaturen und Wärmestromdichten	268
N.44 Konzentrationsverlauf Methan	269
N.45 Konzentrationsverlauf Benzol	270
N.46 Konzentrationsverlauf Cyanwasserstoff	271
N.47 Konzentrationsverlauf Ammoniak	272
N.48 Konzentrationsverlauf Stickstoffmonoxid	273
N.49 Konzentrationsverlauf Stickstoffdioxid	274
N.50 Konzentrationsverlauf Formaldehyd	275
N.51 Konzentrationsverlauf Ethin	275
N.52 Konzentrationsverlauf Ethen	276
N.53 Konzentrationsverlauf Acrolein	276
N.54 Konzentrationsverlauf Phenol	277
N.55 Konzentrationsverlauf Wasserdampf	277
N.56 Konzentrationsverlauf Schwefeldioxid	278
N.57 Konzentrationsverlauf Ethan	278
N.58 Konzentrationsverlauf Propan	279
N.59 Konzentrationsverlauf Distickstoffmonoxid	279

Tabellenverzeichnis

2.1	Masse brennbare Gegenstände im Brandraum und Brandlast	11
3.1	Transportzeiten der Gasmessgeräte bei den Zimmerbränden	24
3.2	Basiskonzentrationen zur Basislinienkorrektur	24
3.3	Savitzky-Golay-Parameter zur Berechnung der Massenverlustrate	28
4.1	Ereignisübersicht	38
4.2	Maximaltemperatur unter der Brandraumdecke	43
B.1	Oberer Heizwert	83
B.2	Massenanteil physikalisch gebundenen Wassers in den Proben zur Bestimmung des oberen Heizwerts	84
B.3	Unterer Heizwert	85
D.1	Thermophysikalische Eigenschaften der Umfassungsbauteile des Brandraums	147
D.2	Beschreibung der brennbaren und nichtbrennbaren Gegenstände im Brandraum	148
D.3	Masse nichtbrennbarer Gegenstände im Brandraum	153
D.4	Masse der Teppichelemente und ihrer Einzelteile	153
D.5	Brandlast der Brandbeschleuniger	154
D.6	Datenlogger zur Messwernerfassung	154
D.7	Messstellenübersicht	155
D.8	Volumenströme durch die Gasanalysatoren	163
D.9	Umgebungsbedingungen	163
D.10	Zeitpunkte Ausfall Plattenthermometer	164
D.11	Zeitleiste	165
E.1	Messgasaufbereitung bei den Zimmerbränden	174

F.1	Zeitpunkte bei Erfüllung der Flashoverkriterien	180
G.1	Messwerte der Brandraumwaage bei Versuchsbeginn	182
I.1	Ergebnisse der Simulation zum Strömungsbeiwert	191
L.1	Zeitkonstanten der Thermoelemente	204
L.2	Rechnerische Zeitkonstante τ	208
M.1	Thermophysikalische Eigenschaften Promaglaf HTI 1200	211
M.2	Thermophysikalische Eigenschaften Silcapan 850	211
M.3	Thermophysikalische Eigenschaften Edelstahl V2A 1.4301	212
M.4	Thermophysikalische Eigenschaften Kupfer	214
M.5	Plattenthermometer: Zeitkonstante τ	221
M.6	Plattenthermometer: konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h	224
M.7	Plattenthermometer: relative Abweichung f zwischen vorgegebener und ermittelter einfallender Strahlungswärmestromdichte bei Annahme der Temperatur auf der Rückseite	225
M.8	Plattenthermometer: relative Abweichung f zwischen vorgegebener und ermittelter einfallender Strahlungswärmestromdichte bei Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs	227

Abkürzungsverzeichnis

BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
cdPT	Plattenthermometer aus Kupfer (Copper Disk Plate Thermometer)
FR	flammgeschützt (fire retardant)
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot
IR	Infrarot
LKA	Landeskriminalamt
MFPA	Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig mbH
MTE	Mantelthermoelement
PA	Polyamid
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PT	Plattenthermometer aus Edelstahl (Plate Thermometer)
PUR	Polyurethan (-Schaum)
PUF	Polyurethanschaum (polyurethane foam)
SAN	Styrol-Acrylnitril
Tepp	Teppich
VBA	Visual Basic for Applications

Anhang A

Nomenklatur

Inhaltsverzeichnis

A.1	Versuchsnummer	78
A.2	Probennummern	78
	A.2.1 Brandbeschleunigernachweis	79
	A.2.2 Vergleichsgegenstände und Brandschutt	79
A.3	Chargennummern	79

A.1 Versuchsnummer

Versuchsnummern bestehen im Forschungsprojekt Brandspurenanalytik immer aus den drei Bestandteilen Versuchsapparatur, Material und laufende, dreistellige Nummer, jeweils getrennt durch einen Unterstrich. In Anlehnung an diese Systematik werden die Versuche dieser Versuchsreihe als MFPA_Zimmer_001 bis MFPA_Zimmer_005 bezeichnet.

Diese Versuchsnummern sind auch Basis für Probennummern und Dateinamen der Messdaten der diversen Messgeräte.

A.2 Probennummern

Probennummern bestehen aus der Versuchsnummer, einer Probenartbezeichnung und einer laufenden Nummer, jeweils getrennt durch Unterstriche.

(MFPA_Zimmer_001_Probenart_laufendeNummer: MFPA_Zimmer_001_R01_01).

Bei der chemischen Analyse auf Brandbeschleuniger wird diese Nummern um weitere Ziffern für die jeweiligen Messparameter ergänzt.

A.2.1 Brandbeschleunigernachweis

Folgende Probenartbezeichnungen wurden bei dieser Versuchsreihe vergeben:

P06	Adsorbensmaterialien im Schlot
P06_01 bis P06_03	Adsorbensmaterialien im Schlot: Filterpapier BAM
P06_04 bis P06_06	Adsorbensmaterialien im Schlot: Aktivkohlestreifen LKA Berlin
P07	Wischproben
P08	Tapetenproben (diese Proben wurden abweichend als R01 bezeichnet, Probenart P08 wurde nicht verwendet)
R01	Rückstandsprobe in Beutel
R02	Rückstandsprobe in Vial
W01	Löschwasserproben

A.2.2 Vergleichsgegenstände und Brandschutt

Vergleichsgegenstände, Spanplatten aus den Probekörpern und Spanplatten aus den Sofas wurden mit folgenden Probenarten bezeichnet:

X01	Spanplatte aus Probekörper
X02	Glasvase
X03	Kunststoffvase
X04	Tischlampe
X05	Spanplatte aus den Sofas und sonstige Proben

Die laufende Nummer war hierbei den Orten, an denen Vergleichsgegenstände und Spanplattenprobekörper aufgestellt wurden, fest zugeordnet (vgl. Abb. 2.8 und 2.9).

A.3 Chargennummern

Die verwendeten Materialien und Gegenstände bekommen im Forschungsprojekt Brandspurenanalytik eine einzigartige Chargennummer zugeteilt. Diese Chargennummer besteht aus der Bezeichnung des Materials bzw. Gegenstands und einer laufenden, zweistelligen Nummer. Ergänzende Untersuchungen der Materialien (Heizwertmessung, simultane thermische Analyse) werden auf Basis dieser Chargennummer benannt.

Folgende Chargennummern wurden vergeben¹:

¹In Klammern ist die entsprechende Nummer aus Tabelle D.2 angegeben.

BE05		Benzin
DI04		Diesel
Gipskarton01	(31)	Gipskartonplatte (Tapetenelement)
Kiste01	(8)	Kiste zur Aufnahme der Polyamidformteile in den Regalen
Kleister01	(34)	Tapetenkleister
Lampe01	(16,17)	Tischlampe
Lampe01a	(17)	Tischlampe (Schirm)
Lampe01b	(16)	Tischlampe (Fuß)
PA01	(9)	Polyamidformteile (rund)
PA02	(9)	Polyamidformteile (Platten)
Pad01		Adsorbens im Schlot (Filterpapier BAM)
Papier01	(1)	Kataloge in den Regalen
Polster03	(4,5,6)	Polsterauflage der Sofas
Polsterwatte02	(6)	Polsterwatte
PUR05	(4,7)	Polyurethanschaum (Sofas und Regale)
Regal01	(2)	Regal
Span02	(19)	Spanplatte ohne Dekor (Spanplattenprobekörpern)
Span04	(3)	Spanplatte ohne Dekor (Sofas)
SpanD02	(11)	Spanplatte mit Dekor (Esstischplatte)
Stoff03	(5)	Möbelstoff (Sofas)
Stoff04	(12)	Stoff (Tischdecke Esstisch)
Strips01		Adsorbens im Schlot (Aktivkohlestreifen LKA Berlin)
Tap02	(33)	Tapete
Tepp02	(23)	Teppich (Teppichelement)
Tepp02a	(23)	Teppich (Teppichelement, Schlingen)
Tepp02b	(23)	Teppich (Teppichelement, brauner Schussfaden)
Tepp02c	(23)	Teppich (Teppichelement, grauer Kettfaden)
Tepp03	(1)	Teppichboden Brandraum
Tisch01	(15)	Couchtisch
Wasser03		Wasser aus der Löschwasserleitung der MFPA
Watte04		Glaswolle für Wischproben

Anhang B

Ermittlung von Heizwerten

Der obere Heizwert (Brennwert, Superior Calorific Power PCS) der Materialien wurde in einem Bombenkalorimeter (C 5000 Control, Ika-Werke GmbH & Co. KG, adiabatisches Verfahren) nach DIN EN ISO 1716 [44] gemessen. Je Material wurden mindestens drei Bestimmungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle B.1 aufgeführt.

Der Massenanteil physikalisch gebundenen Wassers in den Materialien wurde mittels Karl-Fischer-Titration in mindestens zwei Bestimmungen je Material ermittelt.

Die Berechnung des unteren Heizwerts (Heizwert, Inferior Calorific Power PCI) aus dem oberen Heizwert erfolgt nach DIN EN ISO 1716, indem die latente Verdampfungswärme des kondensierten Wassers subtrahiert wird.

$$Q_{PCI} = Q_{PCS} - q \quad (\text{B.1})$$

Q_{PCI} unterer Heizwert in J g^{-1} , Q_{PCS} oberer Heizwert in J g^{-1} , q latente Verdampfungswärme des kondensierten Wassers in J g^{-1} .

Die latente Verdampfungswärme des kondensierten Wassers lässt sich über folgende Beziehung ermitteln:

$$q = 2449w \quad (\text{B.2})$$

w kondensierte Wassermenge in g g^{-1} .

Die kondensierte Wassermenge wird über eine Elementaranalyse ermittelt. Da diese Messung nicht realisierbar war, wird im Folgenden ein Ansatz vorgestellt, mit dem die kondensierte Wassermenge aus dem physikalisch gebundenen Wasser (Feuchtigkeit) und dem Wasser, das aus dem Wasserstoff in der Probe bei der Verbrennung entsteht, ermittelt werden kann.

Die absolute Masse kondensierten Wassers setzt sich aus dem physikalisch gebundenen

Wasser und dem Reaktionsprodukt Wasser der Verbrennungsreaktion zusammen:

$$m_{H_2O} = m_{H_2O,phys} + m_{H_2O,chem} \quad (B.3)$$

m_{H_2O} absolute Masse kondensierten Wassers in g, $m_{H_2O,phys}$ physikalisch gebundenes Wasser in g, $m_{H_2O,chem}$ Reaktionsprodukt Wasser aus der Verbrennungsreaktion in g. Die Masse lässt sich aus der Stoffmenge und der molaren Masse berechnen. Die Stoffmenge des Wasser aus der Verbrennungsreaktion entspricht hierbei bei vollständiger Verbrennung auf Grund der Stöchiometrie der Stoffmenge biatomaren Wasserstoffs in der Probe.

$$m_{H_2O,chem} = n_{H_2O} M_{H_2O} = n_{H_2} M_{H_2O} \quad (B.4)$$

n_{H_2O} Stoffmenge Wasser aus der Verbrennungsreaktion in mol, M_{H_2O} molare Masse von Wasser (18 g mol^{-1}), n_{H_2} Stoffmenge biatomaren Wasserstoffs in der Probe in mol. Die Stoffmenge biatomaren Wasserstoffs in der Probe lässt sich aus der Anzahl der Wasserstoffatome im Molekül und der gesamten Stoffmenge der Brennstoffs (Probe) berechnen.

$$n_{H_2} = n_{H_2}^* n_{Fuel} = n_{H_2}^* \frac{m_{Fuel}}{M_{Fuel}} \quad (B.5)$$

$n_{H_2}^*$ Anzahl der Moleküle biatomaren Wasserstoffs, die bei der Reaktion eines Moleküls des Brennstoffs entstehen (Hälfte der Anzahl der Wasserstoffatome im Molekül), m_{Fuel} Brennstoffmasse in g, M_{Fuel} molare Masse des Brennstoffs in g mol^{-1} .

Formeln B.3, B.4 und B.5 in Formel B.2 eingesetzt ergibt:

$$\begin{aligned} q &= 2449w \\ &= 2449 \frac{m_{H_2O}}{m_{Fuel}} \\ &= 2449 \left(\frac{m_{H_2O,phys}}{m_{Fuel}} + \frac{m_{H_2O,chem}}{m_{Fuel}} \right) \\ &= 2449 \left(\frac{m_{H_2O,phys}}{m_{Fuel}} + \frac{n_{H_2}^* \frac{m_{Fuel}}{M_{Fuel}} M_{H_2O}}{m_{Fuel}} \right) \\ &= 2449 \left(\frac{m_{H_2O,phys}}{m_{Fuel}} + n_{H_2}^* \frac{M_{H_2O}}{M_{Fuel}} \right) \end{aligned} \quad (B.6)$$

Zur Berechnung des unteren Heizwerts nach oben beschriebenem Ansatz muss die Brennstoffzusammensetzung (Summenformel) bekannt sein, um die molare Masse und die An-

Tabelle B.1: Oberer Heizwert, Ergebnisse der Messungen im Bombenkalorimeter

Charge	Mittelwert	Standardabweichung		Anzahl Messungen	Vergleichswerte [24, Tab.C.3;C.4]
	in J g ⁻¹	in J g ⁻¹	in %		in MJ kg ⁻¹
Faserzement02 ^a	0	0,00	0,00	3	
Lampe01a	44409	405,67	0,91	5	46,37 (PP)
Lampe01b	40233	475,76	1,18	5	
PA01	22445	57,24	0,26	5	31,6-31,7 (PA6.6)
PA02	22303	117,77	0,53	5	31,6-31,7 (PA6.6)
Papier01	11374	23,87	0,21	5	12,7 (Magazine)
Polsterwatte02	22369	91,87	0,41	3	21,6-29,8 (Polyester)
PUR05	25320	477,48	1,89	3	23,9 (PUR) 26,1-31,6 (PUF) 24-25 (PUF FR)
Span02	18408	30,20	0,16	3	
SpanD02	18324	13,80	0,08	3	
Stoff03	16647	68,34	0,41	3	16,5-20,4
Stoff04	16334	105,13	0,64	5	16,5-20,4
Tepp02	28523	201,77	0,71	3	
Tepp02a	24563	732,68	2,98	4	31,6-31,7 (PA6.6)
Tepp02b	41664	544,48	1,31	3	46,37 (PP)
Tepp02c	21160	177,37	0,84	3	22,18 (PET)
Tepp03 ^b	12035	1878,43	15,61	3	31,6-31,7 (PA6.6)
Teppickleber02	15315	80,20	0,52	5	

^a Messung nicht möglich

^b Probe verbrennt nicht vollständig und verteilt sich in der Bombe

zahl der Wasserstoffatome zu bestimmen. Da dies bei chemisch nicht homogenen Brennstoffen nicht der Fall ist, müssen in diesen Fällen Annahmen zur Brennstoffzusammensetzung getroffen werden. Das Verhältnis $\frac{m_{H_2O,phys}}{m_{Fuel}}$ wird mittels der Karl-Fischer-Titration bestimmt.

Tabelle B.2: Massenanteil physikalisch gebundenen Wassers in den Proben zur Bestimmung des oberen Heizwerts

Charge	Mittelwert in %	Standardabweichung in %	Anzahl Messungen
Faserzement02	4,9	0,094	3
Lampe01a	0,1	0,086	3
Lampe01b	0,1	0,016	3
PA01	1,7	0,033	3
PA02	1,6	0,066	3
Papier01	3,9	0,218	3
Polsterwatte02	0,4	0,034	3
PUR05	0,6	0,031	3
Span02 ^a	7,6	0,000	2
SpanD02 ^b	6,7	0,100	2
Stoff03	3,8	0,059	3
Stoff04	5,0	0,112	3
Tepp02	1,2	0,025	3
Tepp02a	1,6	0,065	3
Tepp02b	0,1	0,019	3
Tepp02c	0,3	0,047	3
Tepp03	0,5	0,036	3
Teppickleber02	0,4	0,027	3

^a Mittels Wiegung und Trocknung einer konditionierten Probe (Normklima 50 % relative Luftfeuchtigkeit und 23 °C) ermittelter Wert: 7,9 %

^b Mittels Wiegung und Trocknung einer konditionierten Probe (Normklima 50 % relative Luftfeuchtigkeit und 23 °C) ermittelter Wert: 7,5 %

Tabelle B.3: Unterer Heizwert, Ergebnisse der Berechnungen

Charge	angenommene Stoffzusammensetzung	Summenformel	M_{Fuel}	$n_{H_2}^*$	Unterer Heizwert	Vergleichswerte [24, Tab.C.3;C.4]
			in $g\ mol^{-1}$		in $J\ g^{-1}$	in $MJ\ kg^{-1}$
Lampe01a	Polypropylen	C_3H_6	42	3	41257	42,23
Lampe01b	Styrol-Acrylnitril, 75% Styrol (n) und 25% Acrylnitril (m)	$(C_8H_8)_n - (C_3H_3N)_m$	91,25	3,375	38600	
PA01	PA6.6	$C_{12}H_{22}N_2O_2$	226	11	20256	29,5-29,6
PA02	PA6.6	$C_{12}H_{22}N_2O_2$	226	11	20118	29,5-29,6
Papier01	Cellulose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342	11	9859	
Polsterwatte02	Polyester	$C_{5,77}H_{6,25}O_{1,63}$	101,6	3,125	21004	20,3-28,5
PUR05	Polyurethan	$C_{6,3}H_{7,1}NO_{2,1}$	130,3	3,55	24104	22,7 (PUR) 23,2-28 (PUF)
Span02	Cellulose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342	11	16804	
SpanD02	Cellulose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342	11	16742	
Stoff03	Cellulose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342	11	15136	
Stoff04	Cellulose	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342	11	14794	
Tepp02	70% PA6.6, 9% PP, 21% PET		202,3	8,81	26574	
Tepp02a	PA6.6	$C_{12}H_{22}N_2O_2$	226	11	22378	29,5-29,6
Tepp02b	Polypropylen	C_3H_6	42	3	38511	42,23
Tepp02c	PET	$C_{10}H_8O_4$	192	4	20233	21,27
Tepp03 ^a	PA6.6	$C_{12}H_{22}N_2O_2$	226	11	9875	29,5-29,6

^a Probe besteht nicht rein aus PA6.6 sondern auch aus anderen, unbekanntem Materialien.

Anhang C

Abbildungen

Inhaltsverzeichnis

C.1 Skizzen	87
C.1.1 Brandraum und Brandlast	87
C.1.2 Messtechnik	91
C.2 Bildtafeln	95
C.2.1 Versuchsgebäude und Brandraum	95
C.2.2 Brandlast	96
C.2.3 Messtechnik	99
C.2.4 Brandverlauf	103
C.2.5 Brandraum nach dem Versuch	122
C.2.6 Vergleichsgegenstände	126
C.2.7 Panoramen des Brandraums	137

C.1 Skizzen

C.1.1 Brandraum und Brandlast

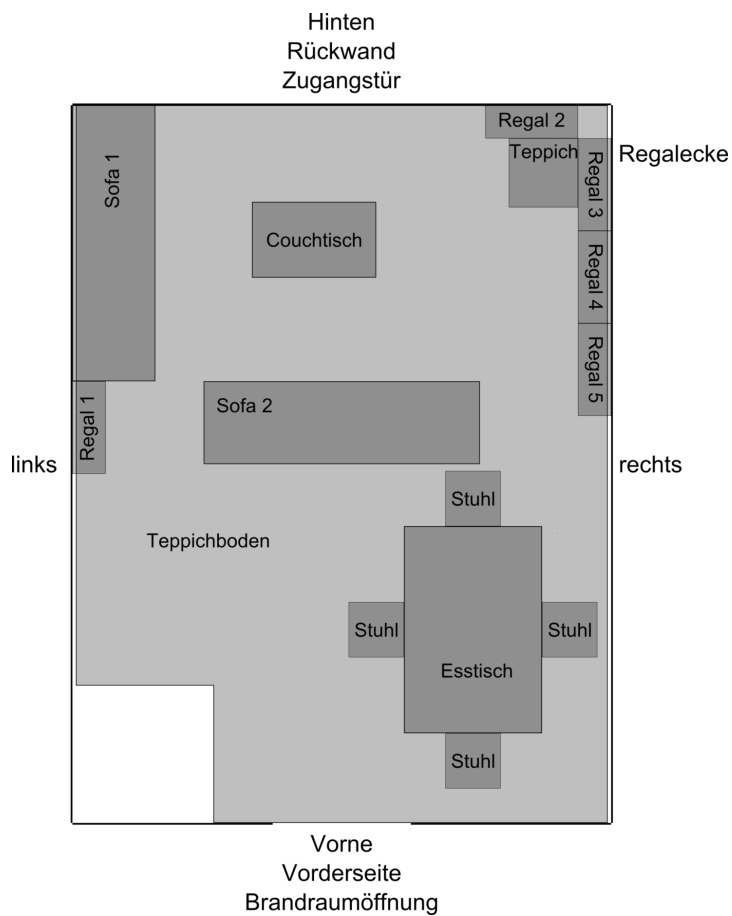


Abbildung C.1: Brandraum: Lagebezeichnungen

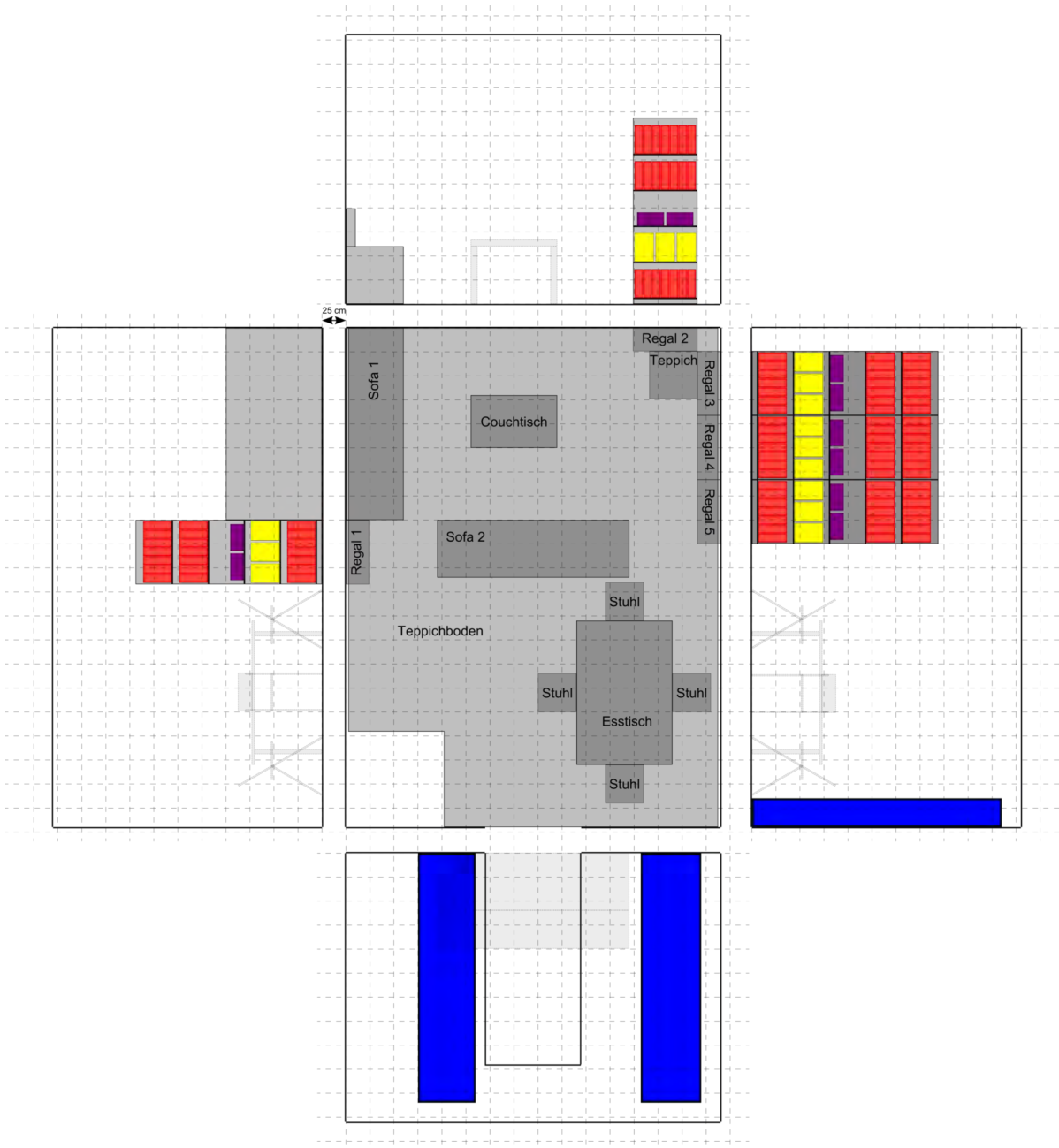


Abbildung C.2: Brandraum: Skizze der Brandlastanordnung

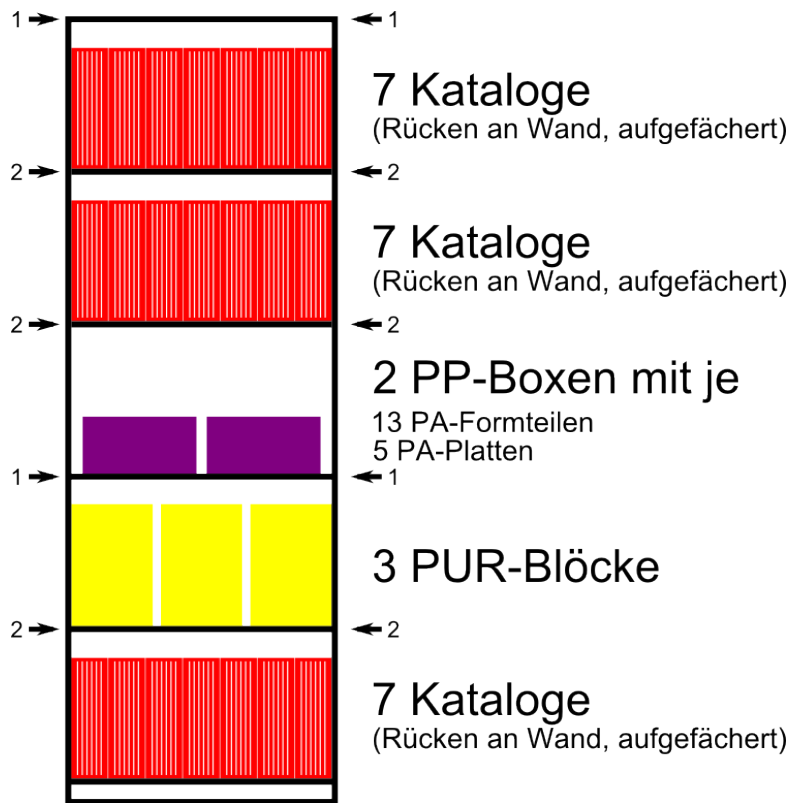


Abbildung C.3: Anordnung der Brandlast in den Regalen, Zahlen seitlich der Regalböden geben die Anzahl Schrauben an, mit denen die Regalböden zusätzlich stabilisiert wurden.

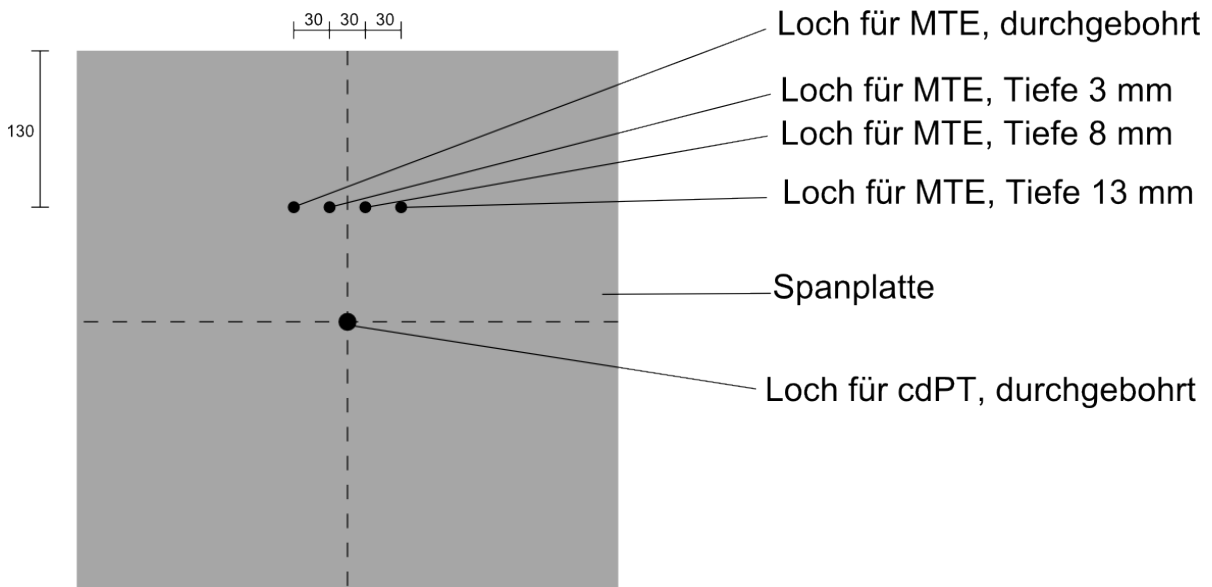


Abbildung C.4: Spanplattenprobekörper: Position der Löcher für die Mantelthermoelemente, Abmessungen in mm

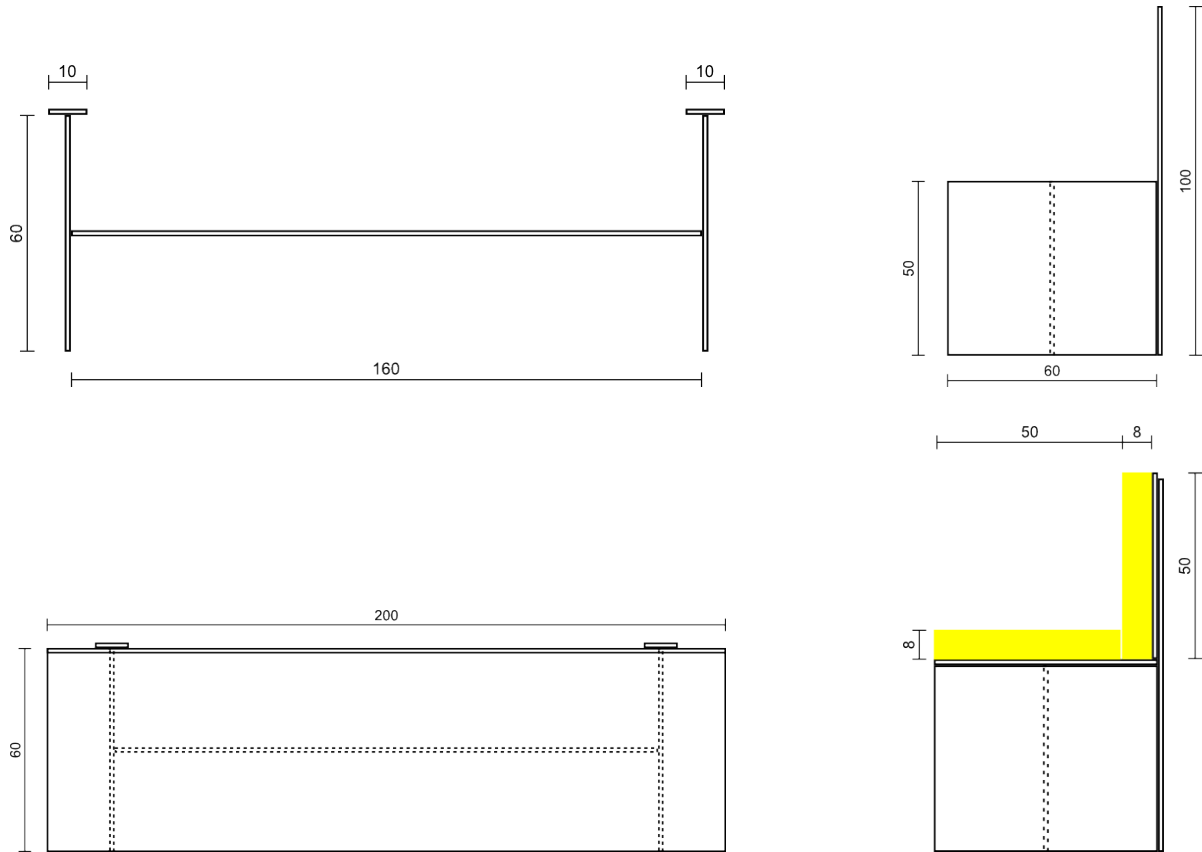


Abbildung C.5: Konstruktion der Sofas, Abmessungen in cm (links oben: Gestell Draufsicht; rechts oben: Gestell Seitenansicht; links unten: Auflagen Draufsicht; rechts unten: Auflagen Seitenansicht)

C.1.2 Messtechnik

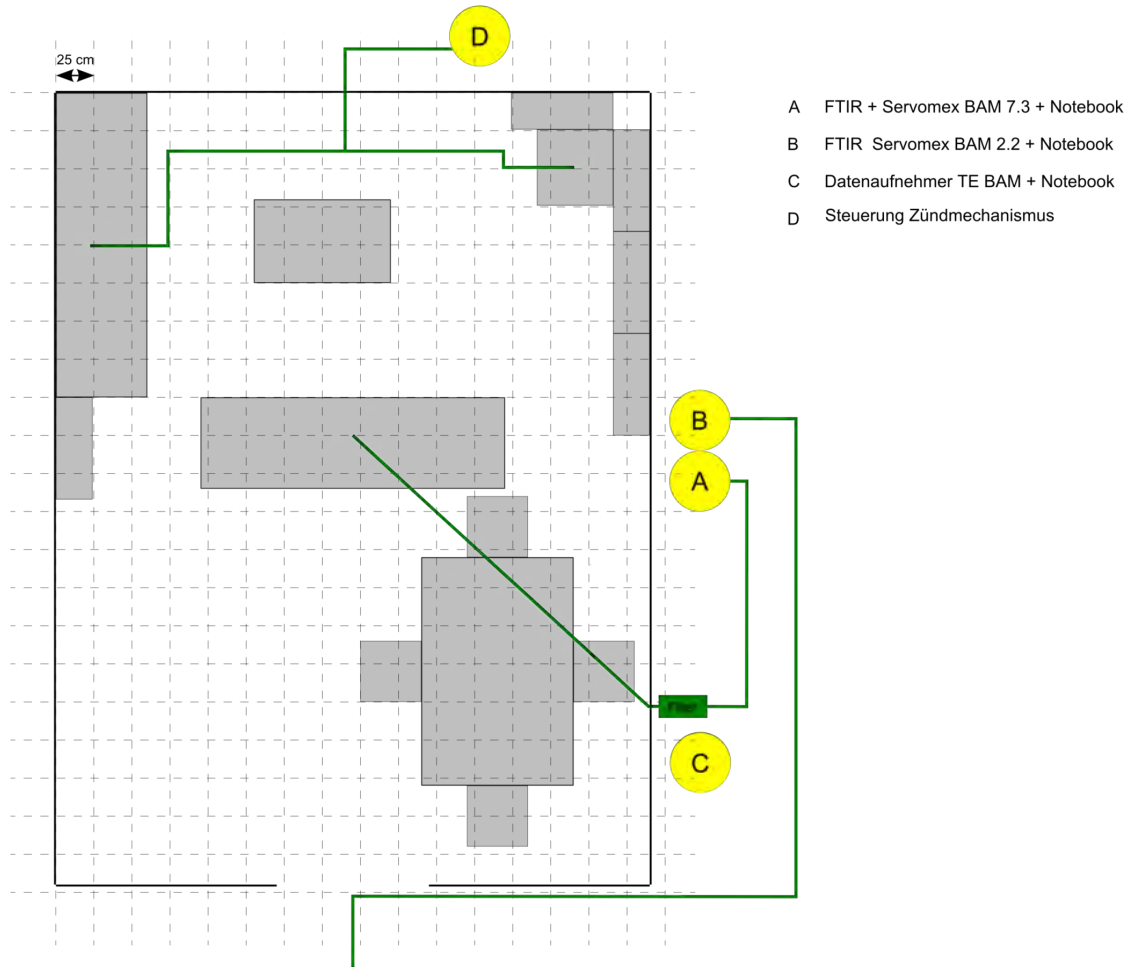


Abbildung C.6: Position der Messgeräte im Versuchsstand und Leitungsverlauf

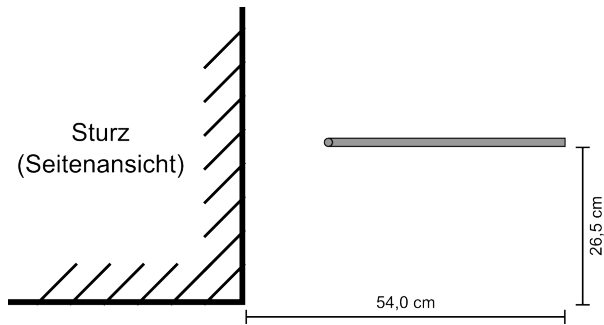
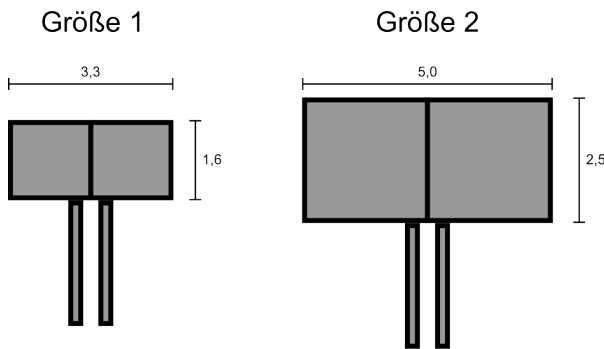


Abbildung C.7: Lage der Messstelle G5 (Skizze)



Außenabmessungen in cm, Materialstärke ca. 1 mm

Abbildung C.8: Abmessungen der bidirektionalen Sonden



Abbildung C.9: Position der Thermelemente und bidirektionalen Sonden vor der Brandraumöffnung, vertikale Messstellen D1/T1 (Abmessungen in cm)

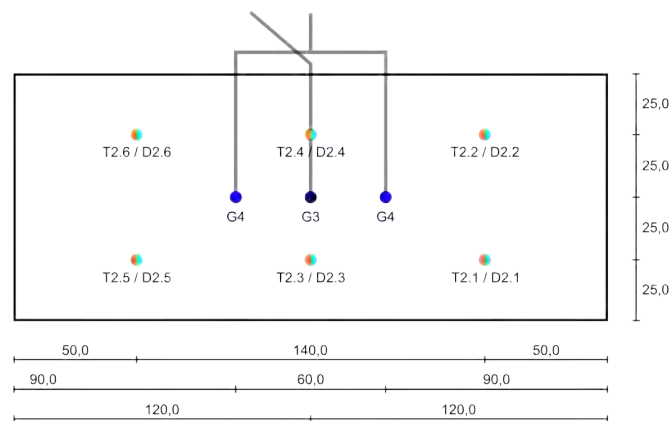


Abbildung C.10: Anordnung der Messstellen im Schlot (Abmessungen in cm)

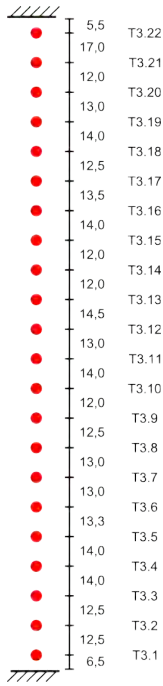


Abbildung C.11: Vertikale Messstelle T3: tatsächlicher Aufbau

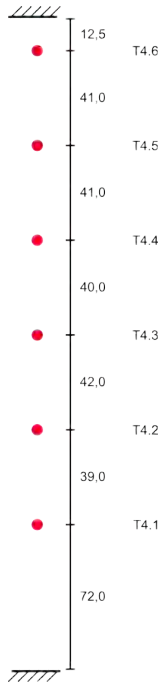


Abbildung C.12: Vertikale Messstelle T4: tatsächlicher Aufbau

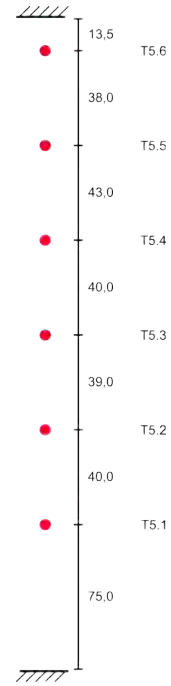


Abbildung C.13: Vertikale Messstelle T5: tatsächlicher Aufbau

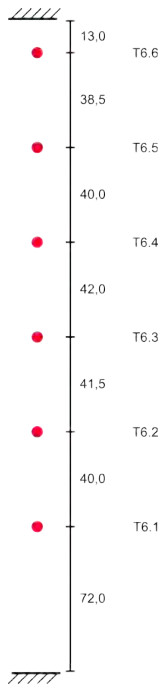


Abbildung C.14: Vertikale Messstelle T6: tatsächlicher Aufbau

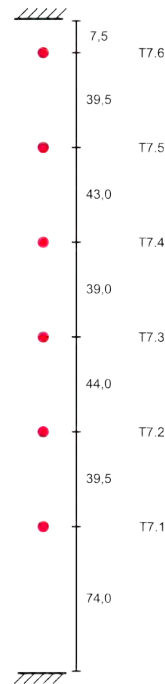


Abbildung C.15: Vertikale Messstelle T7: tatsächlicher Aufbau

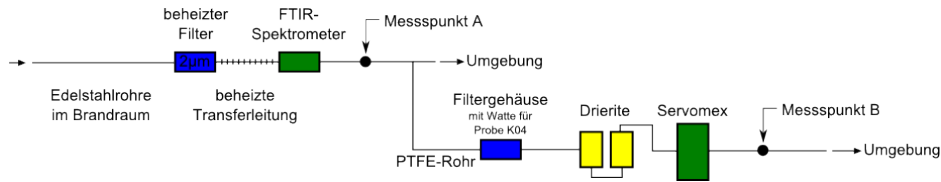


Abbildung C.16: Messstelle G1: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen

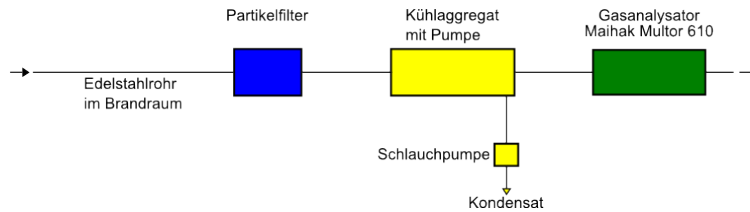


Abbildung C.17: Messstelle G2: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen

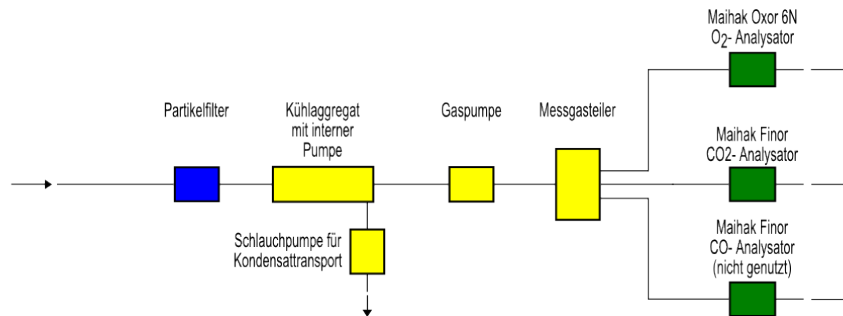


Abbildung C.18: Messstelle G3: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen

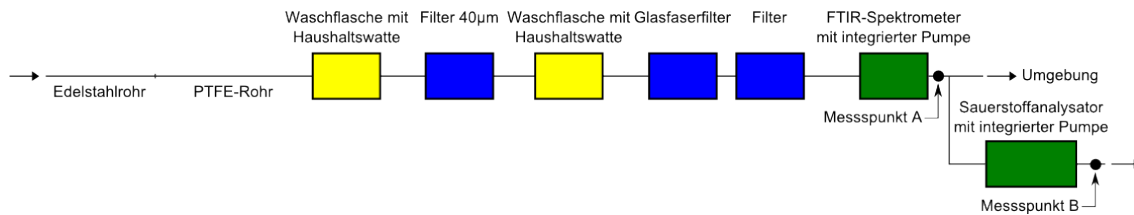


Abbildung C.19: Messstelle G4: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen

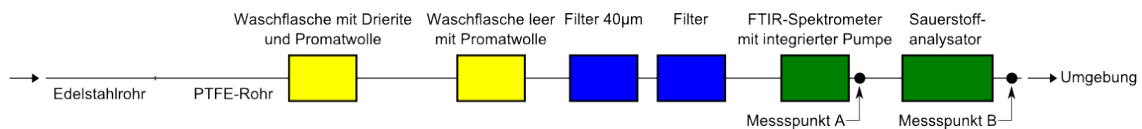


Abbildung C.20: Messstelle G5: Anordnung von Filtern, Messgeräten und Kühlfallen

C.2 Bildtafeln

C.2.1 Versuchsgebäude und Brandraum



Abbildung C.21: Versuchsgebäude (Außenansicht), Zulufttor geöffnet, das Podest für die Kameras K3 und K4 befindet sich vor dem Tor



Abbildung C.22: Brandraum: rückseitige Zugangstür



Abbildung C.23: Schlot: Außenansicht



Abbildung C.24: Brandraum: Blick in Richtung Zugangstür



Abbildung C.25: Brandraum: Blick in Richtung Brandraumöffnung

C.2.2 Brandlast



Abbildung C.26: Esstisch im Brandraum mit Vergleichsgegenständen und Tischdecke (im Hintergrund Tapetenelement 2)



Abbildung C.27: Regal 1 im Brandraum (rechts Sofa 1)



Abbildung C.28: Couchtisch im Brandraum (im Hintergrund Sofa 1, links Sofa 2)



Abbildung C.29: Regalecke im Brandraum mit den Regalen 2, 3, 4 und 5



Abbildung C.30: Regalecke im Brandraum mit dem Teppichelement



Abbildung C.31: Sofa 1 im Brandraum (links Sofa 2 und Regal 1)

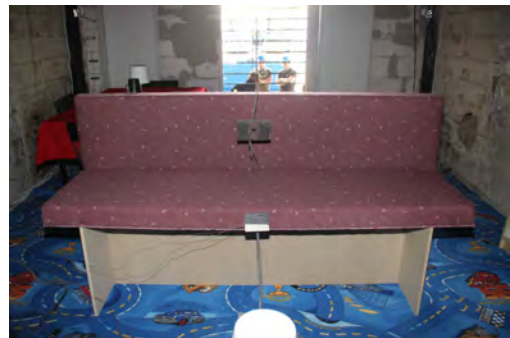


Abbildung C.32: Sofa 2 im Brandraum (Blick in Richtung Brandraumöffnung)



Abbildung C.33: Spanplattenprobekörper 1 in der Referenzecke



Abbildung C.34: Spanplattenprobekörper 2 im Brandraum (links Regale 4 und 5, rechts Couchtisch, hinten Sofa 2)



Abbildung C.35: Zünder auf Sofa 1, Brandbeschleuniger wurde noch nicht appliziert



Abbildung C.36: Zünder auf Sofa 1 (Detailansicht)

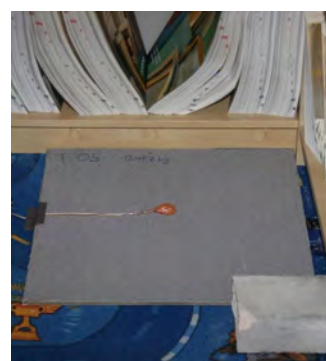


Abbildung C.37: Zünder auf Teppichelement (Detailansicht)

C.2.3 Messtechnik



Abbildung C.38: Kamera K2 mit Aluminiumverkleidung vor Montage des Tapetenelements



Abbildung C.39: Podest für Kameras K3 und K4 im Tor des Versuchsgebäudes



Abbildung C.40: Messstelle G1, Ende der Zuleitung im Brandraum an der vertikalen Temperaturmessstelle T5



Abbildung C.41: Messstellen G2 und P1, Ende der Zuleitungen unter der Brandraumdecke



Abbildung C.42: Messstellen G3, G4, D2 und T2 im Schlot



Abbildung C.43: FTIR-Spektrometer G1 (hinten) und G5 (vorne) im Nebengang



Abbildung C.44: Messstelle G5 am Gerüst über der Brandraumöffnung



Abbildung C.45: Sauerstoffanalysatoren G1 (links) und G5 (rechts) im Nebengang



Abbildung C.46: Analysator G2 mit Messgasaufbereitung (oben)



Abbildung C.47: Analysatoren G3



Abbildung C.48: Analysatoren G4, Sauerstoffanalysator (vorne) und FTIR-Spektrometer (hinten)



Abbildung C.49: Plattenthermometer T14 (vorne auf Ständer) und T15 (hinten an Lehne) an Sofa 1. In der Mitte befindet sich die vertikale Temperaturmessstelle T6.



Abbildung C.50: Plattenthermometer T10 auf dem Esstisch



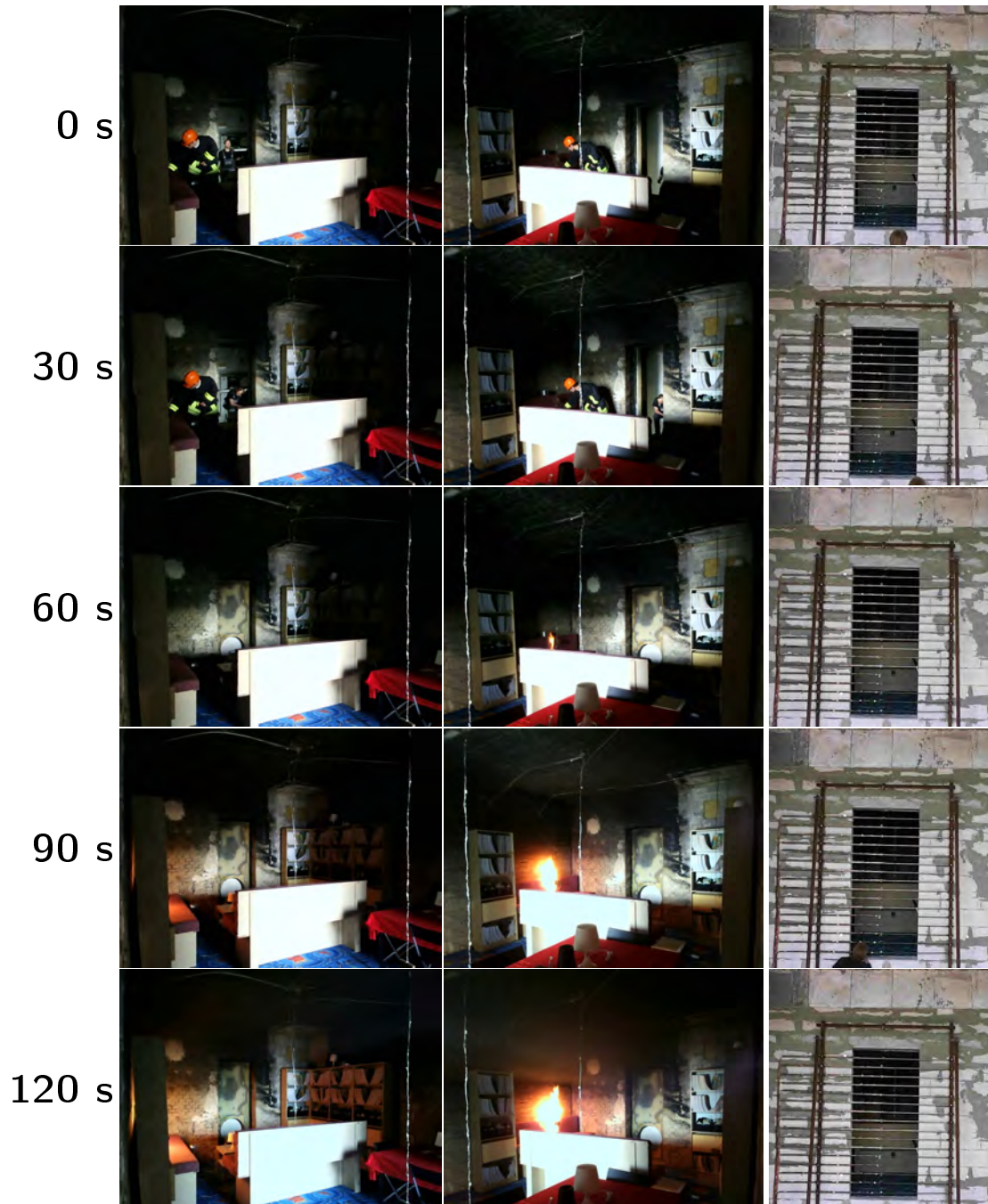
Abbildung C.51: Plattenthermometer T16 auf dem Couchtisch








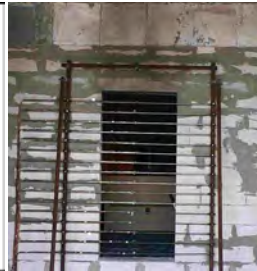

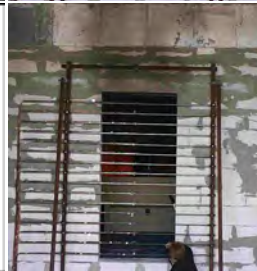
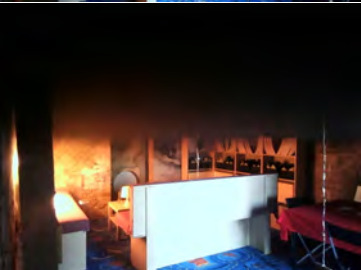
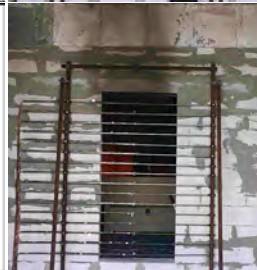

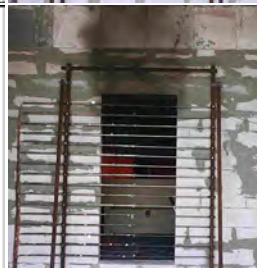


Abbildung C.52: Plattenthermometer T17.1 und T17.2 auf Regal 4

C.2.4 Brandverlauf

Versuch MFPA_Zimmer_001



150 s			
180 s			
210 s		kein Foto vorhanden	
240 s		kein Foto vorhanden	
270 s		kein Foto vorhanden	
300 s		kein Foto vorhanden	

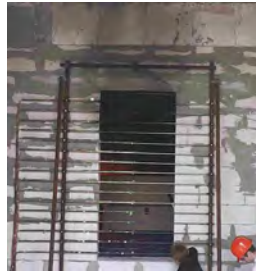
330 s		kein Foto vorhanden	
360 s		kein Foto vorhanden	
390 s		kein Foto vorhanden	
420 s		kein Foto vorhanden	



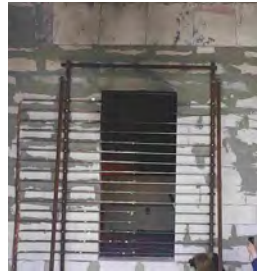
450 s



480 s



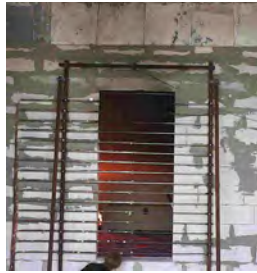
510 s



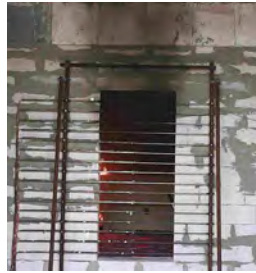
540 s



570 s



600 s



630 s



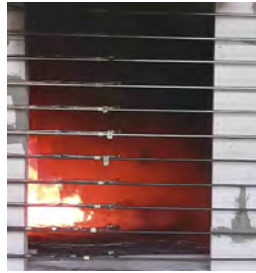
660 s



690 s



720 s



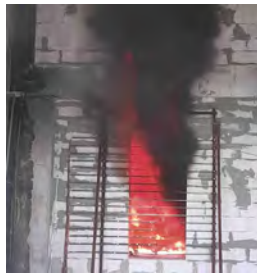
750 s



780 s



810 s



840 s



870 s



900 s



930 s



960 s



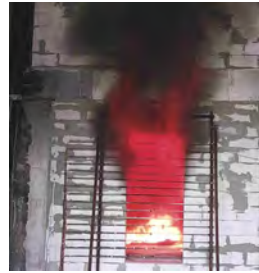
990 s



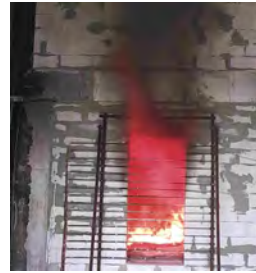
1020 s



1050 s



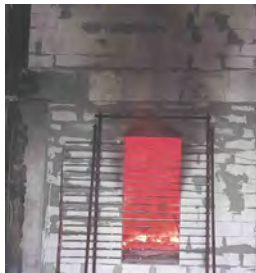
1080 s



1110 s



1140 s



1170 s



1200 s

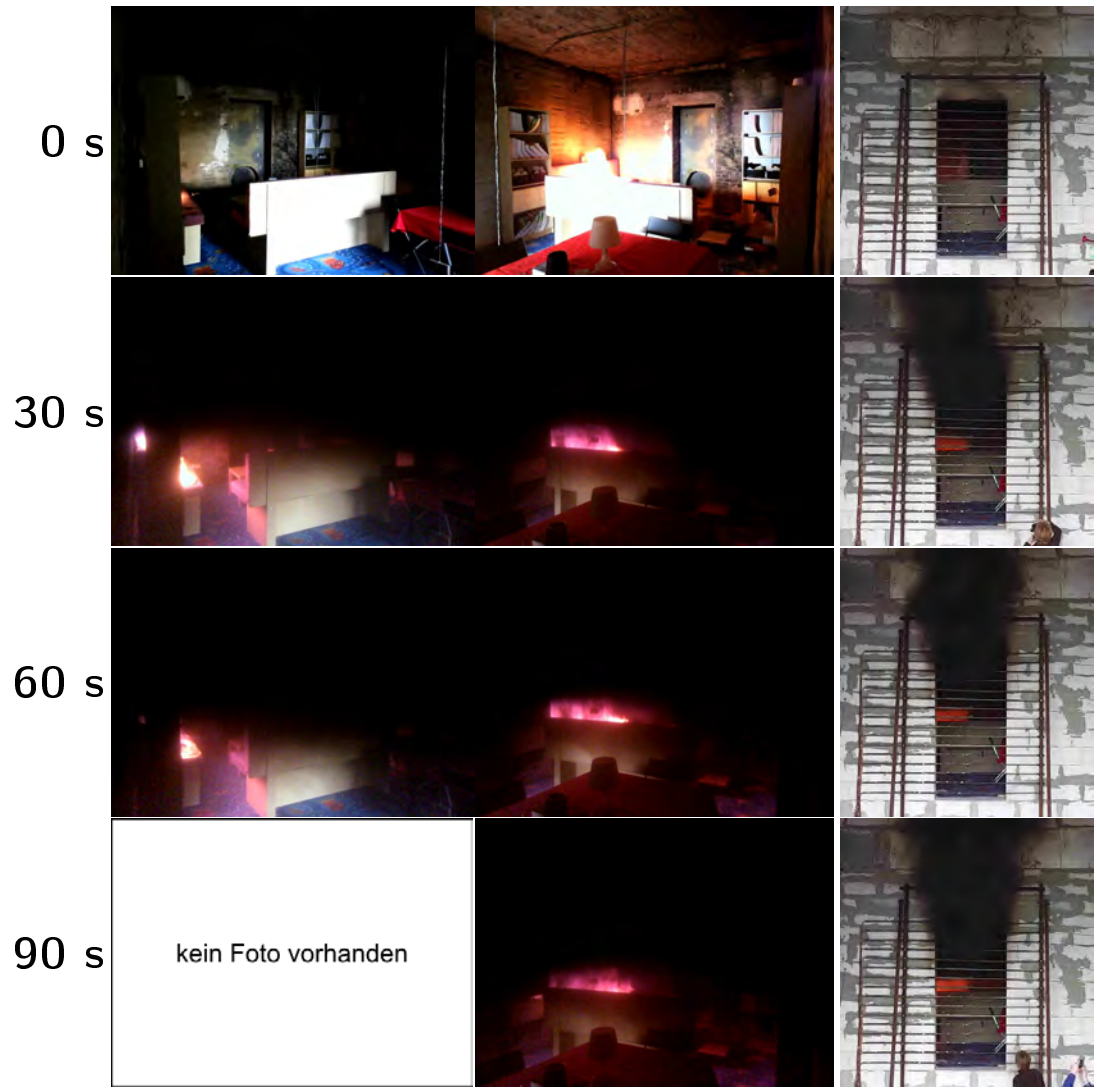


1230 s



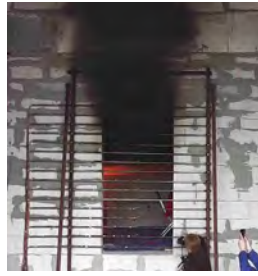
1260 s

Versuch MFPA_Zimmer_002





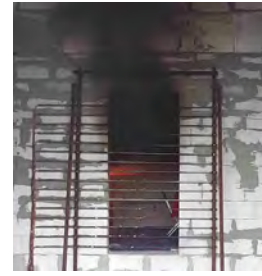
120 s



150 s



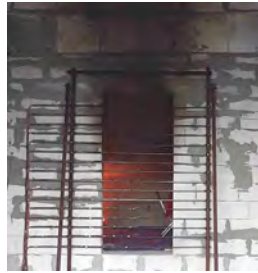
180 s



210 s



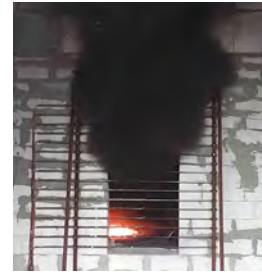
240 s



270 s



300 s



330 s



360 s



390 s



420 s



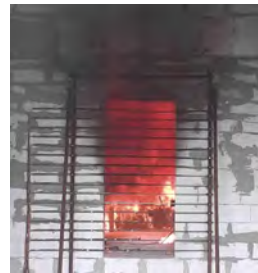
450 s



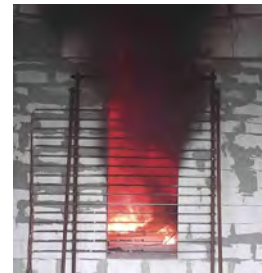
480 s



510 s



540 s



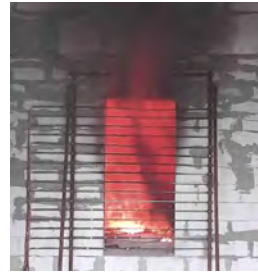
570 s



600 s



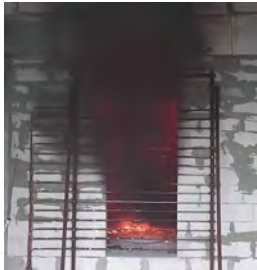
630 s



660 s



690 s








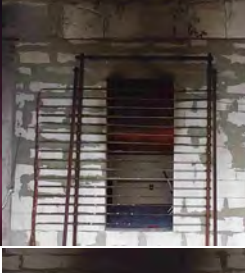




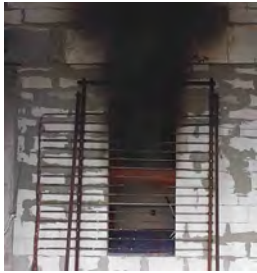
720 s



750 s

Versuch MFPA_Zimmer_003

0 s	kein Foto vorhanden		
30 s	kein Foto vorhanden		
60 s	kein Foto vorhanden		
90 s	kein Foto vorhanden		
120 s	kein Foto vorhanden		



150 s



180 s



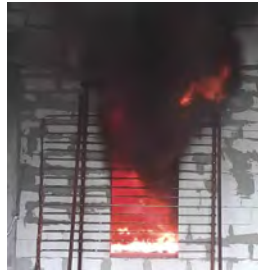
210 s



240 s



270 s



300 s



330 s



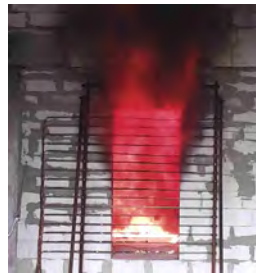
360 s



390 s



420 s



450 s



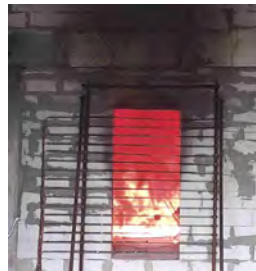
480 s



510 s



540 s



570 s



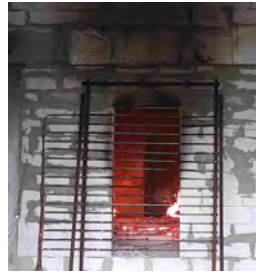
600 s



1110 s



1140 s



1170 s



1200 s



1230 s



1260 s



1290 s



1320 s



1350 s



1380 s



1410 s



1440 s



1470 s



1500 s



1530 s



1560 s



1590 s



1620 s



1650 s



1680 s



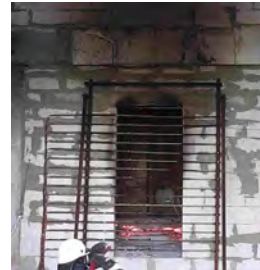
1710 s



1740 s

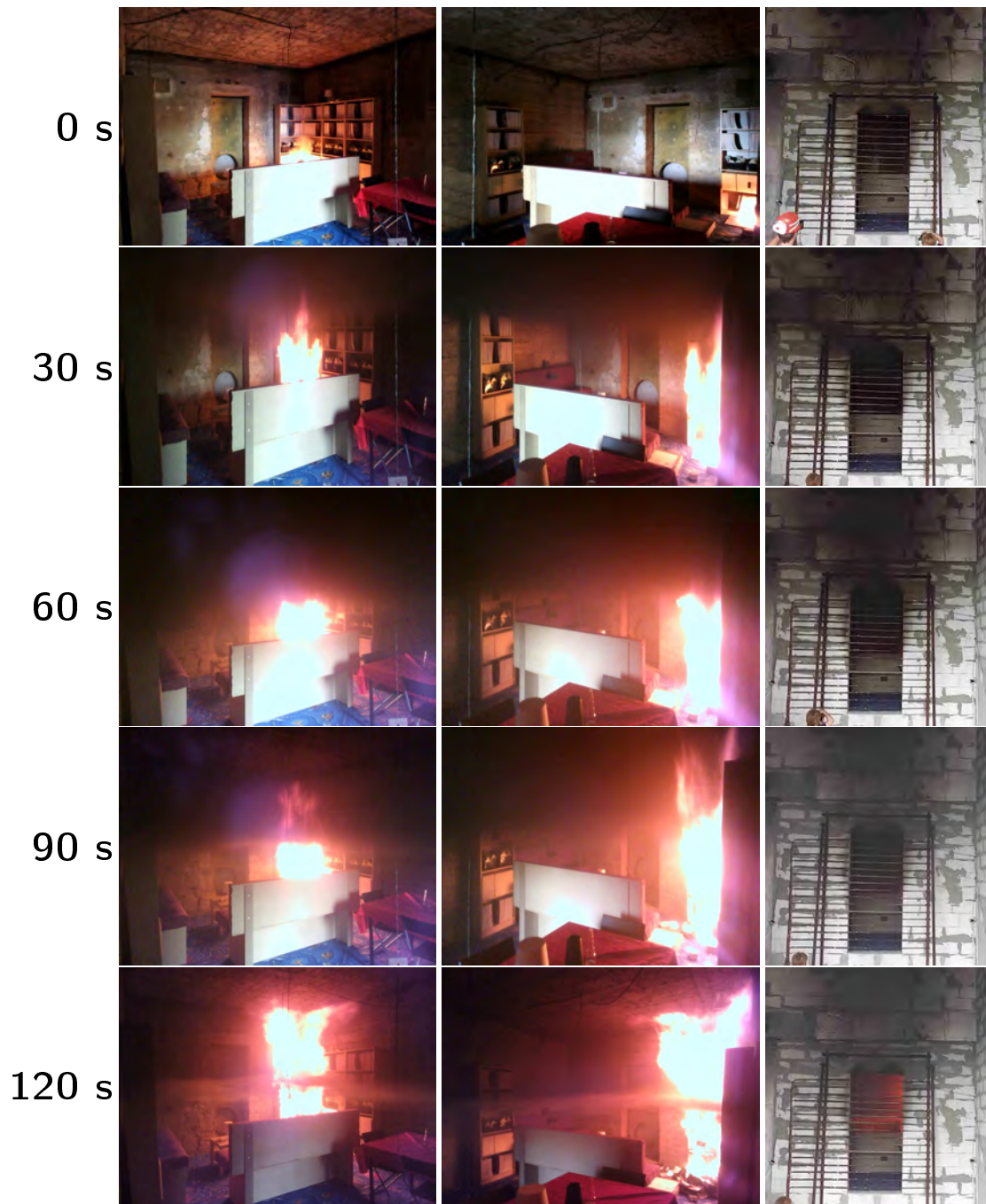


1770 s



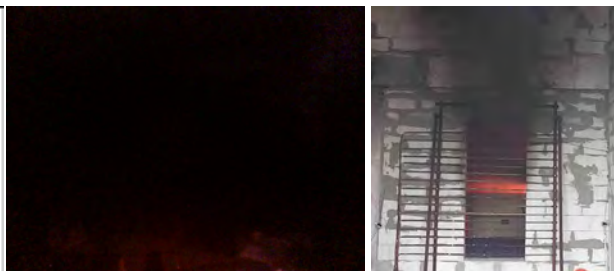
1800 s

Versuch MFPA_Zimmer_004

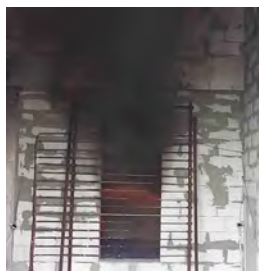


150 s

kein Foto vorhanden



180 s



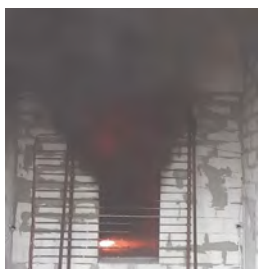
210 s



240 s



270 s



300 s



330 s



360 s



390 s



420 s



450 s



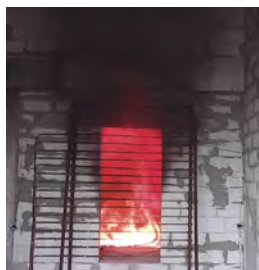
480 s



510 s



540 s



570 s



600 s



630 s



1140 s



1170 s



1200 s



1230 s



1260 s



1290 s



1320 s



1350 s



1380 s



1410 s



1440 s



1470 s



1500 s



1530 s



1560 s



1590 s



1620 s



1650 s



1680 s



1710 s



1740 s

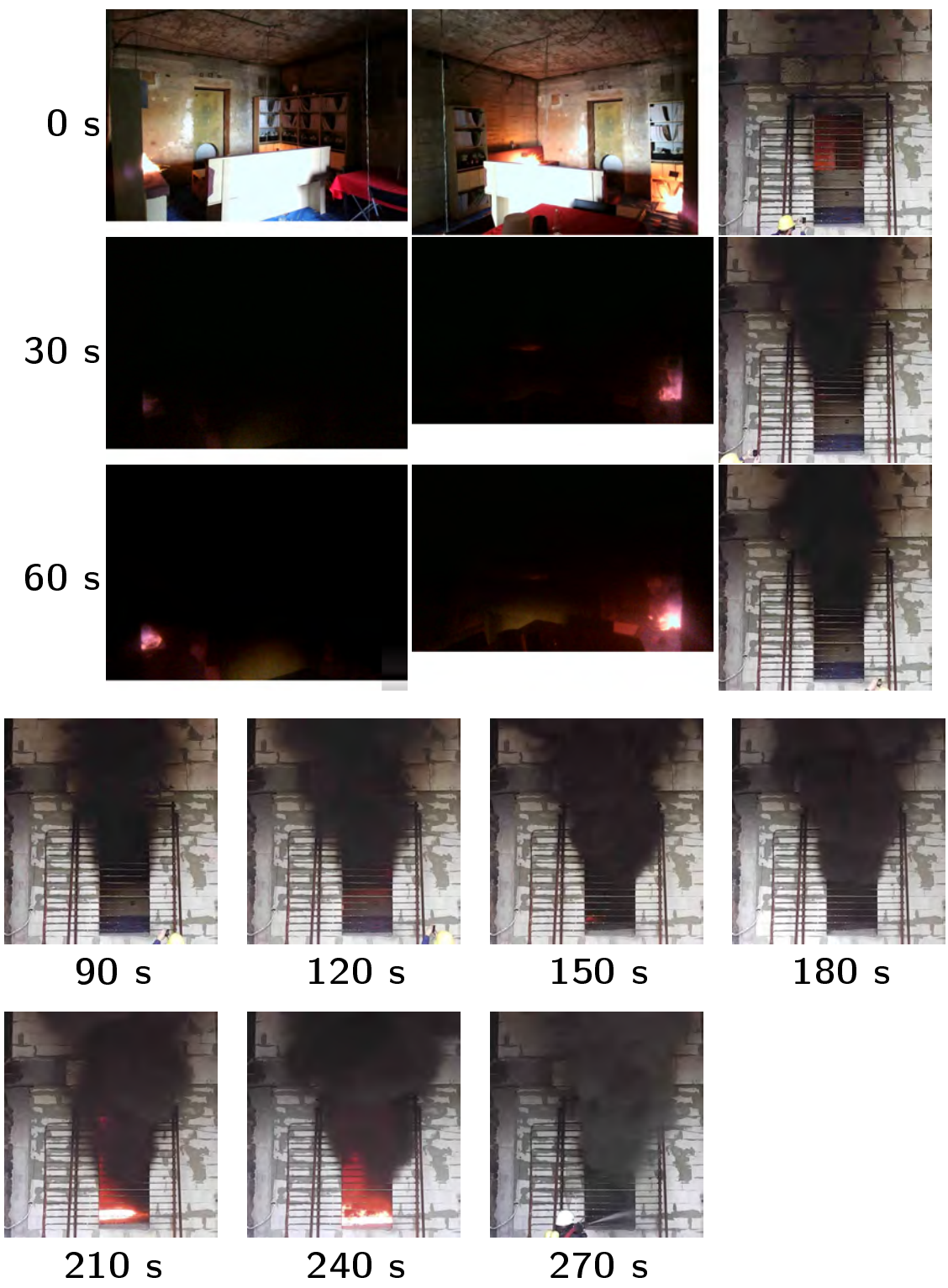


1770 s



1800 s

Versuch MFPA_Zimmer_005



C.2.5 Brandraum nach dem Versuch



Abbildung C.53: MFPA_Zimmer_004: Brandschutt Regal 1, Blick von der rückseitigen Zugangstür, Aufnahme am Morgen nach dem Versuch. Die Kataloge aus Regal 1 sind zum Großteil noch erhalten.



Abbildung C.54: Brandschutt Regalecke Versuch MFPA_Zimmer_004, Blick von der rückwärtigen Zugangstür, Aufnahme am Morgen nach dem Versuch. Die Kataloge aus den Regalen sind zum Großteil noch erhalten.



Abbildung C.55: MFPA_Zimmer_002: Brandschutt Sofa 1, Blick aus der Raummitte, Aufnahme am Morgen nach dem Versuch. Die Kataloge aus Regal 1 sind zum Großteil noch erhalten und liegen auf dem Boden und dem Sofa. Die Spanplatte von Sofa 1 ist ebenfalls noch fast vollflächig erhalten.



Abbildung C.56: MFPA_Zimmer_002: Brandschutt Esstisch, Blick aus der Referenzecke, Aufnahme am Morgen nach dem Versuch. Die Tischplatte ist zum Großteil noch erhalten.



Abbildung C.57: MFPA_Zimmer_002: Brandschutt Regalecke, Blick von der rückseitigen Zugangstür, Aufnahme am Morgen nach dem Versuch. Die Kataloge aus den Regalen sind zum Großteil noch erhalten.



Abbildung C.58: Brandraum nach Versuch MFPA_Zimmer_005: Übersichtsaufnahme durch die Brandraumöffnung



Abbildung C.59: Brandrückstand Sofa nach Versuch MFPA_Zimmer_005



Abbildung C.60: Brandrückstand Esstisch nach Versuch MFPA_Zimmer_005



Abbildung C.61: MFPA_-Zimmer_005: Tapetenelement 1 nach dem Versuch



Abbildung C.62: MFPA_-Zimmer_005: Tapetenelement 2 und Referenzecke nach dem Versuch



Abbildung C.63: MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand Teppichboden vor der Brandraumöffnung



Abbildung C.64: MFPA_-Zimmer_005: Brandrückstand Regal 1



Abbildung C.65: MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand Sofa 1



Abbildung C.66: MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand Couchtisch



Abbildung C.67: MFPA_Zimmer_005: Regalecke nach dem Versuch



Abbildung C.68: MFPA_Zimmer_005: Brandschutt in der Regalecke



Abbildung C.69: MFPA_Zimmer_005: Brandrückstand PUR in Regal 5



Abbildung C.70: MFPA_Zimmer_005: Teppichboden in der Regalecke nach dem Versuch, Teppichelement entfernt

C.2.6 Vergleichsgegenstände



vor Versuch



MFWA_Zimmer_001



MFWA_Zimmer_002



MFWA_Zimmer_003



MFWA_Zimmer_004



MFWA_Zimmer_005

Abbildung C.71: Bildtafel der Vergleichsgegenstände in der Referenzecke (Position X0 _01) vor und nach dem Versuch im Fundkontext



vor Versuch



MFPA_Zimmer_001



MFPA_Zimmer_002



MFPA_Zimmer_003



MFPA_Zimmer_004



MFPA_Zimmer_005

Abbildung C.72: Bildtafel der Vergleichsgegenstände auf dem Couchtisch (Position X0 _02) vor und nach dem Versuch im Fundkontext



vor Versuch



MFPA_Zimmer_001



MFPA_Zimmer_002



MFPA_Zimmer_003



MFPA_Zimmer_004



MFPA_Zimmer_005

Abbildung C.73: Bildtafel der Vergleichsgegenstände auf Regal 3 (Position X0 _03) vor und nach dem Versuch im Fundkontext



vor Versuch



MFPA_Zimmer_001



MFPA_Zimmer_002



MFPA_Zimmer_003



MFPA_Zimmer_004



MFPA_Zimmer_005

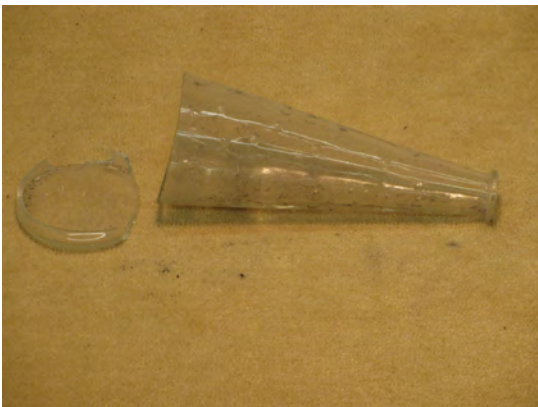
Abbildung C.74: Bildtafel der Vergleichsgegenstände auf dem Esstisch (Position X0_04) vor und nach dem Versuch im Fundkontext



a) MFPA_Zimmer_001_X02_01



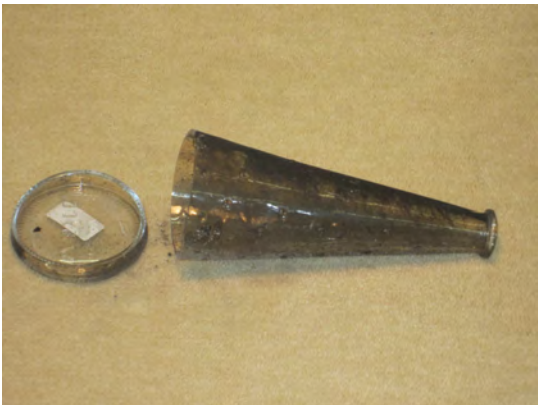
b) MFPA_Zimmer_002_X02_01



c) MFPA_Zimmer_003_X02_01

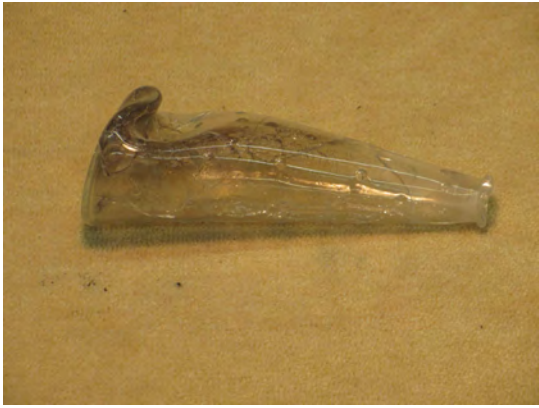


d) MFPA_Zimmer_004_X02_01



e) MFPA_Zimmer_005_X02_01

Abbildung C.75: Detailansichten der Proben X02_01 (Glasvasen in der Referenzecke) außerhalb des Fundkontexts



a) MFPA_Zimmer_001_X02_02



b) MFPA_Zimmer_002_X02_02



c) MFPA_Zimmer_003_X02_02



d) MFPA_Zimmer_004_X02_02



e) MFPA_Zimmer_005_X02_02

Abbildung C.76: Detailansichten der Proben X02_02 (Glasvasen auf dem Couchtisch) außerhalb des Fundkontexts



a) MFPA_Zimmer_003_X02_03



b) MFPA_Zimmer_004_X02_03



c) MFPA_Zimmer_005_X02_03

Abbildung C.77: Detailansichten der Proben X02_03 (Glasvasen auf Regal 3) außerhalb des Fundkontexts



a) MFPA_Zimmer_001_X02_04



b) MFPA_Zimmer_002_X02_04



c) MFPA_Zimmer_003_X02_04



d) MFPA_Zimmer_004_X02_04



e) MFPA_Zimmer_005_X02_04

Abbildung C.78: Detailansichten der Proben X02_04 (Glasvasen auf dem Esstisch) außerhalb des Fundkontexts



a) MFPA_Zimmer_001_X04_01



b) MFPA_Zimmer_001_X04_01



c) MFPA_Zimmer_003_X04_01



d) MFPA_Zimmer_004_X04_01



e) MFPA_Zimmer_005_X03_01 und
X04_01

Abbildung C.79: Detailansichten der Proben X04_01 (Tischlampe in der Referenzecke) und X03_01 (Kunststoffvase in der Referenzecke) außerhalb des Fundkontexts



a) MFPA_Zimmer_001_X04_02



b) MFPA_Zimmer_002_X04_02



c) MFPA_Zimmer_005_X04_02

Abbildung C.80: Detailansichten der Proben X04_02 (Tischlampe auf dem Couchtisch) außerhalb des Fundkontexts



a) MFPA_Zimmer_002_X04_04



b) MFPA_Zimmer_004_X04_04



c) MFPA_Zimmer_005_X03_04 und
X04_04

Abbildung C.81: Detailansichten der Proben X04_04 (Tischlampe auf dem Esstisch) und X03_04 (Kunststoffvase auf dem Esstisch) außerhalb des Fundkontexts

C.2.7 Panoramen des Brandraums

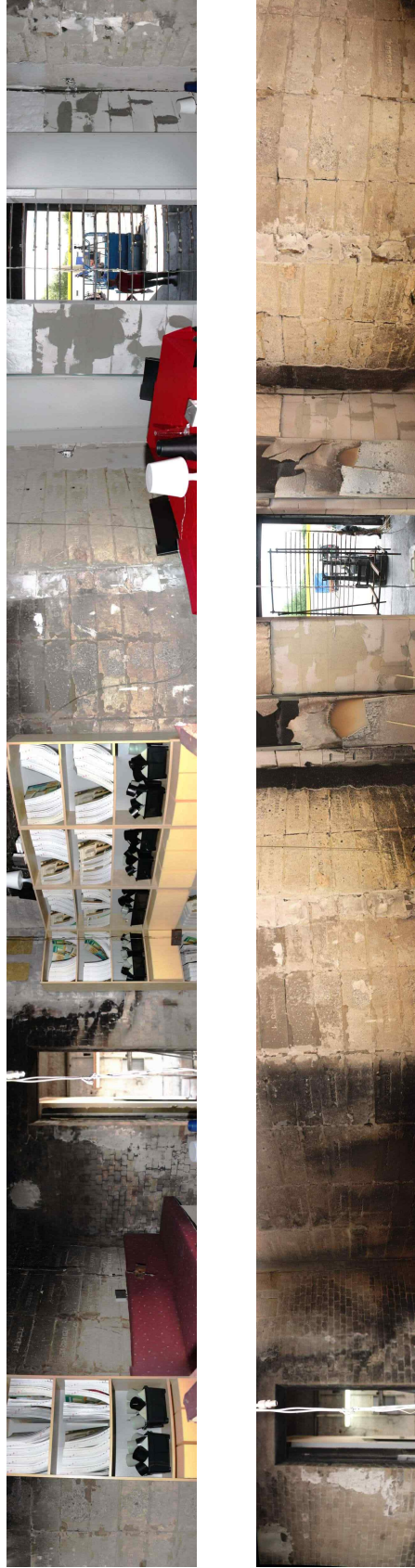


Abbildung C.82: Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_001

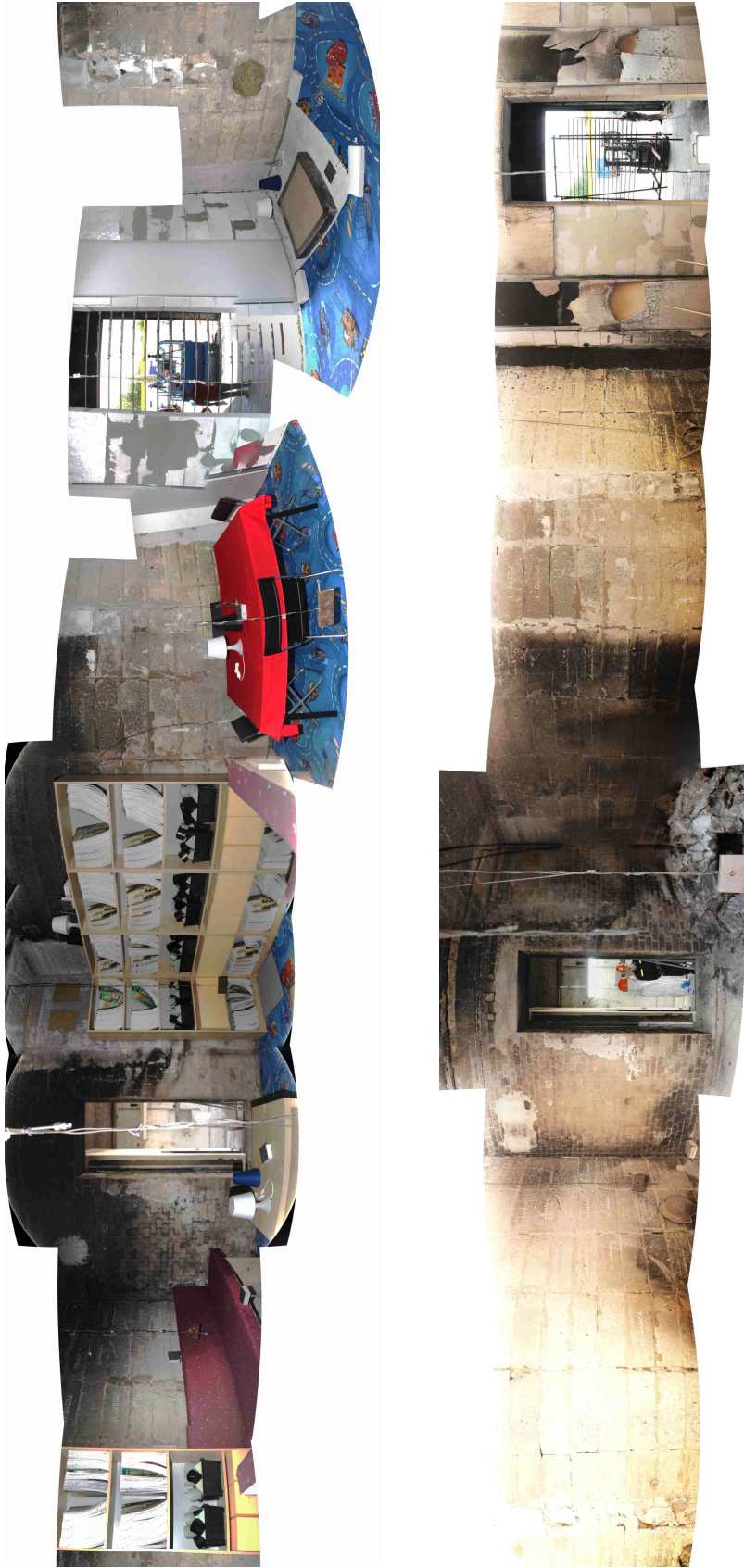


Abbildung C.83: Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_001



Abbildung C.84: Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_002



Abbildung C.85: Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_002



Abbildung C.86: Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_003



Abbildung C.87: Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_003



Abbildung C.88: Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_004

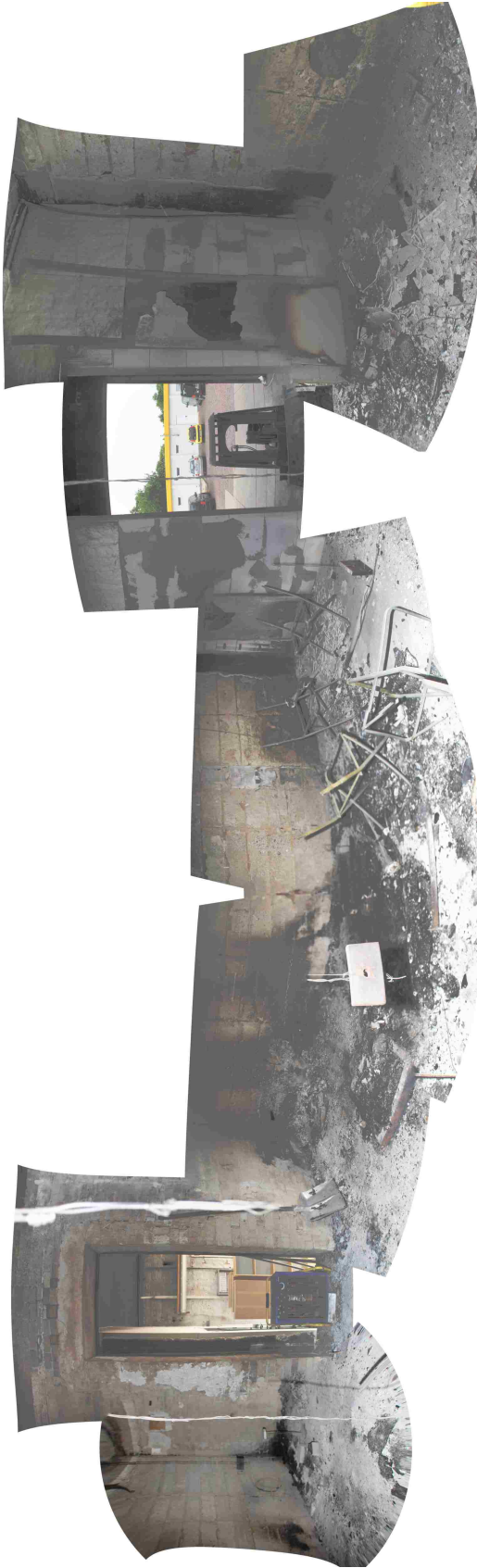


Abbildung C.89: Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_004



Abbildung C.90: Panorama (Wandansicht) Versuch MFPA_Zimmer_005



Abbildung C.91: Panorama (Gesamtansicht) Versuch MFPA_Zimmer_005

Anhang D

Tabellen

Tabelle D.1: Thermophysikalische Eigenschaften der Umfassungsbauteile des Brandraums
(Werte nach Angaben von Erhardt Wilk, vgl. [1, 2])

Größe	Einheit	Mineralwolle	Porenbeton	Feuerbeton
Rohdichte ρ	kg m^{-3}	100	700	2700
Wärmeleitfähigkeit λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,044	0,21	1,9
Wärmekapazität c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,819	0,94	1,0

Tabelle D.2: Beschreibung der brennbaren und nichtbrennbaren Gegenstände im Brandraum

Nr	Gegenstand	Beschreibung	Lieferant
1	Teppich	Teppich <i>Cars</i> , blau, Schlingenteppich aus Polyamid (PA6.6), Höhe ca. 7 mm, Flächengewicht ca. 1030 g m ⁻² (Herstellerangaben)	Teppich Kibek GmbH, Filiale Spandau, Berlin
2	Regal	Regal <i>Kilby</i> , 5 Fächer, Abmessungen (BTH) 67 cm, 24 cm, 194 cm, Böden aus Spanplatte mit Folienbeschichtung, Rückpaneel aus Hartfaserplatte, Seitenteile aus Spanplattenrahmen mit Füllung aus Papier/Hartfaserplatte und Folienbeschichtung	IKEA Leipzig
3	Sofa – Spanplatte	Rohspanplatte V20, Dicke 1,6 cm, Masse aus Differenz der gemessenen Masse der Sofas (Mittelwert) und den anderen Sofabauteilen bestimmt, kleiner Abzug für Schrauben etc.	OBI Baumarkt Berlin-Neukölln
4	Sofa – PUR	Polyurethanschaum auf Polyetherbasis <i>CP 4050</i> , CT Formpolster GmbH, Abmessungen (BTH) 200 cm, 50 cm, 8 cm, Dichte 38,5 kg m ⁻³ (Herstellerangaben), Dichte 37,4 kg m ⁻³ (eigene Berechnung aus Masse und Volumen)	Weissbach GmbH, Berlin
5	Sofa – Stoff	Möbelstoff <i>Büsum</i> , Artikel-Nr 247361, Farbe 65, 100% Baumwolle, Flächengewicht 345 g m ⁻²	Ewald Reich Möbelstoffweberei, Gefrees
6	Sofa – Polsterwatte	<i>Sawafloor 4814</i> , Polyester, Flächengewicht 200 g m ⁻² (Herstellerangabe), Abmessungen (BT) 200 cm, 50 cm	Weissbach GmbH, Berlin

Tabelle D.2: Beschreibung der brennbaren und nichtbrennbaren Gegenstände im Brandraum (Forts.)

Nr	Gegenstand	Beschreibung	Lieferant
7	Regal – PUR	Polyurethanschaum auf Polyetherbasis <i>CP 4050</i> , CT Formpolster GmbH, Abmessungen (BTH) 20 cm, 25 cm, 30 cm, Dichte $38,5 \text{ kg m}^{-3}$ (Herstellerangabe), Dichte $37,4 \text{ kg m}^{-3}$ (eigene Berechnung aus Masse und Volumen)	Weissbach GmbH, Berlin
8	Regal – Box	Box <i>Samla</i> , Abmessungen (BTH) 28 cm, 19 cm, 14 cm, Polypropylen	IKEA Leipzig
9	Regal – PA in Box	Polyamid Spritzgussformteile, verfüllt und unverfüllt, Masse aus Differenz zwischen Box gefüllt und Box leer berechnet	Spende BASF SE
10	Regal – Katalog (einzeln)	Katalog <i>boesner 2011/2012</i> , Abmessungen (BTH) 5,2 cm, 29,7 cm, 21 cm	Spende ALBA Abfallentsorgung Berlin
11	Esstisch – Tischplatte	Spanplatte mit Melamindekor nach DIN EN 14322, Abmessungen (BTH) 150 cm, 100 cm, 1,6 cm	Glunz AG, Werk Nettgau
12	Esstisch – Tischdecke	Stoff <i>Ditte</i> , rot, 100% Baumwolle, Abmessungen (BT) 200 cm, 140 cm, Flächengewicht 210 g m^{-2} (Herstellerangabe)	IKEA Leipzig
13	Stuhl – Sitzfläche	Stuhl <i>Jeff</i> , Polypropylen	IKEA Leipzig
14	Stuhl – Rückenlehne	Stuhl <i>Jeff</i> , Polypropylen	IKEA Leipzig

Tabelle D.2: Beschreibung der brennbaren und nichtbrennbaren Gegenstände im Brandraum (Forts.)

Nr	Gegenstand	Beschreibung	Lieferant
15	Couchtisch	Couchtisch <i>Lack</i> , Abmessungen (BTH) 90 cm, 55 cm, 45 cm, Beine aus Hartfaserplatte/Spanplatte/Folienbeschichtung, Ablagefläche aus Spanplatte/Folienbeschichtung, Platte aus Spanplattenrahmen mit Füllung aus Papier/Hartfaserplatte und Folienbeschichtung	IKEA Leipzig
16	Tischlampe – Fuß	Tischlampe <i>Lampan</i> , Höhe 29 cm, Fußdurchmesser 13 cm, Schirmdurchmesser 19 cm, Fuß SAN-Kunststoff, Annahme: Massenverhältnis Schirm/Gestell = 1:1	IKEA Leipzig
17	Tischlampe – Schirm	Tischlampe <i>Lampan</i> , Höhe 29 cm, Fußdurchmesser 13 cm, Schirmdurchmesser 19 cm, Schirm Polypropylen, Annahme: Massenverhältnis Schirm/Gestell = 1:1	IKEA Leipzig
18	Vase Kunststoff	Vase <i>Ovanlig</i> , Höhe 20 cm, Polypropylen	IKEA Leipzig
19	Spanprobekörper – Spanplatte	Rohspanplatte, Abmessungen (BTH) 50 cm, 50 cm, 1,6 cm	Glunz AG, Werk Nettgau
20	Esstisch – Tischbein	Tischbein <i>Vika Adils</i>	IKEA Leipzig
21	Stuhl – Gestell	Stuhl <i>Jeff</i> , verzinkter Stahl	IKEA Leipzig
22	Vase Glas	Vase <i>Snärtig</i> , Höhe 18 cm, Klarglas	IKEA Leipzig

Tabelle D.2: Beschreibung der brennbaren und nichtbrennbaren Gegenstände im Brandraum (Forts.)

Nr	Gegenstand	Beschreibung	Lieferant
23	Teppichelement	Teppich <i>Prisma</i> (Polyamid Schlingenteppich, Vorwerk Teppichwerke), mit Kleber für Teppich und PVC auf Faserzementplatte Eternit <i>Eterplan</i> befestigt, Abmessungen (BT) 50 cm, 50 cm, Höhe der Faserzementplatte 8 mm, Höhe des Teppichs 4 mm (zu den Massen s. Tab. D.4)	
24	Spanprobekörper – Probekörperrahmen	3 mm Edelstahlblech	Eigenbau
25	Spanprobekörper – Isoliermaterial	<i>Promaglaf HTI 1200</i> , Dichte 130 kg m^{-3} , Abmessungen (BTH) 55 cm, 55 cm, 3,8 cm	Promat GmbH, Ratingen
26	Spanprobekörper – Calciumsilikatplatte	<i>Silcapan 850</i> , Abmessungen (BTH) 50 cm, 50 cm, 1,2 cm, Dichte 833 kg m^{-3}	
27	Ständer Plattenthermometer	Halterung für Plattenthermometer, Höhe des horizontalen Plattenthermometers 60 cm (entspricht Oberkante Sofasitzfläche)	Eigenbau
28	Plattenthermometer	Plattenthermometer aus 0,5 mm dickem Edelstahlblech, Isolierung aus Promaglaf HTI 1200 (Dicke 3,5 cm) und Calciumsilikatplatte (Dicke 1,2 cm), Masseangabe inkl. Isolierung und Calciumsilikatplatte	Eigenbau

Tabelle D.2: Beschreibung der brennbaren und nichtbrennbaren Gegenstände im Brandraum (Forts.)

Nr	Gegenstand	Beschreibung	Lieferant		
29	Thermoelemente	Masse über Dichte (Inconel $8,47 \text{ g cm}^{-3}$) bei einer angenommenen Länge im Raum von 4 m abgeschätzt, Anzahl mit Durchmesser 1,0 mm 11 Stück, Durchmesser 1,5 mm 16 Stück			
30	Steine	Mauersteine zur Beschwerung des Teppichs, Abmessungen (BTH) 24 cm, 11,5 cm, 7 cm			
31	Tapetenelement – Gipskartonbauplatte	Gipskartonbauplatte 9,5 mm, Abmessungen (BH) 60 cm, 260 cm, Flächengewicht ca. $7,5 \text{ kg m}^{-2}$	OBI	Baumarkt	Berlin-Neukölln
32	Tapetenelement – Aluminiumprofile	CW Profilständerwerk 50 mm auf 50 mm, Länge 260 cm	OBI	Baumarkt	Berlin-Neukölln
33	Tapetenelement – Tapete	Raufasertapete OBI Mittelkorn weiß, Breite 53 cm	OBI	Baumarkt	Berlin-Neukölln
34	Tapetenelement – Kleister	Tapetenkleister Spezial Classic 200 g	OBI	Baumarkt	Berlin-Neukölln

Tabelle D.3: Masse nichtbrennbarer Gegenstände im Brandraum

Nr	Gegenstand	Anzahl	Gesamtmasse in kg
20	Esstisch – Tischbein	4	2,5
21	Stuhl – Gestell	4	7,4
22	Vase Glas	4	1,1
23	Teppichelement	1	4,5
24	Spanprobekörper – Probekörperrahmen	2	14
25	Spanprobekörper – Isoliermaterial	2	3
26	Spanprobekörper – Silikaplatte	2	5
27	Ständer Plattenthermometer	2	10
28	Plattenthermometer	11	2,2
29	Thermoelemente	1	1
30	Steine	5	15
	Summe		65,7

Tabelle D.4: Masse der Teppichelemente und ihrer Einzelteile

Versuch	Teppich- element	Gesamt- masse in g	Masse Teppich in g	Masse Faserzementplatte in g	Masse Kleber in g
MFPA_Zimmer_001	T01	4539	471	3958	110
MFPA_Zimmer_002	T02	4551	470	3944	137
MFPA_Zimmer_003	T03	4573	472	3968	133
MFPA_Zimmer_004	T04	4481	464	3897	120
MFPA_Zimmer_005	T05	4609	462	4027	120
Mittelwert		4551	468	3959	124

Tabelle D.5: Brandlast der Brandbeschleuniger

Versuch	Brandbeschleunigervolumen in l	Brandlast in MJ
MFPA_Zimmer_001	–	–
MFPA_Zimmer_002	1	33,8
MFPA_Zimmer_003	0,5	16,9
MFPA_Zimmer_004	1,5	50,8
MFPA_Zimmer_005	1,5	50,8
Dichte Benzin 740 kg m^{-3}		
Dichte Diesel 830 kg m^{-3}		
Heizwert Benzin $43,7 \text{ MJ kg}^{-1}$ [24, Tab. C.4]		
Heizwert Diesel $42,5 \text{ MJ kg}^{-1}$		

Tabelle D.6: Datenlogger zur Messwertaufzeichnung

Datenlogger MFPA:	Hewlett Packard 34401A Multimeter
Messstellen:	G2, G3, M1, P1, D1, D2, T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7
Datenlogger BAM:	Keithley Model 2701 Ethernet
Messstellen:	T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16, T17

Tabelle D.7: Messstellenübersicht

Messstelle	Lage	Beschreibung
G1	Brandraum, Sofa Raummitte, Höhe ca. 148 cm	FTIR-Spektrometer (Thermo Scientific Nicolet 380, Transferleitung und Zelle beheizt 180 °C, Auflösung 0,5 cm ⁻¹ , Zellenvolumen 0,2l, optische Weglänge 2 m) und Gasanalysator (Servomex Multipurpose 5200, Sauerstoff (paramagnetischer Sensor) und Kohlendioxid (Infrarotsensor))
G2	Brandraum, Raummitte, unter Decke	Gasanalysator (Maihak Multor 610, Sauerstoff (paramagnetischer Sensor) und Kohlendioxid (Infrarotsensor)) und Messgasaufbereitung (M&C CSS-M, Partikelfilter und Kühlfalle)
G3	Schlot	Gasanalysator (Maihak Oxor 6N, Sauerstoff (paramagnetischer Sensor)) und Gasanalysator (Maihak Finor, Kohlendioxid (Infrarotsensor)) und Messgasaufbereitung (M&C CSS-M, Partikelfilter und Kühlfalle)
G4	Schlot	FTIR-Spektrometer (Ansyco Gasmeter DX4000N, Zelle beheizt 50 °C, Auflösung 8 cm ⁻¹ , Zellenvolumen 0,5l, optische Weglänge 5 m) und Gasanalysator (Servomex Multipurpose 5200, Sauerstoff (paramagnetischer Sensor))

Tabelle D.7: Messstellenübersicht (Forts.)

Messstelle	Lage	Beschreibung
G5	Öffnung Brandraum	FTIR-Spektrometer (Ansyco Gaset DX4000N, Zelle beheizt 50 °C, Auflösung 8 cm ⁻¹ , Zellenvolumen 0,5l, optische Weglänge 5 m) und Gasanalysator (Servomex Multipurpose 5200, Sauerstoff (paramagnetischer Sensor))
K1	Brandraum, linke Wand	Netzwerkkamera Edimax IC-3015Wn
K2	Brandraum, rechte Wand	Netzwerkkamera Edimax IC-3015Wn
K3	Vorraum, zentriert vor Brandraumöffnung	Videokamera Panasonic HC-V100EG-K
K4	Vorraum, zentriert vor Brandraumöffnung	Infrarotkamera FLIR ThermoCAM S65 (Abstand 7,5 m, Atmosphärentemperatur 15 °C, relative Luftfeuchtigkeit 30 %, Emissionsgrad 0,9)
K5	Vorraum, seitlich	Videokamera
K6	Vorraum, seitlich	Infrarotkamera FLIR P620
K7	Vorraum, seitlich	Netzwerkkamera Edimax IC-3030Wn
M1	Unter Brandraum	Waage
P1	Brandraumdecke Raummitte (wie G2)	Druckdifferenz (Überdruck) zu Außenbereich
D1.1	Brandraumöffnung, $H = 13 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 2
D1.2	Brandraumöffnung, $H = 26 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 2
D1.3	Brandraumöffnung, $H = 39 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.4	Brandraumöffnung, $H = 52 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.5	Brandraumöffnung, $H = 65 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.6	Brandraumöffnung, $H = 78 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1

Tabelle D.7: Messstellenübersicht (Forts.)

Messstelle	Lage	Beschreibung
D1.7	Brandraumöffnung, $H = 91 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.8	Brandraumöffnung, $H = 104 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.9	Brandraumöffnung, $H = 117 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.10	Brandraumöffnung, $H = 130 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.11	Brandraumöffnung, $H = 143 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.12	Brandraumöffnung, $H = 156 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.13	Brandraumöffnung, $H = 169 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.14	Brandraumöffnung, $H = 182 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.15	Brandraumöffnung, $H = 195 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D1.16	Brandraumöffnung, $H = 208 \text{ cm}$	Bidirektionale Sonde, Größe 1
D2.1	Schlot	Bidirektionale Sonde, Größe 2
D2.2	Schlot	Bidirektionale Sonde, Größe 2
D2.3	Schlot	Bidirektionale Sonde, Größe 2
D2.4	Schlot	Bidirektionale Sonde, Größe 2
D2.5	Schlot	Bidirektionale Sonde, Größe 2
D2.6	Schlot	Bidirektionale Sonde, Größe 2
T1.1	Brandraumöffnung, $H = 13 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.2	Brandraumöffnung, $H = 26 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.3	Brandraumöffnung, $H = 39 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.4	Brandraumöffnung, $H = 52 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.5	Brandraumöffnung, $H = 65 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.6	Brandraumöffnung, $H = 78 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm

Tabelle D.7: Messstellenübersicht (Forts.)

Messstelle	Lage	Beschreibung
T1.7	Brandraumöffnung, $H = 91 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.8	Brandraumöffnung, $H = 104 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.9	Brandraumöffnung, $H = 117 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.10	Brandraumöffnung, $H = 130 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.11	Brandraumöffnung, $H = 143 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.12	Brandraumöffnung, $H = 156 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.13	Brandraumöffnung, $H = 169 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.14	Brandraumöffnung, $H = 182 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.15	Brandraumöffnung, $H = 195 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T1.16	Brandraumöffnung, $H = 208 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T2.1	Schlot	Mantelthermoelement, 3 mm
T2.2	Schlot	Mantelthermoelement, 3 mm
T2.3	Schlot	Mantelthermoelement, 3 mm
T2.4	Schlot	Mantelthermoelement, 3 mm
T2.5	Schlot	Mantelthermoelement, 3 mm
T2.6	Schlot	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.1	Brandraum, Referenzecke, $H = 7 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.2	Brandraum, Referenzecke, $H = 20 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.3	Brandraum, Referenzecke, $H = 33 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.4	Brandraum, Referenzecke, $H = 46 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.5	Brandraum, Referenzecke, $H = 59 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.6	Brandraum, Referenzecke, $H = 72 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm

Tabelle D.7: Messstellenübersicht (Forts.)

Messstelle	Lage	Beschreibung
T3.7	Brandraum, Referenzecke, $H = 85 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.8	Brandraum, Referenzecke, $H = 98 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.9	Brandraum, Referenzecke, $H = 111 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.10	Brandraum, Referenzecke, $H = 124 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.11	Brandraum, Referenzecke, $H = 136 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.12	Brandraum, Referenzecke, $H = 150 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.13	Brandraum, Referenzecke, $H = 163 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.14	Brandraum, Referenzecke, $H = 176 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.15	Brandraum, Referenzecke, $H = 189 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.16	Brandraum, Referenzecke, $H = 202 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.17	Brandraum, Referenzecke, $H = 215 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.18	Brandraum, Referenzecke, $H = 228 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.19	Brandraum, Referenzecke, $H = 241 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.20	Brandraum, Referenzecke, $H = 254 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.21	Brandraum, Referenzecke, $H = 267 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T3.22	Brandraum, Referenzecke, $H = 283 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T4.1	Brandraum, neben Esstisch, $H = 70 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T4.2	Brandraum, neben Esstisch, $H = 110 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T4.3	Brandraum, neben Esstisch, $H = 150 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T4.4	Brandraum, neben Esstisch, $H = 190 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T4.5	Brandraum, neben Esstisch, $H = 230 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T4.6	Brandraum, neben Esstisch, $H = 270 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm

Tabelle D.7: Messstellenübersicht (Forts.)

Messstelle	Lage	Beschreibung
T5.1	Brandraum, Sofa 2, $H = 70 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T5.2	Brandraum, Sofa 2, $H = 110 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T5.3	Brandraum, Sofa 2, $H = 150 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T5.4	Brandraum, Sofa 2, $H = 190 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T5.5	Brandraum, Sofa 2, $H = 230 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T5.6	Brandraum, Sofa 2, $H = 270 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T6.1	Brandraum, Sofa 1, $H = 70 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T6.2	Brandraum, Sofa 1, $H = 110 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T6.3	Brandraum, Sofa 1, $H = 150 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T6.4	Brandraum, Sofa 1, $H = 190 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T6.5	Brandraum, Sofa 1, $H = 230 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T6.6	Brandraum, Sofa 1, $H = 270 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T7.1	Brandraum, Regalecke, $H = 70 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T7.2	Brandraum, Regalecke, $H = 110 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T7.3	Brandraum, Regalecke, $H = 150 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T7.4	Brandraum, Regalecke, $H = 190 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T7.5	Brandraum, Regalecke, $H = 230 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T7.6	Brandraum, Regalecke, $H = 270 \text{ cm}$	Mantelthermoelement, 3 mm
T8.1	Spanprobekörper Referenzecke, Plattenthermometer	Plattenthermometer, Kupfer (MTE 1 mm)
T8.2	Spanprobekörper Referenzecke, Gasphase	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T8.3	Spanprobekörper Referenzecke, Probertemperatur, Tiefe ab Oberfläche 3 mm	Mantelthermoelement, 1,5 mm

Tabelle D.7: Messstellenübersicht (Forts.)

Messstelle	Lage	Beschreibung
T8.4	Spanprobekörper Referenzecke, Tiefe ab Oberfläche 8 mm	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T8.5	Spanprobekörper Referenzecke, Tiefe ab Oberfläche 13 mm	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T9.1	Plattenthermometer Referenzecke	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T9.2	Plattenthermometer Referenzecke, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T10.1	Plattenthermometer Esstisch	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T10.2	Plattenthermometer Esstisch, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T11.1	Plattenthermometer Sitzfläche Sofa 2	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T11.2	Plattenthermometer Sitzfläche Sofa 2, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T12.1	Spanprobekörper Raum, Plattenthermometer	Plattenthermometer, Kupfer (MTE 1 mm)
T12.2	Spanprobekörper Raum, Gasphase	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T12.3	Spanprobekörper Raum, Proben temperatur, Tiefe ab Oberfläche 3 mm	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T12.4	Spanprobekörper Raum, Proben temperatur, Tiefe ab Oberfläche 8 mm	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T12.5	Spanprobekörper Raum, Proben temperatur, Tiefe ab Oberfläche 13 mm	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T13.1	Plattenthermometer Raum Boden	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T13.2	Plattenthermometer Raum Boden, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T14.1	Plattenthermometer Sitzfläche Sofa 1	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T14.2	Plattenthermometer Sitzfläche Sofa 1, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm

Tabelle D.7: Messstellenübersicht (Forts.)

Messstelle	Lage	Beschreibung
T15.1	Plattenthermometer Lehne Sofa 1, vertikal	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T15.2	Plattenthermometer Lehne Sofa 1, vertikal, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T16.1	Plattenthermometer Couchtisch	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T16.2	Plattenthermometer Couchtisch, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm
T17.1	Plattenthermometer Regal 3 horizontal	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T17.2	Plattenthermometer Regal 3 vertikal	Plattenthermometer, Edelstahl (MTE 1 mm)
T17.3	Plattenthermometer Regal 3, Gastemperatur	Mantelthermoelement, 1,5 mm

Tabelle D.8: Volumenströme durch die Gasanalysatoren in l min^{-1} . Die Lage der Messpunkte kann den Abbildungen C.16 bis C.16 entnommen werden.

Messstelle/Messpunkt	Gerät	Versuch MFPA_Zimmer_				
		001	002	003	004	005
G1/A	FTIR-Spektrometer	2,1	2,8	2,4	2,5	2,2
G1/B	Sauerstoffanalysator	0,634	0,638	0,638	0,68	0,65
G4/A	FTIR-Spektrometer	3,76	3,7	3,41	3,998	3,904
G4/B	Sauerstoffanalysator	0,7	0,17	0,66	0,763	0,72
G5/A	FTIR-Spektrometer	3,2	3,4	3,39	3,448	3,514
G5/B ^a	Sauerstoffanalysator		2,5	2,6	2,668	2,668

^a Der Sauerstoffanalysator G5 hat keine integrierte Pumpe und einen integrierten Bypass. Der gemessene und angegebene Volumenstrom ist nicht der Strom des Analyse-gases sondern der des Bypasses. Um die Werte mit den anderen Sauerstoffanaly-satoren vergleichen zu können, muss die Differenz aus den Werten der Messpunkte G5/A und G5/B gebildet werden.

Tabelle D.9: Umgebungsbedingungen

Versuchsnummer	Datum	Luftdruck	Lufttemperatur	absolute	relative Luft-
		in hPa	in °C	Luftfeuchtig- keit	feuchtigkeit
				in Vol%	in %
MFPA_Zimmer_001	12.06.2012	1040	21,4	1,25	51
MFPA_Zimmer_002	13.06.2012	1050	18,7	1,23	60
MFPA_Zimmer_003 ^a	14.06.2012	1030	19,0	1,11	52
MFPA_Zimmer_004 ^b	18.06.2012	1010	29,5	1,80	44
MFPA_Zimmer_005	19.06.2012	998	25,4	1,14	35

^a erstmalig Regen innerhalb der Versuchsserie vormittags.

^b Starker Wind während Versuchsdurchführung, tlw. Rauchwirbelungen im Vorraum des Versuchsstands und beobachtbare Beeinflussung der Konvektionsströmung durch den Schlot.

Tabelle D.10: Zeitpunkte Ausfall Plattenthermometer

Plattenthermometer		MFPA _Zimmer_				
		001	002	003	004	005
T8.1	Spanplattenprobekörper Referenzecke	1108	760	770	815	–
T9.1	Referenzecke	1108	760	770	815	–
T10.1	Esstisch	1200	–	1310	1650	–
T11.1	Sitzfläche Sofa 2 ^a	–	–	–	–	–
T12.1	Spanplattenprobekörper Raum	730	350	90	123	–
T13.1	Raum	730	300	90	93	83
T14.1	Sitzfläche Sofa 1 ^a	–	–	–	–	–
T15.1	Lehne Sofa 1	760	–	400	600	–
T16.1	Couchtisch	840	450	320	360	270
T17.1/.2	Regalecke	840	450	320	360	–

^a Aufgrund der Lage oder Befestigung wurden diese Plattenthermometer nie in ihrer Lage verändert oder durch Brandschutt verschüttet.

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden

Versuch 001			Versuch 002		Versuch 003		Versuch 004		Versuch 005	
			-60	Beginn Aufbringen Brandbeschleuniger	-50	Beginn Aufbringen Brandbeschleuniger	-70	Beginn Aufbringen Brandbeschleuniger	-56	Beginn Aufbringen Brandbeschleuniger
38	Ende Zündung mit Feuerzeug (Feuerzeug aus)	0	Sofa 1 Sitzfläche brennt nach Entzündung sofort vollflächig	15	Entzündung Regale 2 und 3	75	Teileinsturz Regal 2 oder 3	25	Rauchschicht ca. 1,5 m über Boden	
		75	Entzündung PUR in Regal 1	45	Flammenspitzen bis Decke	90	beginnende Rauchschichtung	45	Entzündung PUR in Regal 1	
		90	Außenfläche Regal 1 zu Sofa 1 brennt	45	brennendes Abtropfen PUR in den Regalen 2 und 3	90	weitere Teileinstürze in Regalecke	60	Pyrolyse Sofa 2	
				70	Entzündung Regal 4	90	Flammen in Regalecke bis unter die Decke	80	Kataloge fallen aus Regal 2 oder 3	
				70	Ein Regal stürzt ein (welches ist unklar)					
				90	Einsturz Regal 3 oder 4					

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden (Forts.)

Versuch 001	Versuch 002	Versuch 003	Versuch 004	Versuch 005
	110 brennendes Abtropfen PUR in Regal 1	100 Brandausbreitung auf Boden vor Regal	145 Pyrolyse Sofa 1 (Sitzfläche) beginnt	103 Teileinsturz Regal 2, 3 und/oder 4
	150 Entzündung PA-Boxen in Regal 1	100 Pyrolyse Sofa 2	160 Rauchschrift ca. 1,5 m über Boden	120 Entzündung Sofa 2
	155 Pyrolyse Sofa 2	120 Einsturz an Regalen	160 zunehmende Pyrolyse Sofa 1 (Sitzfläche)	130 weiteres Absinken der Rauchschrift
	190 obere Hälfte Regal 1 stürzt Richtung Sofa 1 ein	135 Pyrolyse Sofa 1	160 brennendes Abtropfen PUR in Regal 3, Entzündung des Teppichs vor Regal 3	130 brennendes Abtropfen PUR in Regal 1
	190 Teppich vor Regal 1 wird durch brennend herunterfallende Teile entzündet	145 Rauchschrift 1,5 m über Boden		135 Entzündung Tischdecke Esstisch
		165 vollständiger Einsturz Regal 2		145 Absinken der Rauchschrift auf ca. 0,3 m

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden (Forts.)

Versuch 001	Versuch 002	Versuch 003	Versuch 004	Versuch 005					
		175	Entzündung Sofa 2	145	pulsierender Rauchaustritt aus Brandraum- öffnung				
		189	Entzündung Sofa 1	165	Teileinsturz Re- gal 1				
		189	Entzündung PUR in Regal 1	170	Pyrolyse Teppich				
247	ein Drittel von Sofa 1 in Flam- men	205	Kataloge im un- teren Fach Regal 1 zünden	205	intermittierender Flammenaustritt aus Brandraum- öffnung	215	Entzündung Sofa 1 (Sitzfläche)	203	Flammenaustritt durch Brand- raumöffnung
		230	schnellere Brand- entwicklung an Regal 1, Flam- menspitzen bis Brandraumde- cke, Flammen breiten sich unter Decke aus	210	Rauchschicht 0,3 m über Boden	218	Entzündung Sofa 2	210	Flashover

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden (Forts.)

Versuch 001		Versuch 002		Versuch 003		Versuch 004		Versuch 005	
		280	Entzündung Sofa 2	240	Einsturz von Gegenständen hörbar	218	Entzündung Regal 1 ab PUR und oberhalb	220	Raum in Vollbrand
				260	Entzündung Tisch(-decke)	218	stark zunehmende Brandentwicklung	240	Beginn Löschen
				260	Flashover	280	Einsturz Regal 1		
				260	Flashover				
300	beginnende Rauchsichtung im Raum	300	Pyrolyse Teppich	325	brennendes Abtropfen Stuhlsitzflächen	300	Flammenaustritt aus Brandraumöffnung		
350	Sofa 1 in Vollbrand	350	Entzündung Teppich in der rechten Raumhälfte			300	Flashover		
350	Regal neben Sofa 1 entzündet	370	Flammenaustritt aus Brandraumöffnung						
390	PUR in Regal 1 zündet	380	Entzündung Esstisch(-decke)						
		390	Flashover						

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden (Forts.)

Versuch 001		Versuch 002		Versuch 003		Versuch 004		Versuch 005	
460	PUR-Schaum tropft brennend ab	400	massiver Flammenaustritt aus der oberen Hälfte der Brandraumöffnung	440	Lehne Sofa 2 bricht ab und fällt Richtung Brandraumöffnung	450	Lehne Sofa 2 bricht ab und fällt Richtung Brandraumöffnung		
490	PA in Regal 1 in Flammen	435	brennendes Abtropfen Stuhlsitzflächen						
502	Teppich vor Regal 1 zündet	565	Einsturz Sofa 2						
502	PA-Teile fallen nicht brennend aus Regal 1								
540	Regal 1 stürzt teilweise ein								
575	Kataloge fallen aus Regal 1								
620	Entzündung Sofa 2			660	Rauch wird dunkler, Rauchsicht senkt sich auf 0,3 bis 0,5 m über dem Boden ab			600	Versuchsende

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden (Forts.)

Versuch 001		Versuch 002		Versuch 003		Versuch 004		Versuch 005	
705	Höhe Rauchschicht ca. 1,5 m über Boden	720	Beginn Löschen	770	Tapetenelement 1 (links) stürzt ein	700	wieder zunehmende Rauchentwicklung (zuvor war hintere Zugangstür sichtbar)		
705	Sofa 2 in Vollbrand	760	Einsturz Tapetenelement 1 (links)	780	wenig Rauch im Brandraum, hintere Zugangsöffnung sichtbar	700	Absinken der Rauchsicht auf ca. 30 bis 50 cm über Boden		
750	Teppich pyrolysiert auf der gesamten Fläche								
780	Flashover, Raum in Vollbrand								
780	Flashover								
810	Entzündung Tapetenelement 1 (links)					815	Teileinsturz Tapetenelement 1 (links)		
810	Flammenaustritt								
870	Teppich verbrannt								
900	Sofa 2 stürzt ein								

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden (Forts.)

	Versuch 001	Versuch 002	Versuch 003	Versuch 004	Versuch 005		
1108	Tapetenelement 1 (links) stürzt ein	1200	Versuchsende	1800	Beginn Löschen	1295	Einsturz Tape- tenelement 1 (links)
1200	Beginn Löschein- satz (ca. 60 Se- kunden)					1320	Spanprobekörper Referenzecke brennt selbst- ständig
1200	Beginn Löschen			2020	Benzin olfakto- risch im Vorraum wahrnehmbar, Luftprobenahme LKA Berlin	1800	Beginn Löschen
1500	Immer wieder Wasserabgabe in den Brandraum durch die Brand- raumöffnung			2100	Versuchsende	2100	Versuchsende
1740	Wasserabgabe durch hintere Tür						
1800	Versuchsende						

Tabelle D.11: Zeitleiste, Zeitpunkte in Sekunden (Forts.)

	Versuch 001	Versuch 002	Versuch 003	Versuch 004	Versuch 005
1845	Wasserabgabe durch die Brandraumöffnung in den Brandraum				
2520	Lüftungsöffnung in hinterer Tür zum Brandraum geöffnet				

Anhang E

Anmerkungen zu einzelnen Geräten

Gasanalysatoren allgemein In Abhängigkeit vom Messgerät wurde die Konzentration in feuchtem oder getrocknetem Messgas gemessen (vgl. Tabelle E.1).

Zum Vergleich der Messwerte ist die Umrechnung feucht gemessener Gase in trockene Messung oder trocken gemessener Gase in feuchte Messung prinzipiell möglich.

Trocken gemessene Gase in feuchte Messung umzurechnen, erscheint nicht sinnvoll. Es liegt nicht an allen Messstellen die zeitaufgelöste Wasserdampfkonzentration vor (gemessen mit den FTIR-Spektrometern). Somit wäre eine Umrechnung nur mit der Wasserdampfkonzentration in der Umgebungsluft möglich, die allerdings dann den Wasserdampf, der bei der Verbrennungsreaktion entsteht nicht berücksichtigt. Die so umgerechneten Werte wären nicht direkt mit feucht gemessenen Werten vergleichbar.

Die Umrechnung feucht gemessener Werte in trockene Messung ist einfach umsetzbar, da die zeitaufgelöste Wasserdampfkonzentration für diese Messreihen vorliegt. Durch diese Umrechnung können die Messwerte aller Analysatoren miteinander verglichen werden. Deswegen wurden feucht gemessene Werte in trockene Messung umgerechnet. Bei der Interpretation der Werte muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich nicht um die real vorliegenden Konzentrationen, sondern um die Konzentrationen in trockener Luft handelt.

G4 Servomex Schlot Die Sauerstoffkonzentrationen am Schlot wurden während dem Versuch vom Display des Servomex abgeschrieben. Es erfolgte keine automatische Datenaufzeichnung. Die Zeit, die zu den einzelnen Konzentrationen notiert wurde, ist die Uhrzeit des FTIR am Schlot. Die Messreihe kann also wie die Daten des FTIR Schlot synchronisiert werden.

Tabelle E.1: Messgasaufbereitung

Messstelle	Messgerät	Partikelfilter	Trocknung	Trockenmittel
G1	FTIR	alle Versuche	nein	
G1	Servomex	alle Versuche	alle Versuche	Drierite
G2	IR-Analysator MFPA	alle Versuche	alle Versuche	Peltierkühler
G3	IR-Analysator MFPA	alle Versuche	alle Versuche	Peltierkühler
G4	FTIR	alle Versuche	nein	
G4	Servomex	alle Versuche	nein	
G5	FTIR	alle Versuche	ab Versuch MFPA_Zimmer_002	Drierite
G5	Servomex	alle Versuche	ab Versuch MFPA_Zimmer_002	Drierite

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle G1 Sauerstoffanalysator Die Aufzeichnung der Daten ist fehlgeschlagen. Es liegen keine Werte für Sauerstoff und Kohlendioxid (Messgerät Servomex) vor.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle G1 FTIR-Spektrometer Die aufgezeichneten Werte der Gase SO_2 und $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}$ zeigen unphysikalische Sprünge und wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle G2 Der Spannungsbereich war im Datenlogger für die Gase CO und CO_2 falsch eingestellt. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle G4 Die aufgezeichneten Werte für CO_2 zeigen zwischen 400 und 500 Sekunden unphysikalische Sprünge (tlw. in den negativen Bereich). Die Basislinie liegt mit 0,7 Vol% verhältnismäßig hoch. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle G5 Die aufgezeichneten Werte für HCN springen bei Sekunde 806, 828, 850, 871 und 936 auf Werte größer 100 %. Diese einzelnen Werte wurden auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle M1 Brandraumwaage In der Anfangsphase des Versuchs befanden sich Personen zur Zündung des Sofas im Brandraum, die die

Werte der Brandraumwaage beeinflusst haben. Die Masse der Personen wurde manuell von der aufgezeichneten Masse abgezogen.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle D1.14 Bidirektionale Sonde Brandraumöffnung Die aufgezeichneten Werte sind ungewöhnlich niedrig. Ursache könnte eine Verstopfung oder Wasser in der Verbindung zum Differenzdruckaufnehmer sein.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle D2.1 Bidirektionale Sonde Schlot Die aufgezeichneten Werte sind ungewöhnlich niedrig. Die Daten wurden bei der Berechnung der Wärmefreisetzungsrate ausgeschlossen.

Versuch MFPA_Zimmer_001 Messstelle T2.1 Thermoelement Schlot Das Thermoelement war verpolt angeschlossen. Die Werte wurden über die Vergleichsstelle des Datenerfassungssystems korrigiert.

Versuch MFPA_Zimmer_002 Messstelle G1 Sauerstoffanalysator Die aufgezeichneten Werte von O_2 und CO_2 zeigen einen unplausiblen Konzentrationsverlauf. Die Werte werden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_002 Messstelle G1 FTIR-Spektrometer Die aufgezeichneten Werte des Gases SO_2 zeigen unphysikalische Sprünge und wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_002 Messstelle G2 Die aufgezeichneten Werte von CO zeigen vor Versuchsbeginn starkes Rauschen. Eine Korrektur wurde nicht durchgeführt.

Versuch MFPA_Zimmer_002 Messstelle G5 FTIR-Spektrometer Brandraumöffnung Die aufgezeichneten Werte von NH_3 zeigen in der Basislinie einen starken Drift. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt. Der aufgezeichnete Wert für HCN springt bei Sekunde 428 auf einen Wert größer 100%. Dieser einzelne Wert wurde auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_002 Messstelle T12.2 Thermoelement Spanplattenprobekörper Thermoelement war verpolt angeschlossen. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_003 Messstelle G5 FTIR-Spektrometer Brandraumöffnung Der aufgezeichnete Wert für HCN springt bei Sekunde 327 auf einen Wert größer 100 %. Dieser einzelne Wert wurde auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_003 Messstelle T12.2 Thermoelement Spanplattenprobekörper Thermoelement war verpolt angeschlossen. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_004 Messstelle D1.1 Bidirektionale Sonde Brandraumöffnung Die aufgezeichneten Werte zeigen unphysikalische Sprünge. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_004 Messstelle G4 FTIR-Spektrometer Schlot Die aufgezeichneten Werte von NH_3 zeigen eine starke Drift in der Basislinie. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Versuch MFPA_Zimmer_005 Messstelle G5 Sauerstoffanalysator Brandraumöffnung Die aufgezeichneten Werte von O_2 schwanken stark in der Basislinie.

Versuch MFPA_Zimmer_004 Messstelle G5 FTIR-Spektrometer Brandraumöffnung Der aufgezeichnete Wert für HCN springt bei Sekunde 351 auf einen Wert größer 100 %. Dieser einzelne Wert wurde auf Null gesetzt.

Alle Versuche Messstelle D1 Bidirektionale Sonden Brandraumöffnung Durch den Löschvorgang drang Wasser in die Sonden ein. Die Werte sind ab Löschbeginn nicht interpretierbar und werden nicht dargestellt.

Alle Versuche Messstelle T1.5 Thermoelement Brandraumöffnung Das Thermoelement war defekt. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Alle Versuche Messstelle T2.5 Thermoelement Schlot Das Thermoelement war bei Versuch MFPA_Zimmer_001 verpolt angeschlossen. Die Werte wurden über die Vergleichsstelle des Messbretts korrigiert. Bei allen Versuchen lagen die Werte dieses Thermoelements in der Basislinie leicht über den Werten der anderen Thermoelemente im Schlot.

Alle Versuche Messstelle T3.11 Thermoelement Referenzecke Das Thermoelement war ab Versuch MFPA_Zimmer_002 defekt. Außer bei Versuch MFPA_Zimmer_001 wurden alle Werte vollständig auf Null gesetzt.

Alle Versuche Messstelle T7.6 Thermoelement Regalecke Das Thermoelement war defekt. Alle Werte wurden vollständig auf Null gesetzt.

Alle Versuche Messstellen G2 und G3 Gasmessungen Brandraum und Schlot Durch den Löschvorgang und die damit verbundene Wasserdampfbildung kam es zur Kondensation von Wasser in Leitungen vor den Analysatoren. Um Beschädigungen zu vermeiden wurden mit Löschbeginn die Messgaspumpen abgeschaltet. Die Werte sind ab Löschbeginn nicht interpretierbar und werden nicht dargestellt.

Anhang F

Definition des Flashovers

Um aus den gemessenen und berechneten Größen (Wärmestrahlungsleistung, Temperaturen, Wärmefreisetzungsrate) den Zeitpunkt des Flashovers zu bestimmen, ist eine Definition von Schwellwerten der jeweiligen Größen notwendig. Alternativ kann der Zeitpunkt des Flashovers auch durch visuelle Beobachtungen bei der Versuchsdurchführung festgelegt werden. In der Literatur werden hierzu verschiedene Kriterien diskutiert. Peacock gibt in [45] eine Übersicht. Hinsichtlich der visuellen Beobachtungen kommen folgende Kriterien in Frage:

- Flammenaustritt aus der Brandraumöffnung [46]
- vollflächige Entzündung sämtlicher brennbarer Oberflächen im Brandraum
- Entzündung von zusammengeknäultem Zeitungspapier auf dem Brandraumboden [47, 48, 42]

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde aus den visuellen Beobachtungen der Flashoverzeitpunkt anhand der ersten beiden Kriterien festgelegt.

Peacock gibt in [45] auf Basis der Arbeiten von Hagglund et. al. [46], Babrauskas [49, 14], Fang [47], Budnick und Klein et. al [50, 51, 52, 53], Lee und Bresse [48], Fang und Breese [42], Quintere und McCaffrey [54], McCaffrey und Rockett [55] und Thomas [56] eine Übersicht über verschiedene Werte der Wärmestrahlungsleistung auf Oberflächen und Temperaturen in der Heißgasschicht. Er schließt aus den vorliegenden Daten, dass eine Temperatur in der Heißgasschicht von $\geq 600\text{ °C}$ und eine einfallende Strahlungswärmestromdichte auf den Boden von $\geq 20\text{ kW m}^{-2}$ praktikable, aber mit Unsicherheiten behaftete Kriterien für das Einsetzen des Flashovers sind.

Babrauskas stellt in [57] ein weiteres Gedankenmodell für die Definition des Flashoverzeitpunkts vor. Er vergleicht den Brandverlauf mit der Füllung eines Wasserreservoirs mit einem definierten Ausflussquerschnitt. Schlussendlich wird vorgeschlagen, den Zeitpunkt, zu dem die Heißgasschicht tiefer als die halbe Raumhöhe sinkt, ebenfalls als

Kriterium einzubeziehen. Aus einer großen Bandbreite experimenteller Untersuchungen im ISO-Raum gibt Babrauskas eine Wärmefreisetzungsrate von 1700 kW (Median) bzw. 1975 ± 1060 kW (Mittelwert) an.

Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden folgende Kriterien untersucht:

1. Zeitpunkt Überschreiten einer Temperatur von 600 °C
 - a) erstes Mantelthermoelement im Brandraum unter Decke
 - b) Mantelthermoelement in der Brandraummitte unter der Decke
 - c) Mittelwert aus den Mantelthermoelementen unter der Decke
 - d) oberstes Mantelthermoelement in der Öffnung einzeln
2. Zeitpunkt Überschreiten einer Wärmestrahlungsleistungsdichte von 20 kW m^{-2}
 - a) des ersten Plattenthermometers (Edelstahl, Messstellen T11.1, T13.1, T14.1 und T16.1)
 - b) des Plattenthermometers vor Sofa 2 (T11.1)
3. Zeitpunkt Überschreiten einer Wärmefreisetzungsrate von
 - a) 1000 kW
 - b) 1700 kW

Die Zeitpunkte, zu denen die o. a. Kriterien erfüllt bzw. überschritten wurden, sind in Tabelle F.1 aufgeführt. Hierbei weist das Kriterium 1d vor Kriterium 1b bei allen Versuchen die geringsten Abweichungen vom beobachteten Flashoverzeitpunkt auf.

Bei der Interpretation der ermittelten Werte sind Einflüsse, wie die verzögerte Messung der Wärmefreisetzungsrate, aufgrund der natürlichen Konvektion durch den Schlot, das Ansprechverhalten der Mantelthermoelemente und der Plattenthermometer und der Wärmestrahlungseinfluss auf Mantelthermoelemente zu beachten.

Die ermittelten Flashoverzeitpunkte variieren stark. Anhand dieser Versuche kann kein einzelnes Kriterium ermittelt werden, dass die Beobachtung ersetzt. Im Rahmen dieses Berichts wird der Moment als Flashoverzeitpunkt bezeichnet, in dem der Flashover visuell beobachtet wurde.

Tabelle F.1: Zeitpunkte bei Erfüllung der Flashoverkriterien

Kriterium	Versuch MFPA_ Zimmer_				
	001	002	003	004	005
1a	685	100	147	178	78
1b	745	320	207	248	138
1c	735	310	207	248	128
1d	785	360	287	338	218
2a	720	291	190	221	110
2b	720	301	190	221	120
3a	745	110	127	188	88
3b	875	290	157	228	118
Beobachtung	780	390	260	300	210

Anhang G

Korrektur der Messung der Brandraumwaage

Allgemeine Anmerkung

Vor dem Versuch wurden die einzelnen Brandlastgegenstände gewogen. Somit ist die Masse, die die Waage bei Versuchsstart hätte aufzeichnen müssen bekannt. Sie beträgt 697 kg und ist wesentlich größer, als die aufgezeichnete Masse bei Versuchsbeginn (vgl. Tab. G.1 Masse m_0). Mögliche Ursachen für diesen Effekt können sein:

- elektrischer Fehler bzw. Fehler im Aufzeichnungssystem
- Verkanten der Waage
- Tarierung der Waage mit Masse im Brandraum

Bei Tarierung der Waage mit Masse im Brandraum würde ein konstanter Massebetrag fehlen. Bei einem elektrischen Fehler (bspw. fehlerhafte Einstellung der Spannungsbereiche von Waage und Datenlogger) würde ein konstanter Anteil der Masse fehlen. Verkanten der Waage würde zu unsystematischen Abweichungen führen.

Zur Überprüfung, ob ein konstanter Betrag oder ein konstanter Anteil in der Masseaufzeichnung fehlt, werden Massen in zwei Fällen vergleichend betrachtet:

1. aufgezeichnete Masse bei Versuchsbeginn m_0 und rechnerische Masse, die in den Brandraum eingebracht wurde $m_{Brandlast}$
2. aufgezeichnete Masse vor Versuchsbeginn (Vorbereitung der Zündung durch bekannte Anzahl Personen im Raum mit bekannter Masse¹) m_1 und Masse der Personen

¹Die Anzahl der Personen ist aus der Videoaufzeichnung ermittelbar. Es wurde der Zeitraum vor Versuchsbeginn ausgewertet, in dem Brandbeschleuniger aufgebracht wurde.

Tabelle G.1: Messwerte der Brandraumwaage bei Versuchsbeginn

Versuch	m_0	m_1	$m_1 - m_0$	$m_{Pers.}$	$\frac{m_0}{m_{Brandlast}}$	$\frac{m_1 - m_0}{m_{Pers.}}$	$\frac{m_1}{m_{Brandlast} + m_{Pers.}}$
MFPA_Zimmer_	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]			
001	418	467	49	80	0,60	0,61	0,60
002	424	523	99	150	0,61	0,66	0,62
003	467	520	53	80	0,67	0,66	0,67
004	404	457	53	80	0,58	0,66	0,59
005	460	514	54	80	0,66	0,68	0,66

Erläuterungen:

m_0 : Masse bei Versuchsstart

m_1 : Masse bei Vorbereitungen mit Personen im Raum

$m_{Pers.}$: Masse der Personen im Raum bei den Vorbereitungen

$m_{Brandlast}$: berechnete Brandlastmasse mit inerten Massen (697 kg)

Die Waage wurde ein mal vor Beginn der Versuchsserie tariert. Anschließende Messungen von drei Personen ergaben plausible Werte (Masse der Personen nicht exakt bekannt) auf der Kontrollanzeige neben dem Brandraum. Diese Kontrollanzeige und der Datenlogger des Messprogramms sind unabhängig voneinander und müssen einzeln kalibriert und tariert werden. Es ist somit möglich, dass die Kontrollanzeige korrekte Werte angezeigt hat, der Datenlogger jedoch nicht korrekt kalibriert war.

Die entsprechenden Werte sind in Tabelle G.1 aufgeführt. Die Daten zum Fall 2 zeigen, dass die Masse der Personen nicht korrekt aufgezeichnet wurde. Somit kann die Abweichung in der Masseaufzeichnung nicht durch eine falsche Tarierung zu Stande gekommen sein.

Die Verhältnisse aus der aufgezeichneten Masse und der Soll-Masse ($(m_1 - m_0)/m_{Pers.}$ und $m_0/m_{Brandlast}$) sind jedoch relativ konstant.

Somit fehlt ein konstanter Anteil der Masse in den aufgezeichneten Werten und es scheint sich um ein elektrisches Problem zu handeln.²

Korrekturrechnung

Die Abweichung in der Masseaufzeichnung wird auf einen falsch eingestellten Spannungsbereich in der Konfigurationsdatei des Messprogramms der MFPA zurückgeführt.³

²Die Massen bei Versuchsbeginn sind nicht konstant. Dieser Effekt wird in Kapitel 3.3 diskutiert.

³Wahrscheinlich war das Ausgangssignal der Wägezellen auf 1 V/300 kg eingestellt. Die Konfigurationsdatei des Messprogramms nimmt jedoch einen Wert von 1 V/200 kg an.

Dies kann mit folgender Formel rechnerisch korrigiert werden:

$$m^*(t) = m(t) \frac{U}{U^*} = m(t) \frac{1/200 \text{ V/kg}}{1/300 \text{ V/kg}} = 1,5 \cdot m(t) = \frac{m(t)}{0,6} \quad (\text{G.1})$$

m^* korrigierte Masse, m unkorrigierte Masse, U^* korrekte spannung je Kilogramm, U falsche Spannung je Kilogramm.

Mit dieser Korrektur entspricht die Masse zum Startzeitpunkt des Versuchs nicht in allen Fällen der tatsächlichen Masse im Brandraum. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Massenverlusten und die absoluten Masseverluste mit der Korrektur korrekt bestimmt werden.

Anhang H

Berechnung der Wärmefreisetzungsrate

Die Wärmefreisetzungsrate wird nach folgendem Schema berechnet:

1. Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit an den einzelnen bidirektionalen Sonden im Schlot (Messstellen D2.1 bis D2.6 und T2.1 bis T2.6) mit Formel H.4
2. Berechnung des Mittelwertes der Strömungsgeschwindigkeit über alle Messstellen
3. Berechnung des Mittelwertes der Temperatur über alle Messstellen
4. Berechnung des Massenstroms mit den gemittelten Größen mit Formel H.5
5. Berechnung der Wärmefreisetzungsrate aus dem Massenstrom und den Spezieskonzentrationen mit Formel H.6

Die Strömungsgeschwindigkeit an der bidirektionalen Sonde wird mit folgender, auf der Bernoulligleichung basierender, Formel bestimmt [24, S. 2-35ff]:

$$v = C_F^{-1} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (\text{H.1})$$

Die Fluidichte ρ wird mit dem idealen Gasgesetz bestimmt:

$$p = \rho RT \quad p_{STP} = \rho_{STP} R T_{STP} \quad (\text{H.2})$$

Aus der Annahme $p = p_{STP}$ folgt:

$$\rho = \rho_{STP} \frac{T_{STP}}{T} \quad (\text{H.3})$$

Daraus ergibt sich:

$$v = CF^{-1} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot T}{\rho_{STP} \cdot T_{STP}}} \quad (\text{H.4})$$

v_i Strömungsgeschwindigkeit, CF Kalibrierfaktor, Δp_i gemessene Druckdifferenz an der Sonde, T_i Fluidtemperatur an der Sonde, ρ_{STP} Fluiddichte bei Normbedingungen ($1,293 \text{ kg m}^{-3}$), T_{STP} Fluidtemperatur bei Normbedingungen ($273,15 \text{ K}$).

Es wird angenommen, dass das Fluid als ideales Gas betrachtet werden kann und die Dichte von Luft hat.

Die Werte der bidirektionalen Sonden wurden nicht basislinienkorrigiert (Werte vor dem Versuch auf Null gesetzt). Eine Basislinienkorrektur ist nur dann sinnvoll, wenn angenommen werden kann, dass die Werte vor dem Versuch nur durch eine nicht korrekte Kalibrierung und nicht durch eine Strömung erzeugt wurden. Hiervon ist im Falle des Schlots und des gesamten Aufbaus des Versuchsstandes (vertikaler Abstand zwischen Zulufttor und Schlot ca. 9 m) jedoch nicht auszugehen.

Anmerkung zum Kalibrierfaktor CF Der Kalibrierfaktor wird in der ersten Veröffentlichung zu den bidirektionalen Sonden [25] eingeführt. McCaffrey liefert eine Formel zur Berechnung des Faktors für $40 < Re < 3800$ und zeigt, dass bei einem konstantem Kalibrierfaktor von 1,08 der Fehler bei Geschwindigkeiten größer $0,304 \text{ m/s}$ maximal 7% beträgt. Bei den vorliegenden Messungen lag die Reynoldszahl in der Brandphase meistens über 3800.

In [58, S. 2-35f] verwendet Emmons grundsätzlich den Kalibrierfaktor 1,08 (bzw. den Kehrwert von 0,93 in Formel 22).

Die ISO 9705 (Room Corner Test) schlägt ebenfalls 1,08 als konstanten Wert vor.

Starke stellt in [59] umfangreiche Messungen für den Kalibrierfaktor diverser Sondenabmessungen vor. Die vorgestellten Ergebnisse liegen zwischen 1,0 und 1,15, jedoch ist keine Sonde mit den Abmessungen wie in der vorliegenden Arbeit untersucht worden. Der Bericht von Starke basiert auf der Bachelorarbeit von Kraul [26]. Kraul verwendet Sonden ähnlicher aber nicht gleicher Abmessungen (Größe 1 – Sonde B, Größe 2 – Sonde E). In Tabelle 4.1 und Abbildung 5.3 zeigt Kraul die Korrekturfaktoren der getesteten Sonden bei einem Winkel von Null Grad. Die Werte liegen zwischen 0,98 und 1,06 für die Sonde E und schwanken vor allem bei Geschwindigkeiten unter 5 m/s. Aus diesen Werten ergibt sich ein maximaler Fehler von circa 8 % bei Annahme eines Konstanten Kalibrierfaktors von 1,06 $((1,06 - 0,98) / 0,98 = 0,082)$.

Der Kalibrierfaktor wird in den Berechnungen der Wärmefreisetzungsrate konstant 1,06 gesetzt.

Eine detaillierte Berechnung erscheint auf Grund der grundsätzlichen Unsicherheiten des Messaufbaus nicht zielführend. Der Strömungsbeiwert in der Berechnung des Massenstroms hat einen wesentlich größeren Einfluss und kann ebenfalls nur abgeschätzt werden.

Der Massenstrom durch den Schlot wird folgendermaßen bestimmt:

$$\dot{m} = C \cdot v \cdot A \cdot \rho_{STP} \cdot \frac{T_{STP}}{T} \quad (\text{H.5})$$

\dot{m} Fluidmassenstrom, C Strömungsbeiwert, A Querschnittsfläche des Schlots ($2,4\text{m}^2$)

Anmerkung zum Strömungsbeiwert C Der Strömungsbeiwert berücksichtigt Einflüsse der Öffnungsgeometrie auf den Volumenstrom. In [58, S.2-36] gibt Emmons einen Wert von 0,68 an, der üblicherweise verwendet wird. Dieser Wert wird in [40] durch Prahl und Emmons hergeleitet und bezieht sich ursprünglich auf vertikale Öffnungen. Cooper verwendet diesen Wert dann mit Verweis auf Emmons für horizontale Öffnungen [60] und diskutiert noch weitere Werte.

In ISO 9705 (Room Corner Test) wird kein Strömungsbeiwert für die Berechnung des Massenstroms durch die Türöffnung verwendet.

DIN 18232 (Rauchabzüge) führt als Strömungsbeiwert u.a. 0,65 ein [61, S. 28]. Dieser Wert gilt allerdings für vertikale Öffnungen und berücksichtigt neben dem Strömungseinfluss auch die Reduzierung der Öffnungsfläche durch Fensterrahmen etc. (es wird die Öffnungsfläche im Rohbau mit diesem Wert angepasst).

Bei der Annahme eines parabolischen Strömungsprofils (oder eines Profils allgemein, welches von einer gleichförmigen Geschwindigkeit abweicht) durch den Schlot spielt für den Korrekturfaktor ebenfalls die Position der Messsonden eine Rolle. Ein Strömungsbeiwert, der für Sonden in der Mitte des Strömungsprofils ermittelt wurde, kann nicht ohne weiteres auf Messungen mit Sonden, die außermittig im Strömungsprofil saßen, angewendet werden. Bei den außermittigen Sonden ist die Strömungsgeschwindigkeit niedriger als in der Mitte. Der korrekte Strömungsbeiwert wäre also größer als in der Mitte. Die Sonden bei den vorliegenden Messungen waren außermittig positioniert (vgl. Abb. C.10).

Zur Ermittlung des Strömungsbeiwerts für die konkrete Anordnung der bidirektionalen Sonden wurden Simulationen mit FDS durchgeführt (s. Anhang I). Auf Basis dieser Berechnungen wurde ein Strömungsbeiwert von 0,8 festgelegt und in den Berechnungen

verwendet. Durch Wilk wurde ebenfalls ein ähnlicher Wert ermittelt¹.

Die Wärmefreisetzungsrate wird dann mit folgendem Gleichungssatz berechnet:

$$\dot{q} = E \frac{\phi}{1 + \phi X_{O_2}^{A_0} (\beta - 1)} \dot{m} \frac{M_{O_2}}{M_a} (1 - X_{H_2O}) X_{O_2}^{A_0} \quad (\text{H.6})$$

\dot{q} Wärmefreisetzungsrate, $E = 13,1 \text{ MJ/kg}$, ϕ Sauerstoffverbauchsfaktor, M_{O_2} molare Masse Sauerstoff (32 g/mol), M_a molare Masse Luft (29 g/mol), X_{H_2O} Molanteil Wasserdampf in der Zuluft, $X_{O_2}^{A_0}$ Molanteil Sauerstoff in der Zuluft (0,2095), β stöchiometrischer Verdünnungsfaktor (1,5 für Methan) nach [62].

$$\phi = \frac{X_{O_2}^{A_0} (1 - X_{CO_2}^A) - X_{O_2}^A (1 - X_{CO_2}^{A_0})}{(1 - X_{O_2}^A - X_{CO_2}^A) X_{O_2}^{A_0}} \quad (\text{H.7})$$

$X_{CO_2}^A$ gemessener Molanteil Kohlendioxid im Schlot, $X_{O_2}^A$ gemessener Molanteil Sauerstoff im Schlot, $X_{CO_2}^{A_0}$ Molanteil Kohlendioxid in der Zuluft (0,0004).

Die Formeln H.6 und H.7 basieren auf dem Ansatz von Janssens und können in [63, 64] nachvollzogen werden. Darüber hinaus sind für das grundsätzliche Verständnis der Sauerstoffverbauchskalorimetrie die Veröffentlichungen von Parker [65, 66], Huggett [62] und Thornton [67] hilfreich.

¹Persönliche Kommunikation mit Erhard Wilk, Oktober 2012. Wilk hat den Strömungsbeiwert für den Schlot des selben Versuchsstands basierend auf mehreren Brandversuchen berechnet und mit Anemometern gemessen. Er empfiehlt einen Wert zwischen 0,75 und 0,8.

Anhang I

Bestimmung des Strömungsbeiwerts für den Schlot

Zur Bestimmung des Strömungsbeiwerts des Schlots wurde eine Serie von numerischen Simulationen mit dem Fire Dynamics Simulator¹ durchgeführt.

Modell

Offenes Volumen mit den Abmessungen 9 m, 5 m, 5 m. Darauf sitzt mit 0,5 m Abstand von der Kante in y-Richtung, zentriert in x-Richtung, der Schlot mit den Abmessungen 2,4 m, 1 m, 2 m. Der obere Abschluss des Schlots ist ein „Vent“ mit definiertem Volumenstrom. Der untere Abschluss des offenen Volumens ist ein offenes „Vent“. Das strömende Medium ist Luft. Die Temperatur der einströmenden Luft wurde vorgegeben. Das Gitter bestand aus gleichförmigen Quadern mit einer Kantenlänge von 10 cm.

Randbedingungen

Es wurden zwei Fälle berechnet:

- a) Die Temperatur der Luft wurde global über die Funktion
&MISC TMPA=25, ISOTHERMAL=.TRUE. /
vorgegeben, die Berechnung erfolgte isotherm (keine Strahlung, kein Energieaustausch in der Gasphase und mit Umfassung).
- b) Die Temperatur der einströmenden Luft wurde über die Funktion
&VENT, SURF_ID='OPEN', MB=ZMIN, TMP_EXTERIOR=100 /

¹FDS 5, Version 5.5.3

vorgegeben. Temperaturvorgabe für Luft im Volumen und Oberflächen war dann 25 Grad Celsius.

Beide Fälle stellen hinsichtlich des Wärmeaustauschs mit dem Umfassungsbauteilen des Schlots Extremfälle dar.

Im Fall b wird mit zunehmender Temperatur die Strömung im Schlot turbulenter. Die Geschwindigkeiten an den Messstellen variieren wesentlich stärker.

Es bildet sich kein streng parabolisches Strömungsprofil aus. Die Geschwindigkeit in Schlotmitte ist minimal niedriger als an den Messstellen.

Der Strömungsbeiwert wurde aus dem Verhältnis aus dem vorgegebenen Volumenstrom durch den Schlot und einem gemessenen Volumenstrom bestimmt. Der gemessene Volumenstrom wird hierbei anhand von sechs Strömungsgeschwindigkeitsmessstellen (an der selben Stelle wie im originalen Versuchsaufbau) und der Querschnittfläche des Schlots berechnet.

Die Ergebnisse der Berechnungen können Tabelle I.1 entnommen werden.

Code-Beispiel Fall a

```
&HEAD    CHID='Stroemungsbeiwert '
          TITLE='1 m3/s , 25 C' /
&MESH    FYI='10 cm Quader , 324.000 Zellen '
          IJK=90,60,60
          XB=-4.5,4.5,-4.5,1.5,-5.0,1.0 /
&TIME    T_END=30. /
&MISC    ISOTHERMAL=.TRUE.
          TMPA=25 /
&OBST    FYI='Block '
          XB=-4.5,4.5,-4.5,1.5,-5.0,1.0
          OUTLINE=.TRUE. /
&HOLE    FYI='Loch im Schlot '
          XB=-1.2,1.2,-0.5,0.5,-6.0,2.0 /
&HOLE    FYI='Loch im Vorraum '
          XB=-4.0,4.0,-4.0,1.0,-6.0,-1.0 /
&VENT    FYI='Oeffnung unten '
          SURF_ID='OPEN'
```

```

MB=ZMIN /
&SURF ID='Stroemung'
      VOLUME_FLUX=1.0
      COLOR='BLUE' /
&VENT FYI='Oeffnung Schlot oben'
      XB=-1.2,1.2,-0.5,0.5,1.0,1.0
      SURF_ID='Stroemung' /

```

Geschwindigkeit an den BiDis

```

&DEVC ID='D2.1', XYZ=0.7,-0.25,0.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='D2.2', XYZ=0.7,0.25,0.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='D2.3', XYZ=0.0,-0.25,0.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='D2.4', XYZ=0.0,0.25,0.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='D2.5', XYZ=-0.7,-0.25,0.0, QUANTITY='VELOCITY' /
&DEVC ID='D2.6', XYZ=-0.7,0.25,0.0, QUANTITY='VELOCITY' /

```

Volumenstrom

```

&DEVC ID='Volume Flow', XB=-1.2,1.2,-0.5,0.5,0.0,0.0, QUANTITY
      ='VOLUME FLOW' /
&TAIL /

```

Code-Beispiel Fall b

(Es werden nur die Unterschiede zu Fall a dargestellt.)

```

&TIME T_END=100. /
&MISC TMPA=25 /

&VENT FYI='Oeffnung unten'
      SURF_ID='OPEN'
      MB=ZMIN
      TMP_EXTERIOR=100 /

```

Tabelle I.1: Ergebnisse der Simulation zum Strömungsbeiwert. \dot{V} vorgegebener Volumenstrom, ϑ Temperatur, \bar{v} mittlere Geschwindigkeit im Schlot, \dot{V}^* gemessener Volumenstrom, C Strömungsbeiwert.

Fall	\dot{V} in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	ϑ in $^{\circ}\text{C}$	\bar{v} in m s^{-1}	\dot{V}^* in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	C
a	1,00	25	0,52	1,25	0,80
a	1,00	100	0,52	1,25	0,80
a	1,00	200	0,52	1,25	0,80
a	5,00	25	2,62	6,29	0,80
a	5,00	100	2,62	6,29	0,80
a	5,00	200	2,62	6,29	0,80
a	10,00	25	5,24	12,58	0,80
a	10,00	100	5,24	12,58	0,80
a	10,00	200	5,24	12,58	0,80
a	20,00	25	10,46	25,10	0,80
a	20,00	100	10,44	25,06	0,80
a	20,00	200	10,43	25,03	0,80
b	1,00	25	0,53	1,27	0,79
b	1,01	100	0,52	1,25	0,81
b	1,02	200	0,77	1,85	0,55
b	5,00	25	2,62	6,29	0,80
b	5,01	100	2,42	5,81	0,86
b	5,02	200	2,45	5,88	0,85
b	10,00	25	5,25	12,60	0,79
b	10,00	100	5,05	12,12	0,83
b	10,00	200	4,99	11,98	0,84
b	20,00	25	10,45	25,08	0,80
b	20,03	100	9,91	23,78	0,84
b	20,05	200	9,91	23,78	0,84

Anhang J

Berechnung der Lage der neutralen Ebene

Die Lage der neutralen Ebene wird nach folgendem Schema berechnet (vgl. Abb. J.1):

1. Basislinienkorrektur der Messreihen der bidirektionalen Sonden (Korrekturfaktor basierend auf einem Mittelwert über mindestens 60 Sekunden in einer Periode möglichst ungestörter Messung vor dem Versuch)
2. Berechnung neuer gemittelter Messreihen für jede bidirektionale Sonde als gleitenden zentrierten Mittelwert über sieben Werte
3. Automatische Suche des Nulldurchgangs im vertikalen Druckprofil von oben nach unten für jeden aufgezeichneten Zeitschritt auf Basis der gemittelten Messreihen
4. Berechnung der Lage der neutralen Ebene durch lineare Interpolation mit dem Wertepaar um den Nulldurchgang (Rundung ohne Nachkommastelle, Zentimeter)

In einigen Fällen scheitert der oben beschriebene Algorithmus. Es kommt dann zu extremen Sprüngen im Verlauf der Lage der neutralen Ebene und unplausiblen Werten. In den ersten Sekunden des Versuchs sind die Gradienten im Druckprofil in der Öffnung relativ klein. Obwohl sich erst die Rauchsicht im Raum bilden muss, wertet der Algorithmus das Profil aus, als ob bereits Rauch aus der Öffnung ausströmt (vgl. Abb. J.2a).

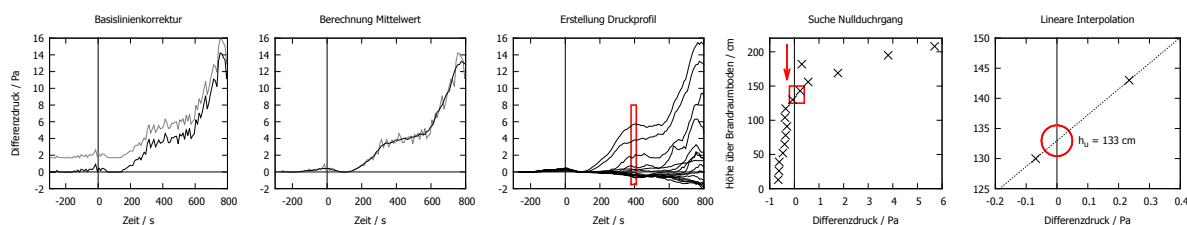


Abbildung J.1: Schema zur Berechnung der Lage der neutralen Ebene

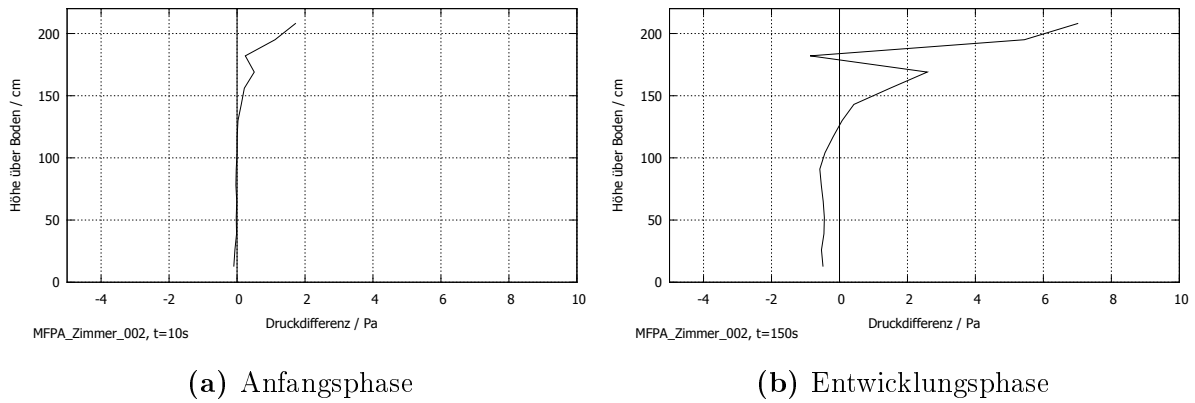


Abbildung J.2: Beispiele zur manuellen Ermittlung der neutralen Ebene aus den Druckprofilen

In diesen Fällen wurde die Lage der neutralen Ebene aus den jeweiligen Druckprofilen unabhängig vom Nulldurchgang abgeschätzt (im gezeigten Fall in Abb. J.2a liegt die Ebene bei 182 cm).

Pulsieren der Rauchsicht kann zu mehreren Nulldurchgängen im Druckprofil führen (vgl. Abb. J.2b). In diesen Fällen wurde der tiefer liegende Nulldurchgang zur Bestimmung der Lage der neutralen Ebene verwendet (im gezeigten Fall in Abb. J.2b liegt die Ebene bei 126 cm).

Zur Beurteilung der Methodik wurde ebenfalls der Nulldurchgang im Druckprofil von unten nach oben gesucht. Abbildung J.3 zeigt einen Vergleich der beiden Methoden. Die blaue Reihe zeigt hierbei die Werte, die im Folgenden für die Lage der neutralen Ebene verwendet werden. In der Abbildung ist ebenfalls der Einfluss durch die Nutzung gemittelter Werte für das Druckprofil zu erkennen.

Ergänzend zur Bestimmung der Lage der neutralen Ebene aus dem Druckprofil wurden Berechnungen mit Modellen für Zonenmodelle (Vollbrandphase) durchgeführt.

Nach Demidow [68, S.54] kann die Lage der neutralen Ebene mit folgender Formel abgeschätzt werden:

$$h_u = \frac{0.5H}{(T_R/T_0 + 1)^{1/3}} \quad (\text{J.1})$$

h_u Lage der neutralen Ebene ab Öffnungsunterkante, H Höhe der Öffnung, T_R Temperatur des Rauchgases in der Rauchgassicht, T_0 Temperatur der Zuluft.

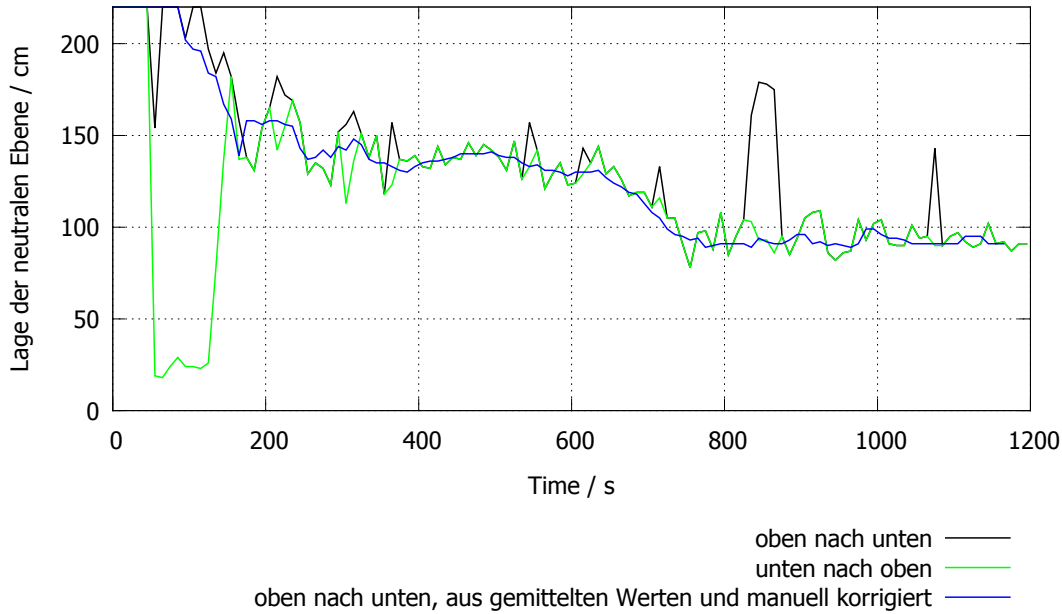


Abbildung J.3: Vergleich der Methoden zur Ermittlung der Lage der neutralen Ebene aus den Druckprofilen (Versuch MFPA_Zimmer_001)

Forell[69, S.9] gibt eine weitere einfache Formel auf Basis der Arbeit von Babrauskas und Lönnermark im Toxfire Project [70] an:

$$h_u = \frac{H}{1 + (T_R/T_0)^{1/3}} \quad (\text{J.2})$$

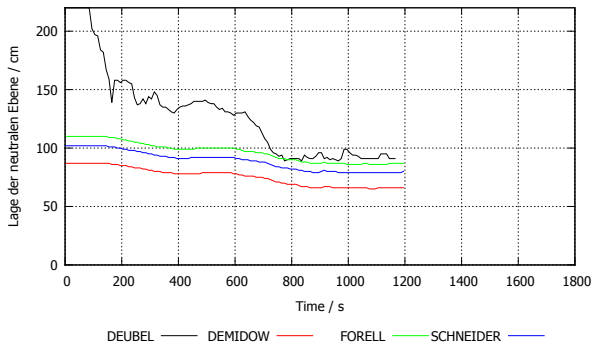
Schneider [35, S.35] gibt eine komplexere Formel an, die ebenfalls die Verbrennungsbedingungen berücksichtigt:

$$h_u = \frac{H}{1 + \left(\frac{T_R}{T_0} \left(\frac{r}{r+\Phi} \right)^2 \right)^{1/3}} \quad (\text{J.3})$$

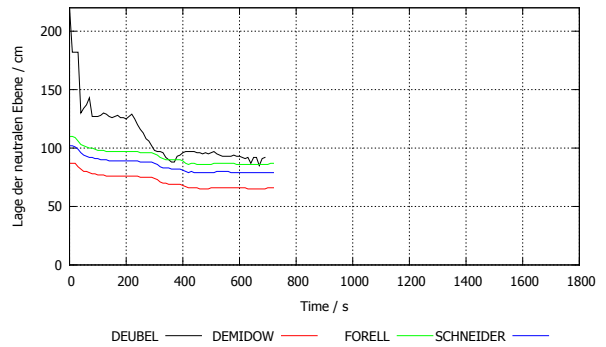
r pro kg Luft bei stöchiometrischer Verbrennung ($\Phi = 1$) verzehrte Brandstoffmenge in kg, Φ Luftverbrennungsfaktor.

Für die Berechnung der Lage der neutralen Ebene mit den o.g. Formeln wurde für T_R die Temperatur der obersten Messstelle in der Öffnung (T1.16) und für T_0 die dokumentierte Umgebungstemperatur verwendet. Für das Modell von Schneider wurde für r $6,26 \text{ kg kg}^{-1}$ und für Φ 1,5 angenommen.

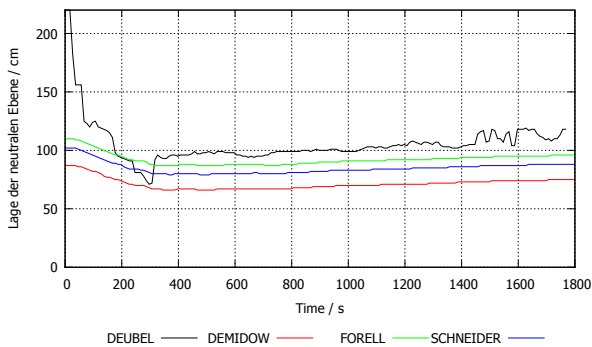
Die Ergebnisse der vier Berechnungsmethoden werden in Abbildung J.4 verglichen.



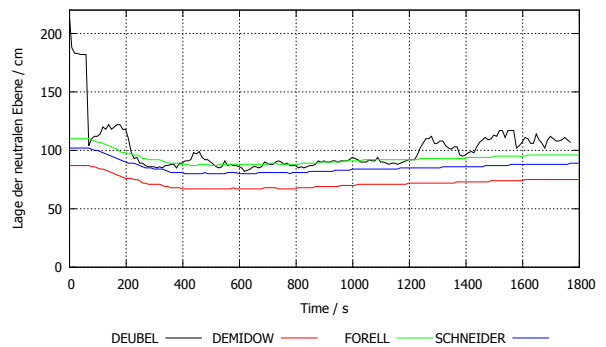
(a) MFPA_Zimmer_001



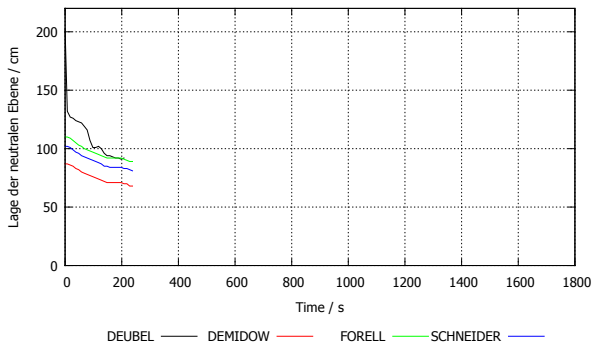
(b) MFPA_Zimmer_002



(c) MFPA_Zimmer_003



(d) MFPA_Zimmer_004



(e) MFPA_Zimmer_005

Abbildung J.4: Vergleich der Modelle zur Berechnung der neutralen Ebene

Anhang K

Berechnung des Massenstroms durch die Brandraumöffnung

Der Massenstrom durch die Brandraumöffnung wird nach folgendem Schema berechnet:

1. Basislinienkorrektur der Messreihen der bidirektionalen Sonden (Korrekturfaktor basierend auf einem Mittelwert über mindestens 60 Sekunden in einer Periode möglichst ungestörter Messung vor dem Versuch)
2. Berechnung des Massenstroms durch jede Teilfläche der Öffnung (je einer Sonde zugeordnet)
3. Berechnung des Masseneinstroms, des Massenausstroms und des Gesamtmassenstroms

Die Geschwindigkeit an den bidirektionalen Sonden wird mit Gleichung H.4 bestimmt. Die Kalibrierkonstante CF ist hier ebenfalls 1,06 (vgl. Anhang H). Der Massenstrom wird mit Gleichung H.5 berechnet. Gleichung H.4 in Gleichung H.5 eingesetzt ergibt die Gleichung zur Berechnung des Massenstroms durch eine Teilfläche¹

$$\dot{m}_i(t) = \frac{C \cdot B \cdot H_i}{CF} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_i(t) \cdot \rho_{STP} \cdot T_{STP}}{T_i(t)}} \quad (\text{K.1})$$

\dot{m}_i Massenstrom durch die Teilfläche, C Strömungsbeiwert, B Öffnungsbreite, H_i Höhe der Teilfläche, CF Kalibrierfaktor der bidirektionalen Sonde, Δp_i gemessene Druckdifferenz an der bidirektionalen Sonde, T_i Fluidtemperatur an der Sonde, ρ_{STP} Fluiddichte bei Normbedingungen ($1,293 \text{ kg m}^{-3}$), T_{STP} Fluidtemperatur bei Normbedingungen

¹Im programmierten Algorithmus der Berechnungen wird mit dem Betrag der Druckdifferenz Δp gerechnet. Falls die Druckdifferenz negativ ist (Einstrom), wird dem Massenstrom ebenfalls ein negatives Vorzeichen zugeordnet.

(273,15 K).

Es wird angenommen, dass das Fluid als ideales Gas betrachtet werden kann und die Dichte von Luft hat. Zur Berechnung der Massenströme werden die basislinienkorrigierten Differenzdrücke verwendet.

Der Gesamtmassenstrom \dot{m}_{ges} , der Masseneinstrom \dot{m}_{ein} und der Massenausstrom \dot{m}_{aus} werden dann mit folgenden Formeln bestimmt:

$$\dot{m}_{ges}(t) = \sum_{i=1}^{16} \dot{m}_i(t) \quad (\text{K.2})$$

$$= \frac{C \cdot B}{CF} \sqrt{2 \cdot \rho_{STP} \cdot T_{STP}} \sum_{i=1}^{16} H_i \sqrt{\frac{\Delta p_i(t)}{T_i(t)}} \quad (\text{K.3})$$

$$\dot{m}_{ein}(t) = \sum_{i=1}^{16} \{\dot{m}_i(t) \mid \dot{m}_i(t) < 0\} \quad (\text{K.4})$$

$$\dot{m}_{aus}(t) = \sum_{i=1}^{16} \{\dot{m}_i(t) \mid \dot{m}_i(t) \geq 0\} \quad (\text{K.5})$$

Es wird angenommen, dass die aufgezeichnete Temperatur des Mantelthermoelements der aktuellen Temperatur des vorbeiströmenden Fluids ist. Bei der Messung der Temperatur können Abweichungen in zwei Richtungen auftreten:

Die Fluidtemperatur wird niedriger gemessen, als sie real ist. Dies kommt durch die Trägheit des Mantelthermoelements zu Stande (vgl. Anhang L) und tritt in der Entwicklungs- und Vollbrandphase bei der Erwärmung der Mantelthermoelemente auf. Hierdurch wird der Massenstrom durch die Öffnung betragsmäßig überschätzt.

Die Fluidtemperatur wird höher gemessen, als sie real ist. Dies kommt durch die Trägheit des Mantelthermoelements in der Abklingphase des Brandes beim Abkühlen der Thermoelemente und durch Wärmestrahlung (s. a. Kap. L.3) im gesamten Brandverlauf zu Stande². Hierdurch wird der Massenstrom durch die Öffnung betragsmäßig unterschätzt. Für den Einstrom kann der Einfluss durch Wärmestrahlung rechnerisch korrigiert werden, indem die Temperatur des einströmenden Fluids nicht als die Temperatur des Mantelthermoelements angenommen, sondern gleich der Umgebungstemperatur gesetzt wird. Die so berechneten Größen werden mit dem Index * gekennzeichnet.

²Annahme: Thermoelement und alle umgebenden Flächen haben mindestens eine Temperatur die größer oder gleich der Umgebungstemperatur T_∞ ist.

$$\dot{m}_i^*(t) = \frac{C \cdot B \cdot H_i}{CF} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_i(t) \cdot \rho_{STP} \cdot T_{STP}}{T_i^*(t)}} \quad \text{mit } T_i^*(t) = \begin{cases} T_\infty, & \text{falls } \Delta p_i(t) < 0 \\ T_i(t), & \text{falls } \Delta p_i(t) \geq 0 \end{cases} \quad (\text{K.6})$$

T_∞ Umgebungstemperatur

Die Massenströme $\dot{m}_{ein}^*(t)$, $\dot{m}_{aus}^*(t)$ und $\dot{m}_{ges}^*(t)$ werden analog den Formeln K.2 bis K.5 berechnet.

Die Fluidmasse, die durch die Öffnung seit Versuchsbeginn geströmt ist, kann mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$m_{ges}(t) = \sum_{t=0}^t \dot{m}_{ges}(t) \cdot \Delta t \quad (\text{K.7})$$

$$m_{ein}(t) = \sum_{t=0}^t \dot{m}_{ein}(t) \cdot \Delta t \quad (\text{K.8})$$

$$m_{aus}(t) = \sum_{t=0}^t \dot{m}_{aus}(t) \cdot \Delta t \quad (\text{K.9})$$

Δt Zeitschrittweite des Datenloggers (10 s)

Die einstromtemperaturkorrigierten Größen $m_{ein}^*(t)$ und $m_{ges}^*(t)$ werden analog berechnet. $m_{ges}^*(t)$ ist die, durch die Verbrennungsreaktion entstandene, Rauchgasmasse und kann direkt mit dem absoluten Masseverlust verglichen werden.

Anmerkung zum Strömungsbeiwert C Für horizontal durchströmte vertikale Öffnungen gibt es in der Literatur verschiedene Angaben für den Strömungsbeiwert. Die Werte liegen zwischen 0,68 bei Prahl und Emmons [40] und 0,73 bei Steckler [71, S.7]. Der Strömungsbeiwert ist für die Ein- und Ausströmung unterschiedlich und von der Reynoldszahl abhängig. Prahl und Emmons schlagen einen konstanten Wert von 0,68 vor und zeigen, dass der resultierende Fehler innerhalb der üblichen Abweichungen großskaliger Brandversuche liegt [40, S.382]. Hier wird ein Wert von 0,68 verwendet³.

³Koched et. al. haben nach der Durchführung der Berechnungen für diesen Bericht ihre Arbeit zum Strömungsbeiwert von Türöffnungen veröffentlicht [43] und geben wesentlich niedrigere Werte, als der hier angenommenen Wert von 0,68, an.

Anmerkung zur Höhe der Teilfläche H_i Die Höhe beträgt grundsätzlich 13 cm. Die Messstellen waren in gleichen Abständen über die Höhe in der Öffnung verteilt (vgl. Abb. C.9, Unregelmäßigkeiten bleiben unberücksichtigt). In den Fällen der untersten (D1.1) und obersten (D1.16) Messstelle muss zusätzlich die größere Abstand zwischen Sonde und Öffnungsbegrenzung berücksichtigt werden. Somit betragen die Höhen H_1 und H_2 19 cm.

Anmerkung zur Temperaturmessstelle T1.5 Das Thermoelement T1.5 war bei allen Versuchen defekt. Zur Berechnung des Massenstroms wurde die Temperatur aus der darüber- und der darunterliegenden Messstelle linear interpoliert.

Anmerkung zur bidirektionalen Sonde D1.1 Die Aufzeichnung dieser Sonde war bei Versuch MFPA_Zimmer_004 unplausibel. Zur Berechnung des Massenstroms wurden für diese Sonde die Werte der darüberliegenden Sonde D1.2 verwendet. Der Masseneinstrom wird durch diesen Ansatz potentiell unterschätzt.

Anmerkung zur bidirektionalen Sonde D1.14 Die Werte dieser Sonde war bei Versuch MFPA_Zimmer_001 vergleichsweise niedrig. Zur Berechnung des Massenstroms wurden für diese Sonde die Werte der darüberliegenden Sonde D1.15 und der darunterliegenden Sonde D1.13 linear interpoliert verwendet.

Anhang L

Zeitverhalten der Mantelthermoelemente

Inhaltsverzeichnis

L.1	Allgemeines zur Zeitkonstanten von Thermoelementen . . .	200
L.2	Messung der Zeitkonstanten	201
L.3	Strahlungseinfluss auf Thermoelemente	203

L.1 Allgemeines zur Zeitkonstanten von Thermoelementen

Das zeitliche Ansprechverhalten von Thermoelementen wird von den Randbedingungen der Messung und den Eigenschaften des Temperatursensors selbst beeinflusst. Randbedingungen der Messung sind beispielsweise Wärmeübergang durch Strahlung, Konvektion oder Leitung, Strömungsgeschwindigkeit und thermische Eigenschaften des Fluids. Die Eigenschaften des Temperatursensors sind dessen Emissionsgrad und seine thermische Trägheit. Es ist also nicht möglich eine allgemein gültige Zeitkonstante für ein Thermoelement zu bestimmen, da diese von den Randbedingungen der Messung abhängt¹ [72, S. 122]. Eine rechnerische Korrektur der Messdaten eines Thermoelements mit einer Zeitkonstanten ist somit nur dann zielführend, wenn die Randbedingungen für jeden einzelnen Messwert hinreichend genau abgeschätzt werden können.

¹„Die Abhängigkeit des Zeitverhaltens eines Temperaturfühlers von vielen Einflussfaktoren erschwert nicht nur die exakte Berechnung der Zeitkonstante, sondern schließt auch eine Angabe von allgemein gültigen Zahlenwerten aus.“ [72, S. 122]

Da dies bei den hier vorgestellten Versuchen nicht der Fall ist, wird keine rechnerische Korrektur des Ansprechverhaltens oder des Wärmestrahlungseinflusses auf die Thermoelemente durchgeführt.

Zur Einschätzung des Ansprechverhaltens der verwendeten Thermoelemente wird trotzdem die Zeitkonstante bei verschiedenen Randbedingungen ermittelt. Diese Zeitkonstante kann jedoch nicht für eine Korrekturrechnung verwendet werden. Eine mathematische Analyse des Einflusses von Wärmestrahlung auf das Verhalten der verwendeten Thermoelemente ergänzt die Bestimmung der Zeitkonstanten.

Für grundlegende Informationen zur Messung der Temperatur können der Literatur entnommen werden, beispielsweise Weichert et. al. [72] und Hofmann et. al. [73].

Im Zusammenhang mit Brandversuchen haben u. a. Lönnermark und Ingason [74, 75] Jones [76], Babrauskas und Williamson [77], Brundage et. al. [78, 78], Karlsson und Quintiere [79], Pitts et. al. [80, 81], Sultan [82] und Tagawa und Ohta [83] Aussagen zum Ansprechverhalten und der Messunsicherheit von Thermoelementen veröffentlicht. Speziell auf den Einfluss von Wärmestrahlung auf die Temperaturmessung mittels Thermoelementen sind unter anderem Luo [84], Blevins [85] und Jones [86] eingegangen.

L.2 Messung der Zeitkonstanten

Zur Messung der Zeitkonstanten der Thermoelemente wurde ein Kalibrierofen Pegasus Plus 1200 der Firma Isotech verwendet. Die Messstelle des Thermoelements wurde in einem Einsatz positioniert, der so geformt ist, dass die Messstelle keinen Kontakt mit der Wandung des Einsatzes hat (vgl. Abb. L.1). Die Messdaten wurden mit einem Datenlogger TC-08 USB der Firma Picolog aufgezeichnet.

Folgende Thermoelemente wurden untersucht:

- Mantelthermoelement Typ K, Durchmesser 1,5 mm
- Mantelthermoelement Typ K, Durchmesser 1,0 mm, Klasse 1 nach DIN EN 60584, Mantelwerkstoff Inconel 2.4816, Messstelle mit dem Mantel verschweißt
- Mantelthermoelement Typ K, Durchmesser 3,0 mm

Zur Messung der Zeitkonstanten wurden die Mantelthermoelemente im Gleichgewichtszustand (Starttemperatur = Raumtemperatur) in den Kalibrierofen eingebracht, der auf eine definierte Solltemperatur vorgeheizt war. Die Mantelthermoelemente wurden bis zum Erreichen eines stationären Zustands (konstante Endtemperatur) in dem Ofen belassen.



(a) Kalibrierofen



(b) Einsatz (links) und Isolierung (rechts)

Abbildung L.1: Geräte zur Messung der Zeitkonstanten

Für jedes Thermoelement wurden drei Messungen bei Solltemperaturen von 50 °C, 100 °C, 250 °C, 500 °C durchgeführt.

Das Ansprechverhalten eines Thermoelements kann mit dem Newtonschen Abkühlungsgesetz beschrieben werden (vgl. bspw. [87]):

$$\frac{T_{TC} - T_0}{T_U - T_0} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{L.1})$$

T_{TC} Temperatur des Thermoelements, T_0 Anfangstemperatur des Thermoelements (bspw. zum Zeitpunkt des Eintauchens in den Kalibrierofen), T_U Umgebungstemperatur, t Zeit, τ Zeitkonstante des Thermoelements.

Die Umstellung nach T_{TC} ergibt für den Fall $t = \tau$:

$$\begin{aligned} T_{TC} = T_\tau &= T_0 + (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}) (T_U - T_0) \\ &= T_0 + 0,632 (T_U - T_0) \end{aligned} \quad (\text{L.2})$$

Die Ermittlung der Zeitkonstanten erfolgt dann mit folgendem Formelsatz mit der Annahme $T_U = T_{End}$:

$$T_\tau = T_0 + 0,632 (T_{End} - T_0) \quad (\text{L.3})$$

$$t_\tau = t (T_{TC} \geq T_\tau) \quad (\text{L.4})$$

$$\tau = t_\tau - t_0 \quad (\text{L.5})$$

T_τ Temperatur des Thermoelements bei Erreichen der Zeitkonstante τ , T_{End} Endtemperatur des Thermoelements im Gleichgewichtszustand, t_τ Zeitpunkt bei Erreichen der

Zeitkonstante in der Messreihe, t_0 Zeitpunkt des Einbringens des Thermoelements in den Ofen in der Messreihe.

Zur Darstellung des Zeitverhaltens der Thermoelemente kann folgende Formel verwendet werden.

$$\Delta T(t) = T_{TC}(t) - T_0 = (T_{End} - T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (\text{L.6})$$

Die ermittelten Zeitkonstanten sind in Tabelle L.1 aufgeführt und das Zeitverhalten, berechnet mit den ermittelten Zeitkonstanten, ist in Abbildung L.2 dargestellt.

L.3 Strahlungseinfluss auf Thermoelemente

Die Energiebilanz einer Thermoelementspitze ist [76, 88, 89]:

$$mc \frac{dT}{dt} = hA (T_G - T) + \sigma \epsilon A (T_{rad}^4 - T^4) \quad (\text{L.7})$$

m Masse der Thermoelementspitze, c spezifische Wärmekapazität des Thermoelements, T gemessene Temperatur des Thermoelements, t Zeit, h konvektiver Wärmeübergangskoeffizient, A Fläche der Thermoelementspitze, T_G Fluidtemperatur, σ Stefan-Boltzmann-Konstanten, ϵ Emissionsgrad der Thermoelementspitze, T_{rad} Strahlungstemperatur².

Die Spitze kann als Kugel idealisiert werden:

$$\rho \frac{4}{3} \Pi r^3 c \frac{dT}{dt} = 4 \Pi r^2 [h (T_G - T) + \sigma \epsilon (T_{rad}^4 - T^4)] \quad (\text{L.8})$$

$$\rho \frac{1}{3} r c \frac{dT}{dt} = h (T_G - T) + \sigma \epsilon (T_{rad}^4 - T^4) \quad (\text{L.9})$$

ρ Dichte der Thermoelementspitze, r Radius der Thermoelementspitze.

Im stationären Zustand ändert sich die Temperatur des Thermoelements nicht. Somit ist der Wärmestrom durch Konvektion gleich dem Wärmestrom durch Strahlung:

$$h (T_G - T) = \sigma \epsilon (T^4 - T_{rad}^4) \quad (\text{L.10})$$

²Vgl. auch [87, S.65]: „ T_{rad} is a weighted average of the surrounding surface temperatures.“ und [87, S.34]: „ T_{rad} is the temperature of a surface in equilibrium with the incident flux assuming that the absorbed heat is equal to the emitted heat and that no heat is transferred by convection or by conduction by that surface.“

Tabelle L.1: Zeitkonstanten der Thermoelemente, Mittelwerte aus drei Messungen

Durchmesser / mm	ΔT / K	τ / s
1,0	28	33
1,0	77	29
1,0	232	24
1,0	500	16
1,5	28	65
1,5	76	59
1,5	229	44
1,5	492	29
3,0	28	157
3,0	78	119
3,0	231	84
3,0	498	42

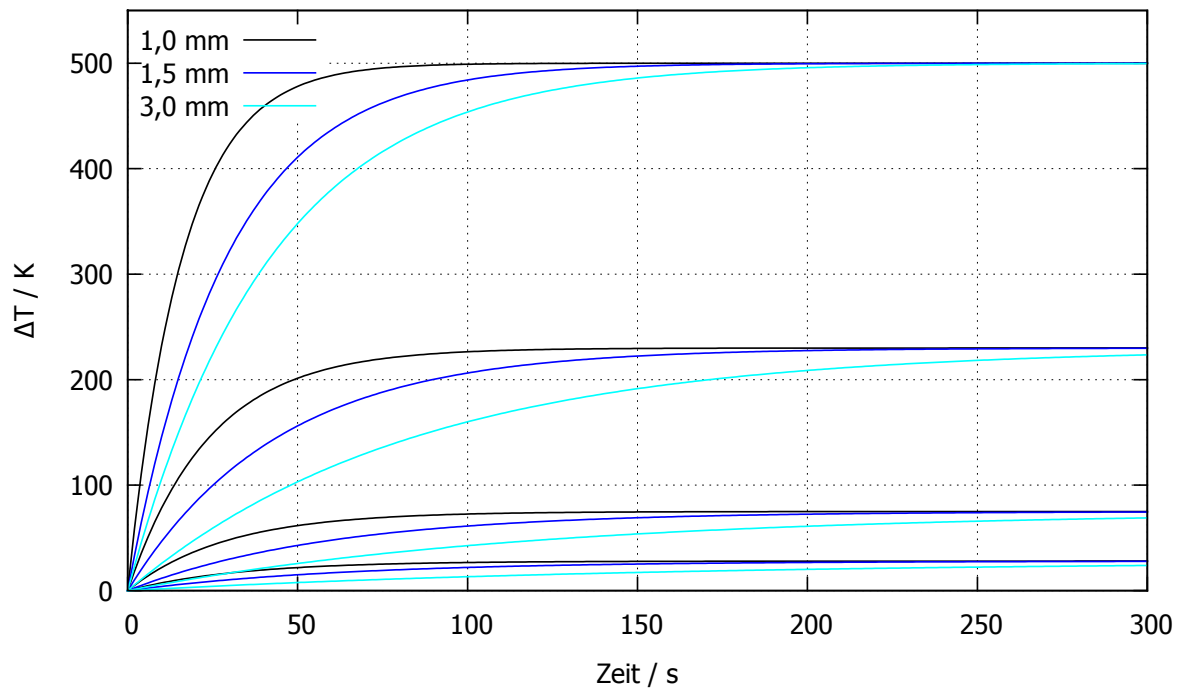


Abbildung L.2: Berechnetes Zeitverhalten der Mantelthermoelemente auf Basis der Zeitkonstanten

Aus Gleichung L.10 wird deutlich, dass der Strahlungseinfluss auf Thermoelemente indirekt und nicht direkt mit der Fläche bzw. dem Durchmesser des Thermoelements zusammenhängt. Vielmehr vergrößert sich mit kleinerem Durchmesser der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wesentlich, was den Einfluss der Wärmestrahlung verringert [76].

Gleichung L.10 nach T umgestellt ergibt:

$$\begin{aligned} T &= \frac{\sigma\epsilon T_{rad}^4 + hT_G}{\sigma\epsilon T^3 + h} \\ &= \left[\frac{h}{\sigma\epsilon} (T_G - T) + T_{rad}^4 \right]^{\frac{1}{4}} \end{aligned} \quad (\text{L.11})$$

Gleichung L.11 muss iterativ berechnet werden. Hierbei kann das Newtonverfahren zur Anwendung kommen (vgl. Kap. M.3.5).

Der Wärmeübergangskoeffizient wird wie folgt berechnet:

$$h = \frac{\lambda}{d} Nu \quad (\text{L.12})$$

λ Wärmeleitfähigkeit des Fluids, d Durchmesser der Thermoelementspitze (charakteristische Länge), Nu Nusseltzahl.

Die Nusseltzahl kann bei Thermoelementen unabhängig von den Konvektionsbedingungen (freie oder erzwungene Konvektion) mit 2,7 angenommen werden [76, 90].

Abbildung L.3 zeigt die Abweichung der gemessenen Temperatur T von der Fluidtemperatur T_G einiger Thermoelemente für verschiedene Strahlungstemperaturen in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur berechnet nach Gleichung L.11³. Der Strahlungseinfluss steigt mit dem Durchmesser des Thermoelements.

Das Zeitverhalten von Thermoelementen kann nach Umformung von Gleichung L.9 mit folgender Beziehung verdeutlicht werden:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} = \frac{h(T_G - T_i) + \sigma\epsilon(T_{rad}^4 - T_i^4)}{\rho \frac{1}{3} r c} \quad (\text{L.13})$$

$$T_{i+1} = \frac{h(T_G - T_i) + \sigma\epsilon(T_{rad}^4 - T_i^4)}{\rho \frac{1}{3} r c} \Delta t + T_i \quad (\text{L.14})$$

Abbildung L.4 zeigt das rechnerische Zeitverhalten einiger Thermoelemente bei Temperaturdifferenzen der Fluidtemperatur von 50 K und 100 K ($T_{i=0} = 298 \text{ K}$) und Strah-

³Zur Berechnung der Nusseltzahl wurde die Wärmeleitfähigkeit des Fluids gleich derjenigen von Luft angenommen und temperaturabhängig berechnet. Der Emissionsgrad beträgt 0,8.

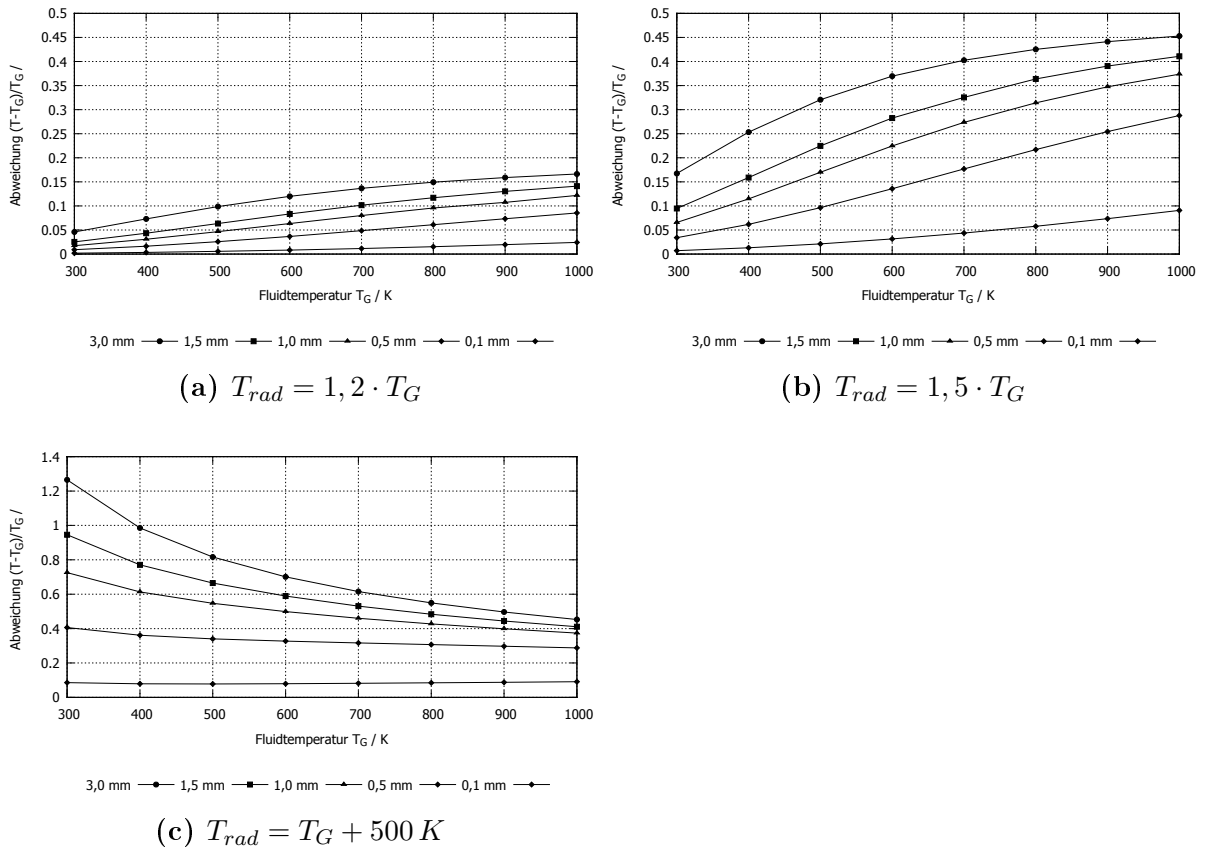


Abbildung L.3: Berechneter Strahlungseinfluss auf Thermoelemente verschiedener Durchmesser im stationären Zustand

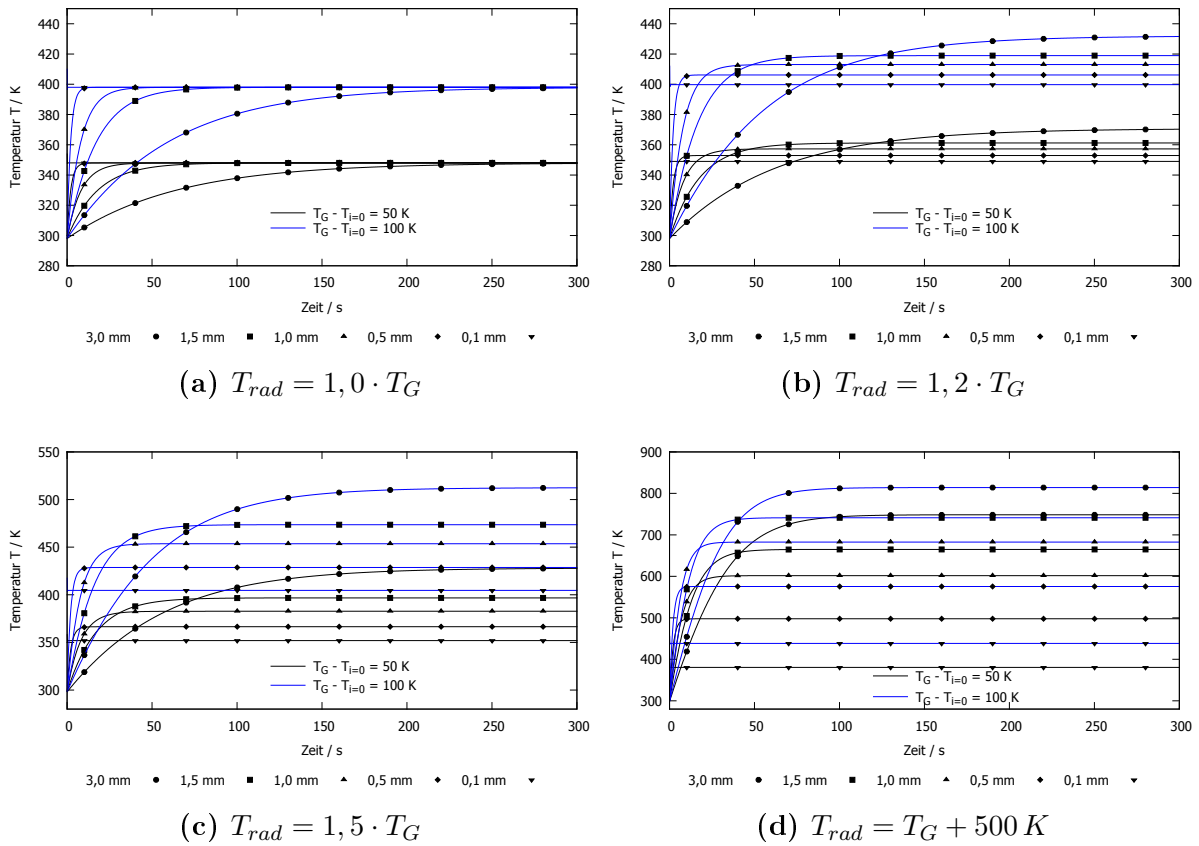


Abbildung L.4: Berechnetes Zeitverhalten von Thermoelementen verschiedener Durchmesser unter Wärmestrahlungseinfluss

lungseinfluss. Die rechnerischen Zeitkonstanten nach Formel L.5 sind in Tabelle L.2 aufgeführt.

Der Mantelwerkstoff der Mantelthermoelemente wurde als Inconel 2.4816 angenommen. Die Stoffwerte können dem Materialdatenblatt entnommen werden [91] ($\rho = 8470 \text{ kgm}^{-3}$, $c = 0,444 \text{ K Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, $\lambda = 14,9 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Tabelle L.2: Rechnerische Zeitkonstante τ

T_{rad}	$T_G - T_{i=0}$ in K	Zeitkonstante τ in s des Thermoelements mit Durchmesser			
		3,0 mm	1,5 mm	1,0 mm	0,5 mm
T_G	50	63	18	8	2
	100	58	17	8	2
$1,2 \cdot T_G$	50	61	18	8	2
	100	55	17	8	2
$1,5 \cdot T_G$	50	56	17	8	2
	100	48	16	8	2
$T_G + 500 K$	50	29	12	7	2
	100	25	11	6	2

Anhang M

Charakterisierung der Plattenthermometer

Inhaltsverzeichnis

M.1 Aufbau der Plattenthermometer	210
M.1.1 Plattenthermometer aus Edelstahl	210
M.1.2 Plattenthermometer aus Kupfer	211
M.2 Energiebilanz	214
M.3 Berechnung der einfallenden Strahlungswärmestromdichte, der Gesamtwärmestromdichte und der adiabaten Oberflächentemperatur	217
M.3.1 Einfallende Strahlungswärmestromdichte	217
M.3.2 Gesamter Wärmestrom	218
M.3.3 Gesamtwärmestromdichte auf die Spanplatte	218
M.3.4 Adiabate Oberflächentemperatur	218
M.3.5 Numerische Berechnung der Differentialgleichungen	219
M.4 Charakterisierung der Plattenthermometer im Cone Calorimeter	220
M.4.1 Zeitkonstante τ	220
M.4.2 Messung der Fluidtemperatur	222
M.4.3 Modellierung der Wärmeleitung in die Isolierung	222
M.4.4 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h	223
M.4.5 Abweichung bei Annahme der Temperatur auf der Rückseite	224



(a) Seitenansicht

(b) Rückseite Edelstahlplatte mit Mantelthermoelement

Abbildung M.1: Plattenthermometer aus Edelstahl

M.4.6	Abweichung bei Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs	226
M.4.7	Abweichung bei instationärem Wärmestrom $\dot{q}_{inc,Heizer}''$	226
M.4.8	Zusammenfassung	229

M.1 Aufbau der Plattenthermometer

M.1.1 Plattenthermometer aus Edelstahl (PT)

Die Plattenthermometer aus Edelstahl bestehen aus einer Edelstahlplatte (Dicke 0,5 mm, Werkstoff V2A 1.4301) mit einer Kantenlänge von 10 cm. Zur Stabilisierung sind die Kanten umgebördelt (5 mm) und an den Eckpunkten verschweißt. Zur Messung der Temperatur ist auf der Rückseite ein Mantelthermoelement (Typ K, Durchmesser 1 mm, Messstelle mit Mantel verschweißt) mit einem Metallstreifen analog ISO 834-1 [92] befestigt. Die Rückseite der Metallplatte ist mit Glaswolle (3,5 cm Promat Promaglaf HTI 1200) und einer Calciumsilikatplatte (1,2 cm Silcapan 850) isoliert. Die thermophysikalischen Eigenschaften können den Tabellen M.3, M.1 und M.2 entnommen werden. Zur Befestigung der Isolation sind zwei Drahtschlingen an den Außenkanten der Metallplatte durch Löcher gezogen, die die Calciumsilikatplatte und die Glaswolle gegen die Metallplatte spannen. Die Metallplatten wurden vor dem ersten Einsatz analog ISO 834-1 [92] für eine Stunde bei 1000 °C in einem Muffelofen vorgealtert.

Zur Messung der Fluidtemperatur über den Plattenthermometern ist auf der Oberseite

Tabelle M.1: Thermophysikalische Eigenschaften Promaglaf HTI 1200 [93]

Größe	Einheit	Wert	Parameter
Rohdichte ρ	kg m^{-3}	130	
Wärmeleitfähigkeit λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,05	200 °C
		0,10	400 °C
		0,16	600 °C
		0,23	800 °C
		0,27	1000 °C
Wärmekapazität c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	1,05	

Tabelle M.2: Thermophysikalische Eigenschaften Silcapan 850

Größe	Einheit	Wert	Parameter	Quelle
Rohdichte ρ	kg m^{-3}	900		[94]
		833		eigene Messung
Wärmeleitfähigkeit λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,22	100 °C	[94]
		0,23	200 °C	[94]
		0,24	400 °C	[94]
		0,25	600 °C	[94]
		0,28	800 °C	[94]
Wärmekapazität c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,8 - 1,2		[95]

ein Mantelthermoelement (Typ K, Durchmesser 1,5 mm) mit der Messstelle circa 1 cm über der Metallplatte angeordnet.

M.1.2 Plattenthermometer aus Kupfer (cdPT)

Die Plattenthermometer aus Kupfer (cdPT copper disc plate thermometer) bestehen aus einer Kupferscheibe (Durchmesser 12 mm, Dicke 0,3 mm), auf deren Rückseite ein Mantelthermoelement (Typ K, Durchmesser 1 mm, Messstelle mit dem Mantel verschweißt) angelötet ist, und wurden in Anlehnung an [36, 87] angefertigt. Die thermophysikalischen Eigenschaften von Kupfer sind in Tabelle M.4 aufgeführt. Bei den Zimmerbränden waren die Plattenthermometer in der Mitte der Spanplattenprobekörper in einem Loch mit einem Durchmesser von 15 mm positioniert. Die Rückseite der Plattenthermometer und der Spanplatte war mit Glaswolle Promat Promaglaf HTI 1200 (vgl. Tab. M.1, Dicke ca. 6 cm) und einer Calciumsilikatplatte (Silcapan 850, vgl. Tab. M.2) isoliert. Die Messung der Fluidtemperatur über der Spanplatte erfolgte mit Mantelthermoelementen (Typ K,

Tabelle M.3: Thermophysikalische Eigenschaften Edelstahl V2A 1.4301

Größe	Einheit	Wert	Parameter	Quelle	Anmerkung
Rohdichte ρ	kg m^{-3}	7900	20 °C	[31]	
Wärmeleitfähigkeit λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	15	20 °C	[31]	
		16	100 °C	[31]	
		18	200 °C	[31]	
		19	300 °C	[31]	
		21	400 °C	[31]	
		22	500 °C	[31]	
		24	600 °C	[31]	
		25	700 °C	[31]	
		26	800 °C	[31]	
		28	900 °C	[31]	
29	1000 °C	[31]			
Wärmekapazität c	$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	0,47	20 °C	[31]	
		0,50	100 °C	[31]	
		0,53	200 °C	[31]	
		0,53	300 °C	[31]	
		0,56	400 °C	[31]	
		0,58	500 °C	[31]	
		0,60	600 °C	[31]	
		0,61	700 °C	[31]	
Emissionsgrad ϵ		0,9		[96, S.17]	Inconel 600
		0,8		[97, S.17]	Inconel 600, verwendeter Wert
		0,8 - 0,9		[98, S.17]	Inconel 600



(a) Einzelansicht (b) Einbauzustand in der Spanplatte (c) Einbauzustand, Nahaufnahme mit Thermoelement zur Messung der Fluidtemperatur

Abbildung M.2: Plattenthermometer aus Kupfer

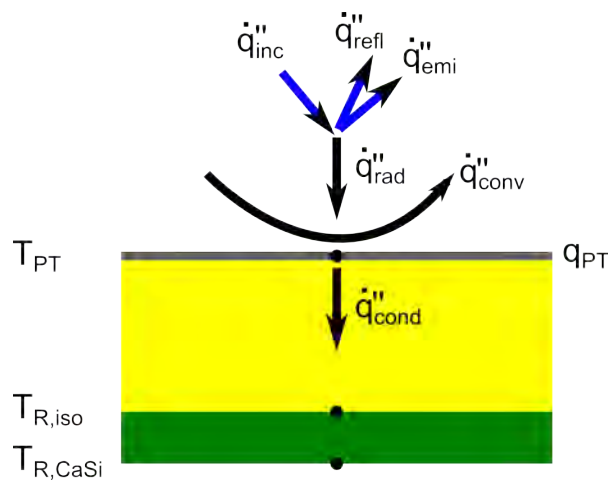


Abbildung M.3: Plattenthermometer: Energiebilanz

Durchmesser 1 mm) neben den Plattenthermometern.

Die Plattenthermometer aus Kupfer wurden nicht vorgealtert, da sich bei Temperaturbeanspruchung eine lose Oxidschicht bildet, die abblättert.

Zweck der Messungen mit den Plattenthermometern aus Kupfer waren die Messung der einfallenden Strahlungswärmestromdichte (Incident Radiation) auf die Spanplatten als Vergleichsgröße zu Versuchen im Cone Calorimeter und die Messung des gesamten Wärmestroms auf die Spanplatte und der adiabaten Oberflächentemperatur als Vergleichsgrößen zu numerischen Simulationen.

Tabelle M.4: Thermophysikalische Eigenschaften Kupfer

Größe	Einheit	Wert	Parameter	Quelle	Anmerkung
Rohdichte ρ	kg m^{-3}	8960	$0\text{ }^\circ\text{C}$	[31]	
		8933		[99]	
Wärmeleitfähigkeit λ	$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	401	$0\text{ }^\circ\text{C}$	[31]	
		399	$20\text{ }^\circ\text{C}$	[99]	
Wärmekapazität c	$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$	0,381	$0\text{ }^\circ\text{C}$	[31]	
		0,382	$20\text{ }^\circ\text{C}$	[99]	
		0,415	$200\text{ }^\circ\text{C}$	[31]	
		0,431	$400\text{ }^\circ\text{C}$	[31]	
		0,456	$600\text{ }^\circ\text{C}$	[31]	
Emissionsgrad ϵ		0,6 - 0,8	$20\text{ }^\circ\text{C}$	[99]	oxidiert
		0,6	$200\text{ }^\circ\text{C}$	[99]	schwarz oxidiert, verwendeter Wert

M.2 Energiebilanz

Die (eindimensionale) Energiebilanz der Metallplatte des Plattenthermometers ist wie folgt (vgl. Abb. M.3):

$$\frac{dq_{PT}}{A_{PT}dt} = \dot{q}_{PT}'' = \dot{q}_{rad}'' + \dot{q}_{conv}'' + \dot{q}_{cond}'' \quad (\text{M.1})$$

$\dot{q}_{PT}'' = \frac{m_{PT}c_{PT}}{A_{PT}} \frac{dT_{PT}}{dt} = C_{PT} \frac{dT_{PT}}{dt}$ im Plattenthermometer gespeicherte Wärme.

Die Wärmeleitung durch das Plattenthermometer wird vernachlässigt.

Die flächenspezifische thermische Trägheit C_{PT} wird mit den temperaturabhängigen Wärmekapazitäten als lineare Funktion bestimmt¹.

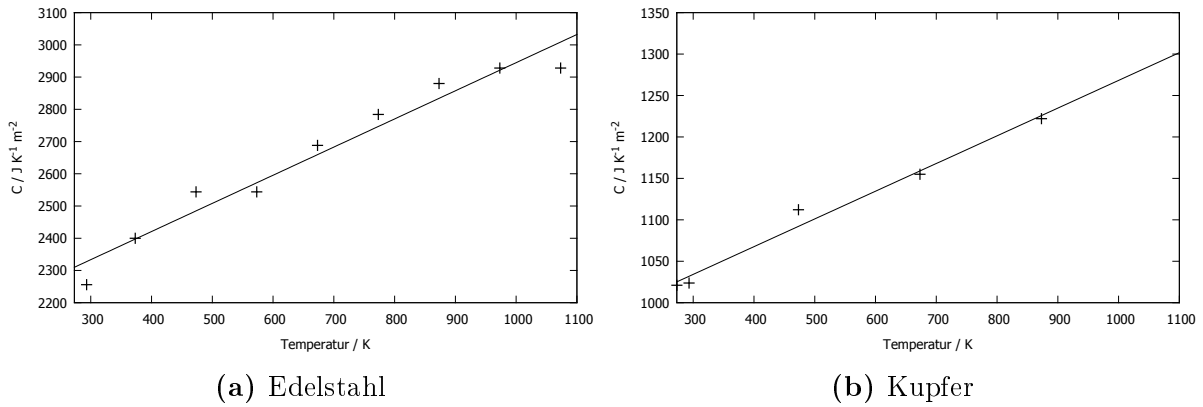
$$C_{PT,V2A}(T_{PT}) = 0,87326 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}} \frac{T_{PT}}{\text{K}} + 2071,56 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (\text{M.2})$$

$$C_{PT,Cu}(T_{PT}) = 0,33438 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}} \frac{T_{PT}}{\text{K}} + 933,88 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (\text{M.3})$$

Für die Strahlungswärmestromdichte \dot{q}_{rad}'' gilt:

$$\dot{q}_{rad}'' = \dot{q}_{inc}'' - \dot{q}_{refl}'' - \dot{q}_{emi}'' \quad (\text{M.4})$$

¹Bei dem Edelstahlplattenthermometer kommt hierbei die gewogene Masse inkl. der Schrauben von 48 g zur Anwendung. Beim Plattenthermometer aus Kupfer wird die Masse aus der Dichte und dem Volumen des Zylinders bestimmt (0,3 g).


 Abbildung M.4: Plattenthermometer: Größe C_{PT}

\dot{q}_{inc}'' einfallende Strahlungswärmestromdichte, \dot{q}_{refl}'' reflektierte Strahlungswärmestromdichte, \dot{q}_{emi}'' emittierte Strahlungswärmestromdichte

Die reflektierte Strahlungswärmestromdichte \dot{q}_{refl}'' stellt sich mit der Annahme, dass der Transmissionsgrad null ist ($\epsilon + \rho + \tau = 1$, $\rho = 1 - \epsilon$) wie folgt dar.

$$\dot{q}_{refl}'' = (1 - \epsilon_{PT}) \dot{q}_{inc}'' \quad (\text{M.5})$$

Die emittierte Strahlungswärmestromdichte \dot{q}_{emi}'' wird mit der Temperatur des Plattenthermometers berechnet:

$$\dot{q}_{emi}'' = \epsilon_{PT} \sigma T_{PT}^4 \quad (\text{M.6})$$

Somit folgt für die Strahlungswärmestromdichte:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{rad}'' &= \dot{q}_{inc}'' - (1 - \epsilon_{PT}) \dot{q}_{inc}'' - \epsilon_{PT} \sigma T_{PT}^4 \\ &= \epsilon_{PT} \left(\dot{q}_{inc}'' - \sigma T_{PT}^4 \right) \end{aligned} \quad (\text{M.7})$$

Für die konvektive Wärmestromdichte gilt:

$$\dot{q}_{conv}'' = h (T_G - T_{PT}) \quad (\text{M.8})$$

Aus Formel M.1, M.7 und M.8 ergibt sich somit die folgende Energiebilanz:

$$\dot{q}_{PT}'' = \epsilon_{PT} \left(\dot{q}_{inc}'' - \sigma T_{PT}^4 \right) + h (T_G - T_{PT}) + \dot{q}_{cond}'' \quad (\text{M.9})$$

Für die Randbedingungen auf der Rückseite des Plattenthermometers gibt es mehrere Ansätze.

1. adiabate Rückseite: $\dot{q}_{cond}'' = 0$
2. Wärmeleitung im stationären Zustand: $\dot{q}_{cond}'' = k_{iso} \frac{dT}{dz}$
3. Instationäre Wärmeleitung durch die bzw. Wärmespeicherung in der Isolation

Im ersten Fall gilt:

$$\dot{q}_{cond}'' = 0 \quad (\text{M.10})$$

Im zweiten Fall gilt:

$$\begin{aligned} \dot{q}_{cond}'' &= k \frac{dT}{dz} \\ &= \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} (T_R - T_{PT}) \end{aligned} \quad (\text{M.11})$$

Die Rückseitentemperatur T_R kann hierbei eine gemessene Größe (auch nur in einem Teil der Isolation) sein, über eine Annahme bestimmt werden (bspw. konstant Umgebungstemperatur $T_R = T_R(t = 0) = T_{Umg}$ oder konstant Fluidtemperatur um das Plattenthermometer $T_R = T_G$) oder über den Wärmeübergang durch Strahlung und Konvektion auf der Rückseite des Plattenthermometers bestimmt werden.

In [97, S.9] beschreibt Häggkvist die Ansätze für eine konstante Temperatur auf der Rückseite und der Betrachtung des Wärmeübergangs auf der Rückseite (für das Standardplattenthermometer nach ISO 834-1). In [96, S.15] vernachlässigt Wickström den gespeicherte Wärmemenge des Plattenthermometers und die Wärmeleitung in die Isolierung und geht somit von einer adiabaten Rückseite aus (für das Standardplattenthermometer nach ISO 834-1).

Im dritten Fall gilt die Fouriersche Differentialgleichung der Wärmeleitung². Diese kann für die hier relevante Betrachtung nur numerisch gelöst werden. Es werden deswegen zwei vereinfachte Ansätze betrachtet.

Für den Fall, dass die Temperatur in oder auf der Rückseite der Isolation gemessen wurde, wird der Wärmestrom auf der Rückseite als die in der Isolation gespeicherte

²Die Isolierung kann nicht als thermisch dünner Körper betrachtet werden, $Bi = \frac{\alpha \cdot s/2}{\lambda} \approx \frac{10 \dots 25 \cdot 0,035/2}{0,08 \dots 0,3} \gg 0, 1$. Das Newtonsche Abkühlungsgesetz kann nicht ohne weitere Betrachtung zur Anwendung kommen.

Wärme betrachtet:

$$\begin{aligned}\dot{q}_{cond}'' &= \frac{dq_{iso}}{A_{iso}dt} \\ &= \rho_{iso}\delta_{iso}c_{iso}\frac{dT_{iso}}{dt}\end{aligned}\tag{M.12}$$

Die Temperatur in der Isolierung ist in dem betrachteten instationären Fall vom Ort und der Zeit abhängig. Sie wird für eine vereinfachende Betrachtung wie folgt angenommen:

$$T_{iso}(t) = \frac{T_{PT}(t) + T_R(t)}{2}\tag{M.13}$$

Für den Fall, dass die Temperatur in oder auf der Rückseite der Isolation unbekannt ist, kann die Wärmeleitung durch die Isolation als Funktion der Plattenthermometertemperatur unter der Voraussetzung, dass die Plattenthermometertemperatur die einzige Variable ist, die im wesentlichen diesen Wärmestrom bestimmt, modelliert werden. Dieser Zusammenhang muss experimentell bestimmt werden.

$$\dot{q}_{cond}'' = f(T_{PT})\tag{M.14}$$

M.3 Berechnung der einfallenden Strahlungswärmestromdichte, der Gesamtwärmestromdichte und der adiabaten Oberflächentemperatur

M.3.1 Einfallende Strahlungswärmestromdichte

Die einfallende Strahlungswärmestromdichte \dot{q}_{inc}'' ergibt sich nach Umstellung von Formel M.9:

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 + \frac{\dot{q}_{PT}'' - h(T_G - T_{PT}) - \dot{q}_{cond}''}{\epsilon_{PT}}\tag{M.15}$$

Für den stationären Zustand ($\dot{q}_{PT}'' = 0$) und eine adiabate Rückseite ($\dot{q}_{cond}'' = 0$) ergibt sich dann die von Wickström in [100, S.1237] vorgestellte Formel:

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 - \frac{h(T_G - T_{PT})}{\epsilon_{PT}}\tag{M.16}$$

M.3.2 Gesamter Wärmestrom

Die Gesamtwärmestromdichte \dot{q}_{tot}'' ist die Summe aus den Wärmestromdichten durch Konvektion und Strahlung, \dot{q}_{conv}'' und \dot{q}_{rad}'' . Aus Gleichung M.9 ergibt sich

$$\begin{aligned}\dot{q}_{tot}'' &= \dot{q}_{rad}'' + \dot{q}_{conv}'' \\ &= \dot{q}_{PT}'' - \dot{q}_{cond}''\end{aligned}\tag{M.17}$$

und für den stationären Zustand $\dot{q}_{PT}'' = 0$ gilt dann

$$\dot{q}_{tot}'' = -\dot{q}_{cond}''\tag{M.18}$$

M.3.3 Gesamtwärmestromdichte auf die Spanplatte

Nach Wickström [96] wird der Wärmestrom auf eine Oberfläche, bei der die adiabate Oberflächentemperatur vorgegeben ist mit folgender Formel berechnet:

$$\dot{q}_{tot}'' = \epsilon_S \sigma (T_{AST}^4 - T_S^4) + h (T_{AST} - T_S)\tag{M.19}$$

Dies wäre ebenfalls bei den Spanplatten der Fall. Der Anteil durch Strahlung kann nicht isoliert betrachtet werden, da hier die adiabate Oberflächentemperatur T_{AST} und nicht die Strahlungstemperatur in die Gleichung eingeht. Aus diesem Grund ist es für diese Betrachtung wichtig, dass das Plattenthermometer einen ähnlichen Emissionsgrad hat, wie die betrachtete Oberfläche. Die Oberflächentemperatur muss im Versuch gemessen werden, um den gesamten Wärmestrom zu bestimmen.

M.3.4 Adiabate Oberflächentemperatur

Die adiabate Oberflächentemperatur AST ist per Definition die Temperatur einer Oberfläche, die keinerlei Wärme absorbieren oder Speichern kann.

$$\epsilon (\dot{q}_{inc}'' - \sigma T_{AST}^4) + h (T_G - T_{AST}) = 0\tag{M.20}$$

Zur Bestimmung der adiabaten Oberflächentemperatur mit dem Plattenthermometer muss Formel M.20 nach \dot{q}_{inc}'' aufgelöst werden:

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{AST}^4 - \frac{h (T_G - T_{AST})}{\epsilon}\tag{M.21}$$

Formeln M.21, M.8 und M.7 in Formel M.1 eingesetzt ergeben folgenden Zusammenhang:

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{PT}'' &= \epsilon_{PT} \left(\sigma T_{AST}^4 - \frac{h(T_G - T_{AST})}{\epsilon_{PT}} - \sigma T_{PT}^4 \right) + h(T_G - T_{PT}) + \dot{q}_{cond}'' \\
 &= \epsilon_{PT} \sigma (T_{AST}^4 - T_{PT}^4) - h(T_G - T_{AST}) + h(T_G - T_{PT}) + \dot{q}_{cond}'' \\
 &= \epsilon_{PT} \sigma (T_{AST}^4 - T_{PT}^4) - h(T_G - T_{AST} - T_G + T_{PT}) + \dot{q}_{cond}'' \\
 &= \epsilon_{PT} \sigma (T_{AST}^4 - T_{PT}^4) - h(T_{PT} - T_{AST}) + \dot{q}_{cond}'' \\
 &= \epsilon_{PT} \sigma (T_{AST}^4 - T_{PT}^4) + h(T_{AST} - T_{PT}) + \dot{q}_{cond}''
 \end{aligned} \tag{M.22}$$

M.3.5 Numerische Berechnung der Differentialgleichungen

Für die instationäre Berechnung der in Abschnitt M.3 hergeleiteten Größen muss das Integral für \dot{q}_{PT}'' berechnet werden. Dies wird mit der Methode der finiten Differenzen durchgeführt.

$$\begin{aligned}
 \dot{q}_{PT}'' &= C_{PT} \frac{dT_{PT}}{dt} \\
 &= C_{PT} \frac{T_{PT}^{i+1} - T_{PT}^i}{\Delta t}
 \end{aligned} \tag{M.23}$$

Δt ist hierbei das Intervall der Messwertspeicherung. Formel M.12 wird analog berechnet. Für die adiabate Oberflächentemperatur ergibt sich dann nach Formel M.22

$$C_{PT} \frac{T_{PT}^{i+1} - T_{PT}^i}{\Delta t} = \left[\epsilon_{PT} \sigma (T_{AST}^4 - T_{PT}^4) + h(T_{AST} - T_{PT}) + \dot{q}_{cond}'' \right]^i \tag{M.24}$$

Die Bestimmung von T_{AST} erfolgt iterativ nach dem Newtonverfahren [96]. Es wird die Funktion $F(T_{AST}^i)$ definiert:

$$F(T_{AST}^i) = \left[\epsilon_{PT} \sigma (T_{AST}^4 - T_{PT}^4) + h(T_{AST} - T_{PT}) + \dot{q}_{cond}'' \right]^i - C_{PT} \frac{T_{PT}^{i+1} - T_{PT}^i}{\Delta t} \tag{M.25}$$

Die adiabate Oberflächentemperatur kann nun für jeden Zeitschritt für $F = 0$ berechnet werden. Die Iterationsformel lautet:

$$T_{AST}^{j+1} = T_{AST}^j - \frac{F(T_{AST}^{i,j})}{F'(T_{AST}^{i,j})} \tag{M.26}$$

$$F'(T_{AST}^{i,j}) = 4\epsilon_{PT}\sigma [T_{AST}^3]^i + h \tag{M.27}$$

j Iterationsschritt, $F'(T_{AST}^{i,j})$ Ableitung von $F(T_{AST}^{i,j})$ nach T_{AST} .

M.4 Charakterisierung der Plattenthermometer im Cone Calorimeter

Die Plattenthermometer wurden im Cone Calorimeter bei definierter einfallender Strahlungswärmestromdichte untersucht.

Das Plattenthermometer aus Edelstahl entsprach in seinem Aufbau den Plattenthermometern, die bei den Zimmerbränden verwendet wurden.

Das Plattenthermometer aus Kupfer wurde in ein Loch in einer Calciumsilikatplatte (Silcpan 850) eingesetzt. Die Rückseite wurde mit Glaswolle (Promaglaf HTI 1200, Dicke 3,5 cm) isoliert. Da das Loch in der Calciumsilikatplatte von der Rückseite ebenfalls mit Glaswolle gefüllt wurde, ergibt sich eine Gesamtdicke der Isolierung von 4,5 cm. Um lange Abkühl dauern bei der Versuchsdurchführung zu umgehen, wurden zwei Plattenthermometer aus Kupfer verwendet. Bei einem war das Mantelthermoelement senkrecht zur Kupferscheibe angelötet, beim anderen war es längs zur Kupferscheibe angelötet und dann rechtwinklig gebogen.

Ergänzend zum Aufbau bei den Zimmerbränden wurde die Fluidtemperatur über dem Plattenthermometer zusätzlich mit Thermoelementen mit einem wesentlich geringeren Durchmesser gemessen (Thermopaar Typ K, glasseideummantelt, Temperaturbeständigkeit 400 °C, Durchmesser 0,1 mm und Thermopaar Typ K, glasseideummantelt, Temperaturbeständigkeit 700 °C, Durchmesser 0,2 mm).

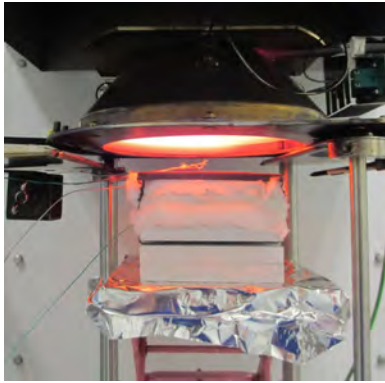
M.4.1 Zeitkonstante τ

Nach [36] sollte die Zeitschrittweite zur Berechnung der Differentialgleichungen über finite Differenzen etwa $\tau/2$ betragen. Die Zeitkonstanten geben darüber hinaus einen Eindruck über die Trägheit der Plattenthermometer.

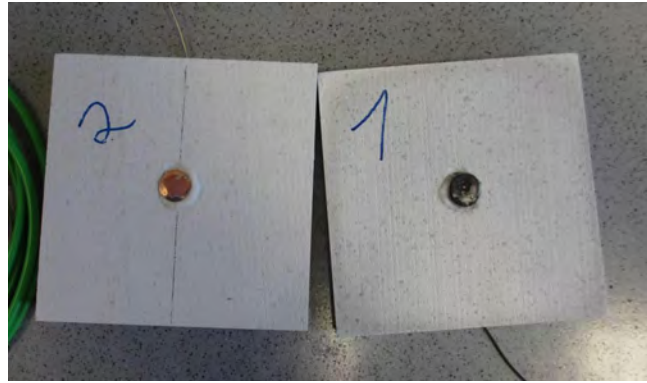
Die Zeitkonstante wird gemessen, indem das kalte Plattenthermometer unter den Heizer mit kalibrierter \dot{q}_{inc}'' gelegt wird, bis die Temperatur des Plattenthermometers T_{PT} konstant ist. Die Berechnung der Zeitkonstanten erfolgt mit folgender Formel:

$$T_\tau = T_0 + 0,632 (T_{End} - T_0) \quad (\text{M.28})$$

$$t_\tau = t(T_{PT} \geq T_\tau) \quad (\text{M.29})$$



(a) Plattenthermometer aus Edelstahl unter dem Cone Calorimeter Heizer



(b) Plattenthermometer aus Kupfer vor und nach der ersten Verwendung (links Kupferscheibe ohne Oxidschicht, rechts mit Oxidschicht)

Abbildung M.5: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Plattenthermometer im Cone Calorimeter

Tabelle M.5: Plattenthermometer: Zeitkonstante τ

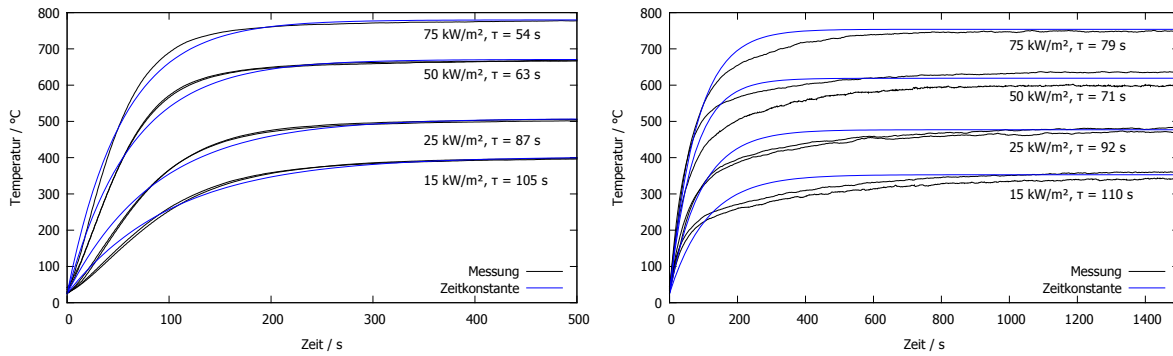
$\dot{q}_{inc,Heizer}''$ in kW m^{-2}	τ in s	
	PT	cdPT
15	108, 102	109, 110
25	86, 87	89, 94
50	62, 63	59, 83
75	54	79

$$\tau = t_\tau - t_0 \quad (\text{M.30})$$

$$T_{PT}(t) = T_0 + (T_{End} - T_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (\text{M.31})$$

Die ermittelten Zeitkonstanten sind in Tabelle M.5 aufgeführt. Die Temperatur der Plattenthermometer in Abhängigkeit von der Zeit kann in Abbildung M.6 eingesehen werden. Die Messung wurde mit den Plattenthermometern aus Edelstahl für jede einfallende Strahlungswärmestromdichte zwei mal durchgeführt. In Abbildung M.6a ist die gute Reproduzierbarkeit der Messung erkennbar.

Bei den Plattenthermometern aus Kupfer wurde die Messung mit jeder der zwei verschiedenen Bauarten je einmal je einfallender Strahlungswärmestromdichte durchgeführt. Das Verhalten der beiden Plattenthermometer unter Einfluss von Wärmestrahlung weist untereinander wesentliche Differenzen auf (vgl. Abb. M.6b). Die ermittelten Zeitkonstanten sind wesentlich größer, als die von Denisse [36] berichteten. Dies kann auf die Verwen-



(a) Plattenthermometer aus Edelstahl (PT) (b) Plattenthermometer aus Kupfer (cdPT)

Abbildung M.6: Zeitverhalten der Plattenthermometer bei konstanter einfallender Strahlungswärmestromdichte

derung von trägeren Mantelthermoelementen als Temperatursensoren zurückgeführt werden. Durch Denisse wurden dünne Thermopaare eingesetzt.

M.4.2 Messung der Fluidtemperatur

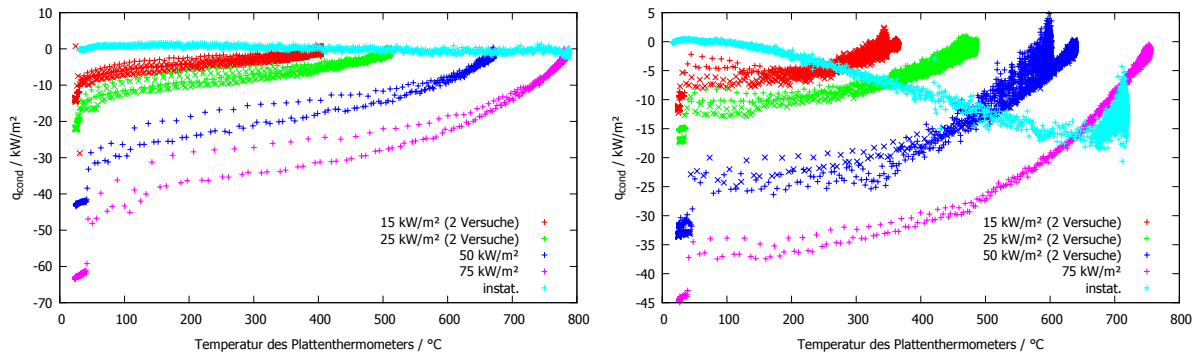
Bei den Raumbrandversuchen wurde die Fluidtemperatur T_G über den Plattenthermometern mit Mantelthermoelementen mit einem Durchmesser von 1,5 mm gemessen. Diese Thermoelemente werden durch Wärmestrahlung beeinflusst (vgl. Abschnitt L.3). Zur Charakterisierung der Plattenthermometer im Cone Calorimeter wurden zusätzlich Thermoelemente (Thermopaare) mit Durchmessern von 0,2 mm und 0,1 mm genutzt, um den Einfluss durch Wärmestrahlung auf die Mantelthermoelemente einschätzen zu können.

M.4.3 Modellierung der Wärmeleitung in die Isolierung

Die Wärmeleitung in die Isolierung wird untersucht, indem das kalte Plattenthermometer unter den Heizer mit eingestelltem \dot{q}_{inc}'' gelegt wird, bis die Temperatur des Plattenthermometers $T_{PT} = const.$ ist. Die Berechnung erfolgt mit folgender Formel:

$$\dot{q}_{cond}'' = \left[\dot{q}_{PT}'' - \epsilon_{PT} \left(\dot{q}_{inc}'' - \sigma T_{PT}^4 \right) - h (T_G - T_{PT}) \right] \quad (M.32)$$

In Abbildung M.7 ist der Wärmestrom in die Isolierung \dot{q}_{cond}'' in Abhängigkeit von der Plattenthermometertemperatur für verschiedene Bestrahlungsstärken dargestellt. Der Wärmestrom ist nicht primär nur von der Temperatur des Plattenthermometers abhängig. Somit ist die Ermittlung einer einfachen Funktion für diesen Wärmestrom in



(a) Plattenthermometer aus Edelstahl (PT) (b) Plattenthermometer aus Kupfer (cdPT)

Abbildung M.7: Wärmestrom in die Isolierung der Plattenthermometer \dot{q}''_{cond} in Abhängigkeit von der Plattenthermometertemperatur

Abhängigkeit von der Plattenthermometertemperatur nicht möglich.

M.4.4 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h

Der Wärmeübergangskoeffizient wird im stationären Zustand bestimmt ($T_{PT} = const.$, $T_R = const.$, $\dot{q}''_{PT} = 0$ und $\dot{q}''_{cond} = 0$). Die Temperatur der Gasphase wird mit Thermoelementen mit einem Durchmesser von 0,1 mm gemessen. Die Absaugung des Cone Calorimeters war auf einen Volumenstrom von 24 l s^{-1} eingestellt um die Kühlung der Haube und des folgenden Rohrsystems zu gewährleisten.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird mit folgender Formel berechnet:

$$h = \frac{-\dot{q}''_{cond} - \epsilon_{PT} (\dot{q}''_{inc} - \sigma T_{PT}^4)}{T_G - T_{PT}} \quad (\text{M.33})$$

Für den Fall, dass ein stationärer Zustand erreicht wird ($T_{PT} = const. \neq T_R = const.$) gilt:

$$h = \frac{-\frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} (T_R - T_{PT}) - \epsilon_{PT} (\dot{q}''_{inc} - \sigma T_{PT}^4)}{T_G - T_{PT}} \quad (\text{M.34})$$

Die ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten sind in Tabelle M.6 aufgeführt. Die Werte weichen teilweise erheblich von Literaturangaben ab³ und variieren stark. Dies wird auf

³Wärmeübergangskoeffizient berechnet für horizontale Plattenthermometer:

$11 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ to $12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [87, S.115]; $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [97, S.28] mit Verweis auf [101]; $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (horizontal und vertikal) [101, Formel 12]; $10,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ to $11,4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (horizontal), $11,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ to $12,5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (vertikal) [98, S.1004]; $11 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (cdPT horizontal im Cone Calorimeter) [36, S.29ff] mit Verweis auf [102]

Wärmeübergangskoeffizienten gemessen im Cone Calorimeter:

$10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ to $15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ [103]; $15 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ und größer [104, 105]

Tabelle M.6: Plattenthermometer: konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h

$\dot{q}_{inc,Heizer}''$ in kW m ⁻²	h in kW m ⁻² K ⁻¹	
	PT	cdPT
15	12, 24	39, 19
25	12, 18	20, 20
50	9, 14, 18, 16	22, 42
75	13, 7, 6	13, 81

die relativ grobe Messmethode und evtl. Abweichungen durch erzwungene Konvektion (eingeschaltete Absaugung des Cone Calorimeters) zurückgeführt.

M.4.5 Abweichung bei Annahme der Temperatur auf der Rückseite

Die Abweichung der gemessenen einfallenden Strahlungswärmestromdichte $\dot{q}_{inc,PT}''$ zur vorgegebenen Strahlungswärmestromdichte $\dot{q}_{inc,Heizer}''$ wird im stationären Zustand ($T_{PT} = const.$, $T_R = const.$, $\dot{q}_{PT}'' = 0$) bestimmt. Der konvektive Wärmeübergang wird mit der Fluidtemperatur, gemessen mit dem Thermopaar (0,1 mm Durchmesser) und einem konstanten Wärmeübergangskoeffizient ($h = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) berechnet.

Temperatur auf der Rückseite konstant Umgebungstemperatur

Es wird angenommen, dass zu Beginn der Messung die Temperatur der Rückseite gleich der Temperatur der Umgebung ist. Diese Temperatur wird konstant als Temperatur der Rückseite gesetzt.

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 + \frac{-h(T_G - T_{PT}) - \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}(T_{0,Umg} - T_{PT})}{\epsilon_{PT}} \quad (\text{M.35})$$

Temperatur auf der Rückseite gleich Temperatur der Plattenthermometers (adiabate Rückseite)

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 - \frac{h(T_G - T_{PT})}{\epsilon_{PT}} \quad (\text{M.36})$$

Die Ergebnisse der beiden Betrachtungen sind in Tabelle M.7 aufgeführt. Bei Annahme einer adiabaten Rückseite ist die relative Abweichung zwischen vorgegebener und

Tabelle M.7: Plattenthermometer: relative Abweichung f zwischen vorgegebener und ermittelter einfallender Strahlungswärmestromdichte bei Annahme der Temperatur auf der Rückseite

		$T_R = T_{0,Umg}$		$\dot{q}''_{cond} = 0$ (adiabat)	
$\dot{q}''_{inc,Heizer}$ in kW m ⁻²	$\dot{q}''_{inc,PT}$ in kW m ⁻²	f in %	$\dot{q}''_{inc,PT}$ in kW m ⁻²	f in %	
Plattenthermometer (PT)					
15,4	15,0	2,6	14,3	7,1	
15,5	13,8	11,0	13,1	15,5	
25,4	25,0	1,6	23,9	5,9	
25,4	24,1	5,1	22,9	9,8	
50,2	48,9	2,6	46,9	6,6	
50,2	49,3	1,8	47,4	5,6	
50,4	50,8	0,8	48,8	3,2	
50,4	49,6	1,6	47,6	5,6	
75,5	75,1	0,8	72,4	4,4	
75,7	77,0	2,0	74,2	1,7	
Kupferplattenthermometer (cdPT)					
15,4	12,8	16,9	12,1	21,4	
15,5	10,5	32,3	9,9	36,1	
25,4	22,0	13,4	21,0	17,3	
25,4	22,6	11,0	21,5	15,4	
50,2	45,1	10,2	43,3	13,7	
50,4	38,5	23,6	36,8	27	
73,5	71,8	2,3	69,2	5,9	
75,7	58,9	22,2	56,6	25,2	

ermittelter einfallender Strahlungswärmestromdichte in den meisten Fällen größer, als bei Annahme der Rückseitentemperatur gleich der Umgebungstemperatur.

M.4.6 Abweichung bei Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs

Die Abweichung der gemessenen einfallenden Strahlungswärmestromdichte $\dot{q}_{inc,PT}''$ zur vorgegebenen Strahlungswärmestromdichte $\dot{q}_{inc,Heizer}''$ wird im stationären Zustand ($T_{PT} = const.$, $T_R = const.$, $\dot{q}_{PT}'' = 0$) bestimmt. Die Wärmeleitung auf der Rückseite wird vernachlässigt bzw. wird mit einer konstanten Rückseitentemperatur $T_R = T_{0,Umg}$ berechnet. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient wird mit konstant $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ angenommen.

Es werden drei Fälle betrachtet:

- Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs mit der Temperatur, die mit den Thermoelementen (Durchmesser 0,1 mm) gemessen wurde
- Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs mit der Temperatur, die mit den Mantelthermoelementen (Durchmesser 1,5 mm) gemessen wurde
- Vernachlässigung des konvektiven Wärmeübergangs

Die Berechnungen werden analog dem vorherigen Abschnitt mit Formel M.35 durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle M.8 dargestellt. Bei Nutzung der Messeerte des Thermopaars (Durchmesser 0,1 mm) ist die relative Abweichung am kleinsten. Der konvektive Wärmeübergang kann nicht vernachlässigt werden.

M.4.7 Abweichung bei instationärem Wärmestrom $\dot{q}_{inc,Heizer}''$

Die Abweichung der gemessenen einfallenden Strahlungswärmestromdichte $\dot{q}_{inc,PT}''$ zur vorgegebenen Strahlungswärmestromdichte $\dot{q}_{inc,Heizer}''$ wird im instationären Zustand ($T_{rad,Heizer} = f(t)$) bestimmt. Das kalte Plattenthermometer wird bei ausgeschaltetem Heizer in das Cone Calorimeter eingebracht. Anschließend wird der Heizer auf eine Zieltemperatur eingestellt. Zur Darstellung des Wärmestroms $\dot{q}_{inc,Heizer}''$ wurde aus den Kalibrierpunkten eine Kalibrierkurve erstellt (vgl. Abb. M.8). Der konvektive Wärmeübergang wird mit der Fluidtemperatur, gemessen mit dem Thermopaar (0,1 mm Durchmesser) und einem konstanten Wärmeübergangskoeffizient ($h = 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) berechnet.

Tabelle M.8: Plattenthermometer: relative Abweichung f zwischen vorgegebener und ermittelter einfallender Strahlungswärmestromdichte bei Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs

$\dot{q}_{inc,Heizer}''$ in kW m ⁻²	$T_G = T_{TE\ 0,1}$		$T_G = T_{MTE\ 1,5}$		$\dot{q}_{conv}'' = 0$	
	$\dot{q}_{inc,PT}''$ in kW m ⁻²	f in %	$\dot{q}_{inc,PT}''$ in kW m ⁻²	f in %	$\dot{q}_{inc,PT}''$ in kW m ⁻²	f in %
Plattenthermometer (PT)						
15,4	15	2,6	13,7	11	12,6	18,2
15,5	13,8	11	13,5	12,9	12,5	19,4
25,4	25	1,6	23,9	5,9	22,1	13
25,4	24,1	5,1	23,2	8,7	22,4	11,8
50,2	48,9	2,6	48	4,4	47,1	6,2
50,2	49,3	1,8	48,4	3,6	47,7	5
50,4	50,8	0,8	48,2	4,4	46,9	6,9
50,4	49,6	1,6	48	4,8	47,2	6,3
75,7	75,1	0,8	73,6	2,8	72,4	4,4
73,5	75	2	72,1	1,9	70,6	3,9
75,5	77	2	74,8	0,9	74,3	1,6
Kupferplattenthermometer (cdPT)						
15,4	12,8	16,9	11,6	24,7	9,9	35,7
15,5	10,5	32,3	9,7	37,4	8,8	43,2
25,4	22	13,4	20,9	17,7	18,3	28
25,4	22,6	11	20,9	17,7	19,7	22,4
50,2	45,1	10,2	42,4	15,5	41	18,3
50,4	38,5	23,6	35,5	29,6	34,7	31,2
73,5	71,8	2,3	68,3	7,1	65,7	10,6
75,7	58,9	22,2	56,9	24,8	56,6	25,2

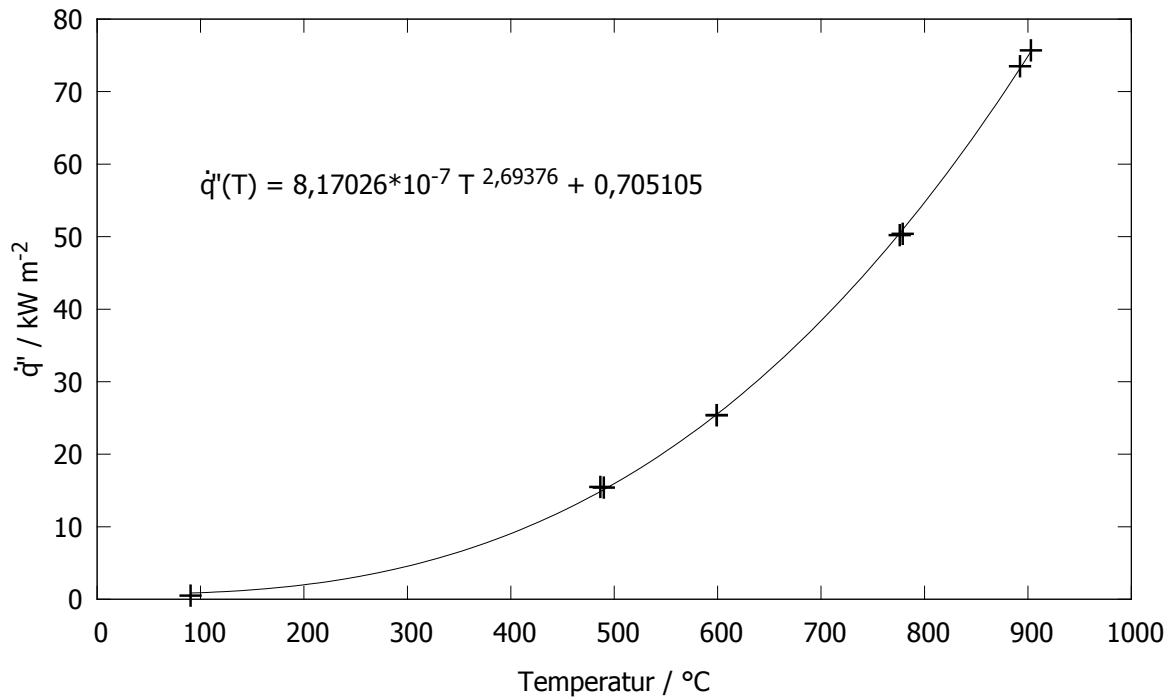


Abbildung M.8: Kalibrierkurve zur Darstellung der Strahlungswärmestromdichte des Cone Calorimeter Heizers in Abhängigkeit von seiner Temperatur

Folgende Fälle wurden betrachtet:

Wärmestrom auf der Rückseite berechnet für den stationären Fall;

Rückseitentemperatur gemessen

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 + \frac{\dot{q}_{PT}'' - h(T_G - T_{PT}) - \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}(T_R - T_{PT})}{\epsilon_{PT}} \quad (M.37)$$

Wärmestrom auf der Rückseite berechnet für den stationären Fall;

Rückseitentemperatur konstant

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 + \frac{\dot{q}_{PT}'' - h(T_G - T_{PT}) - \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}(T_{0,Umg} - T_{PT})}{\epsilon_{PT}} \quad (M.38)$$

Wärmestrom auf der Rückseite modelliert mit dem Ansatz für die gespeicherte Wärme in der Isolation

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 + \frac{\dot{q}_{PT}'' - h(T_G - T_{PT}) - \rho_{iso} \delta_{iso} c_{iso} \frac{dT_{iso}}{dt}}{\epsilon_{PT}} \quad (M.39)$$

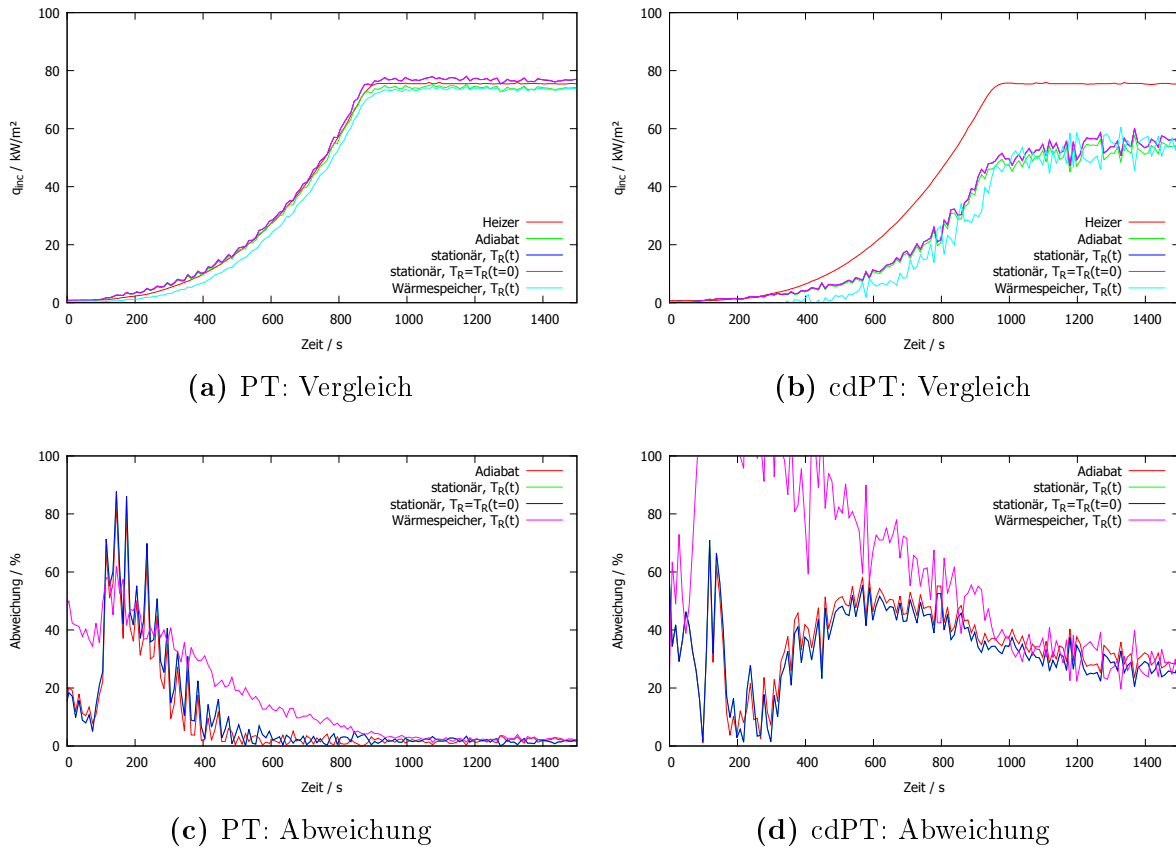


Abbildung M.9: Vergleich der Berechnungsmethoden für den Wärmestrom durch Wärmeleitung in die Isolierung und Abweichung der berechneten Strahlungswärmestromdichte zur Strahlungswärmestromdichte des Heizers

Wärmestrom auf der Rückseite vernachlässigt (adiabat)

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 + \frac{\dot{q}_{PT}'' - h(T_G - T_{PT})}{\epsilon_{PT}} \quad (\text{M.40})$$

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung M.9 dargestellt.

M.4.8 Zusammenfassung

Auf Basis der obigen Untersuchungen werden die gesuchten Größen aus den Messungen mit den Plattenthermometern bei den Raumbrandversuchen mit folgenden Annahmen berechnet:

Der konvektive Wärmeübergang wird mit einem Wärmeübergangskoeffizienten von $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ berechnet. Als Fluidtemperatur wird die Temperatur der Mantelthermoelemente mit 1,5 mm Durchmesser verwendet.

Die Wärmeleitung in die Isolierung wird grundsätzlich über den Ansatz für die sta-

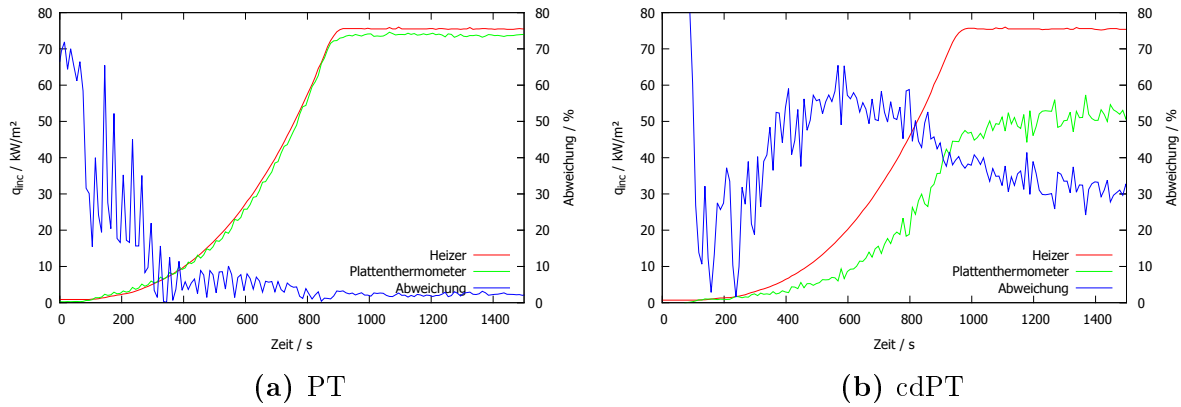


Abbildung M.10: Berechnete Strahlungswärmestromdichte und Abweichung zur Strahlungswärmestromdichte des Heizers, Berechnung mit den in Kapitel M.4.8 erläuterten Annahmen

tionäre Wärmeleitung und eine konstante Temperatur auf der Rückseite der Isolierung (Anfangstemperatur des Plattenthermometers) bestimmt.

Für die Berechnung der einfallenden Strahlungswärmestromdichte sind die resultierenden Ergebnisse und Abweichungen bei den Versuchen im Cone Calorimeter in Abbildung M.10 dargestellt. Für das Plattenthermometer aus Edelstahl unterschreitet der relative Fehler (Abweichung) bei instationärer Strahlungswärmestromdichte ab etwa 10 kW m^{-2} einen Wert von 10 % und liegt somit in einer akzeptablen Größenordnung. Bei den Kupferplattenthermometer liegt der relative Fehler nicht unter 30 %. Die berechneten Werte der Kupferplattenthermometer sind also mit großen Unsicherheiten belegt.

Die Zeitkonstanten der hier verwendeten Plattenthermometer sind wesentlich größer als diejenige ähnlicher Plattenthermometer andere Experimente in der Literatur [36]. Dies wird hauptsächlich auf die verwendeten Thermolemente (Mantelthermolemente mit 1,5 mm Durchmesser anstatt wesentlich dünnere Thermolemente) und die Trägheit dieser Thermolemente zurückgeführt⁴.

⁴Aufgrund der Anforderungen bei dieser Versuchsserie (Löscheinsatz, fünf Vollbrände mit erwarteten Maximaltemperaturen von bis zu $1000 \text{ }^\circ\text{C}$) mussten Mantelthermolemente mit diesem Durchmesser verwendet werden.

Anhang N

Messergebnisse

Inhaltsverzeichnis

N.1	Wärmefreisetzungsrate und freigesetzte Wärme	232
N.2	Masse, Massenverlustrate und absoluter Massenverlust . . .	236
N.3	Temperaturen im Brandraum	239
N.4	Messergebnisse Plattenthermometer	251
N.4.1	Einfallende Strahlungswärmestromdichte	251
N.4.2	Gesamtwärmestromdichte	255
N.4.3	Adiabate Oberflächentemperatur	260
N.5	Massenstrom durch die Brandraumöffnung	265
N.6	Spanplattenprobekörper	267
N.7	Gasspezieskonzentrationen	269

N.1 Wärmefreisetzungsrate und freigesetzte Wärme

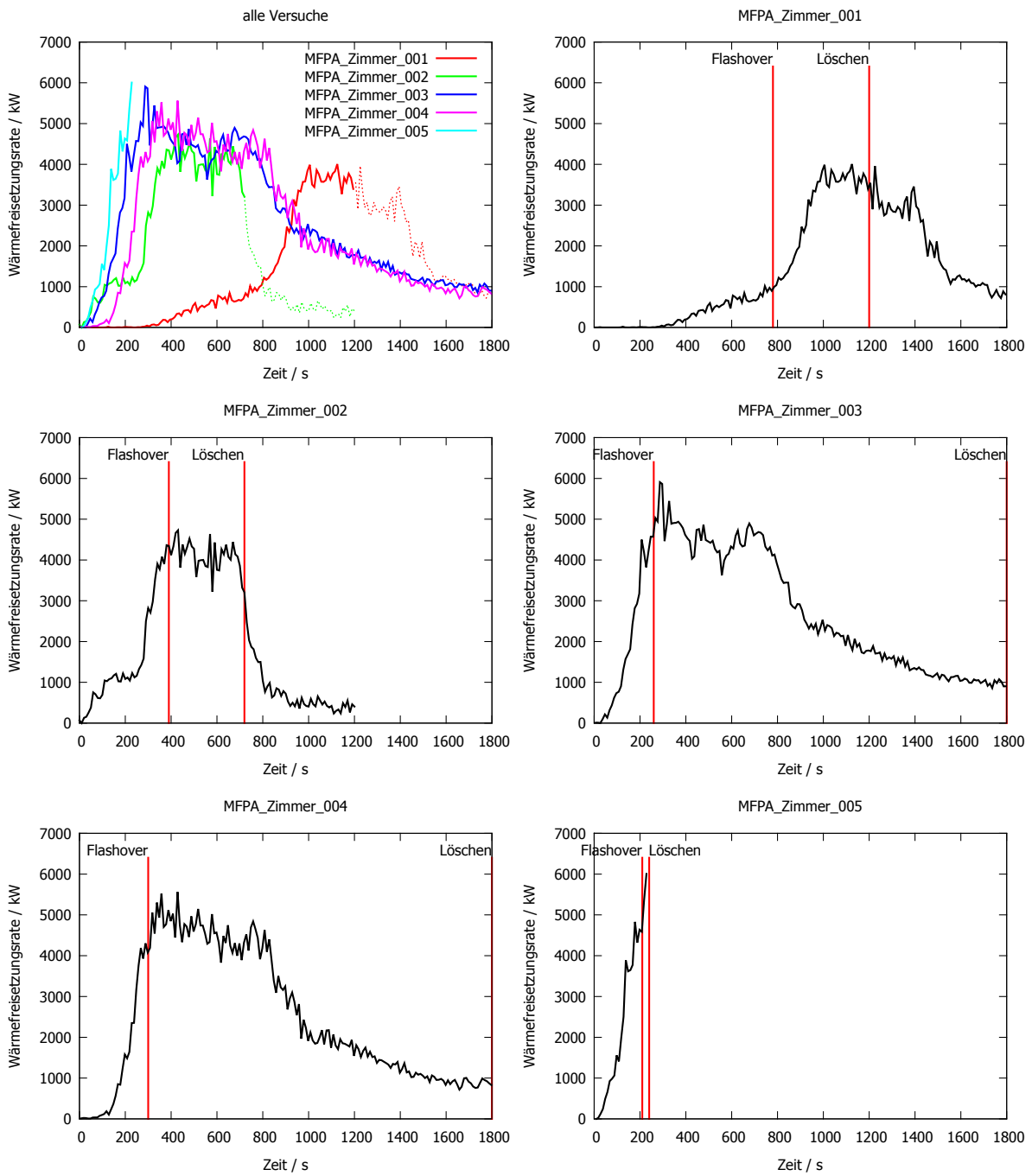


Abbildung N.1: Wärmefreisetzungsrate: vergleichende Darstellung der Versuche (ab Löscheintritt gestrichelte Linien)

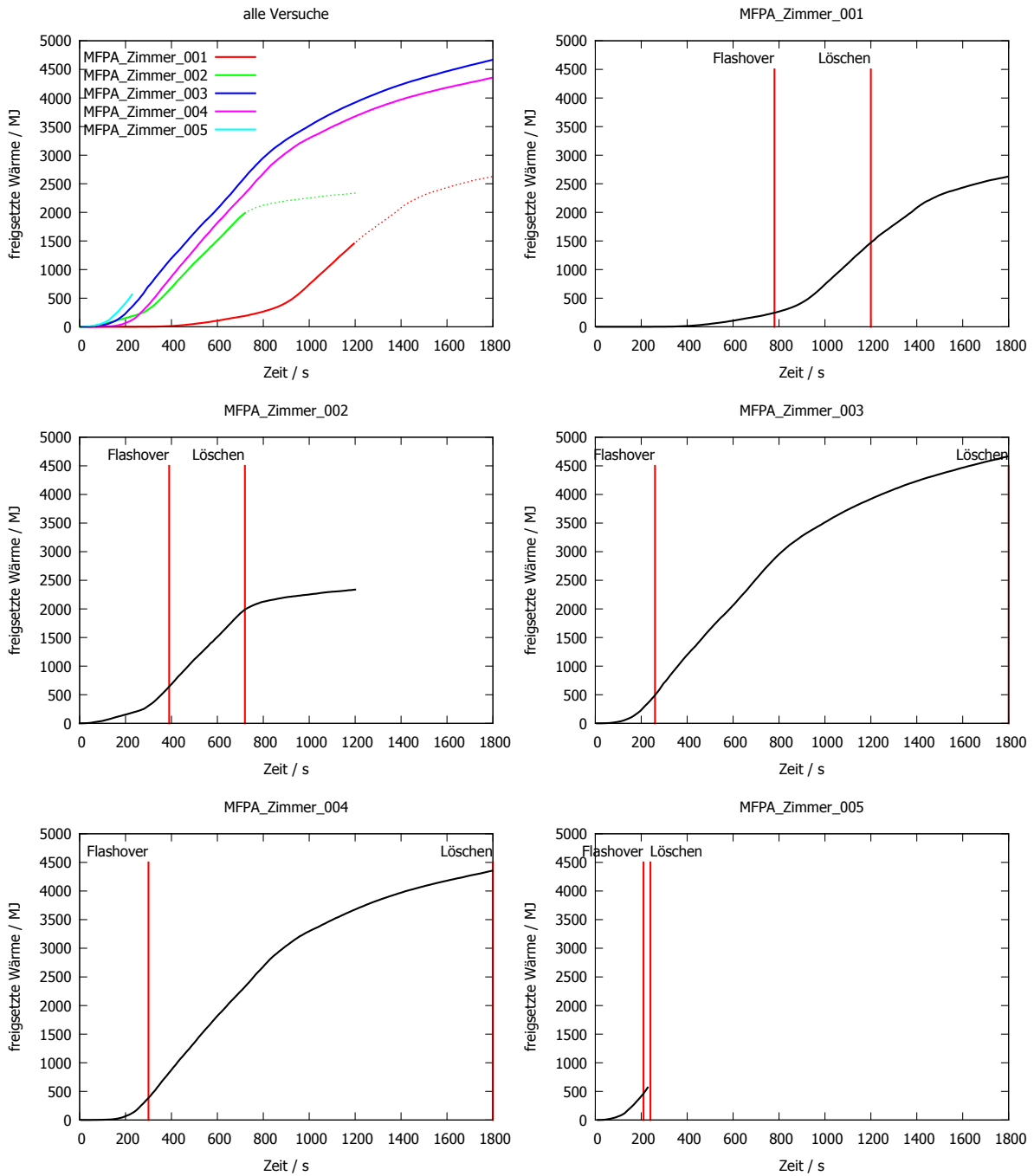


Abbildung N.2: Freigesetzte Wärme: vergleichende Darstellung der Versuche (ab Löschbeginn gestrichelte Linien)

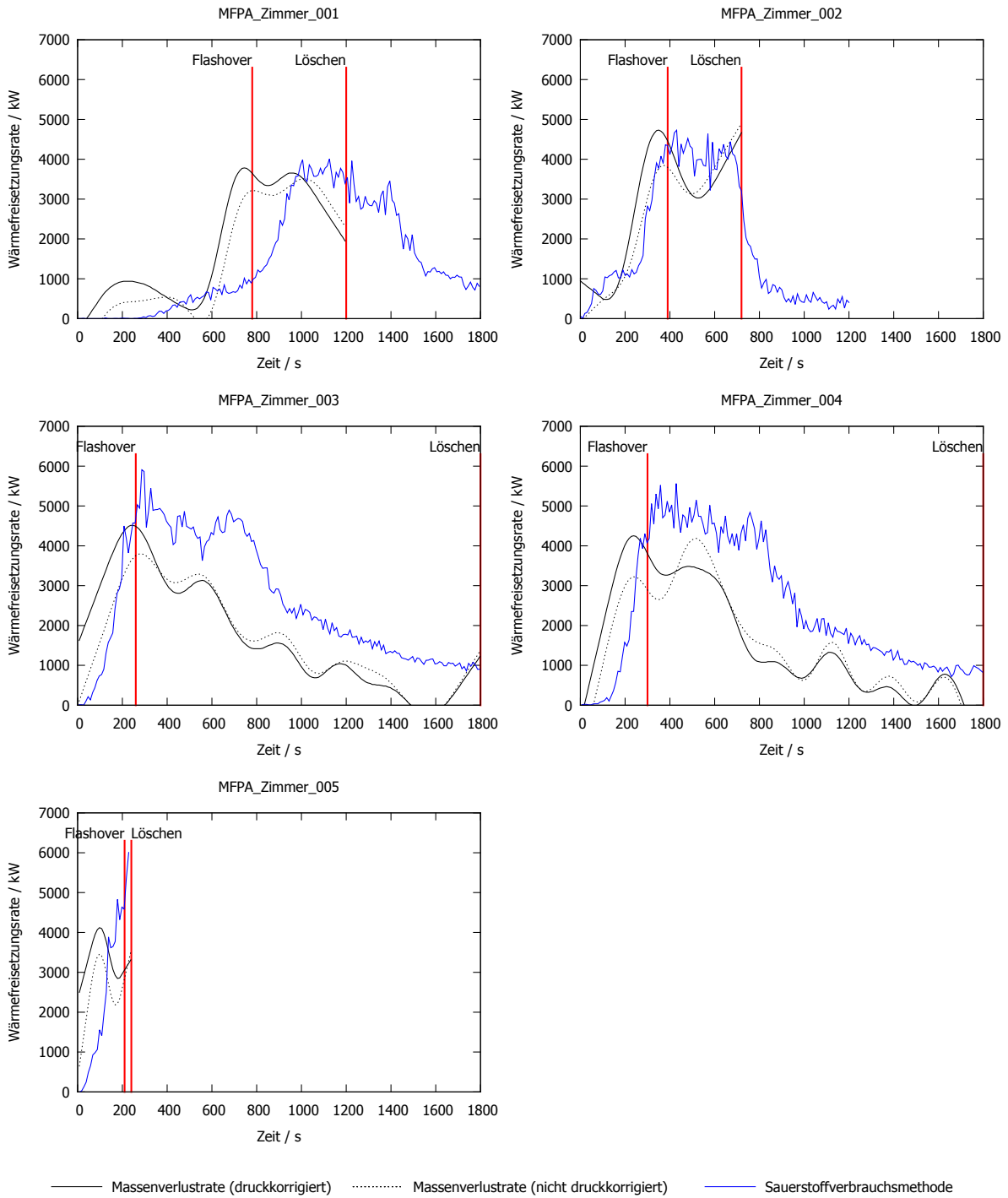


Abbildung N.3: Vergleich der Wärmefreisetzungsrate, Berechnung als Produkt der Massenverlustrate mit dem mittleren Heizwert und mit der Sauerstoffverbrauchsmethode. Abweichungen (im zeitlichen Verlauf) zwischen den Methoden können durch die Strömung der Rauchgase durch den Schlot begründet sein (vgl. Kap. 3.3.6). Dies wirkt sich vor allem bei Versuch MFPA_Zimmer_001 aus.

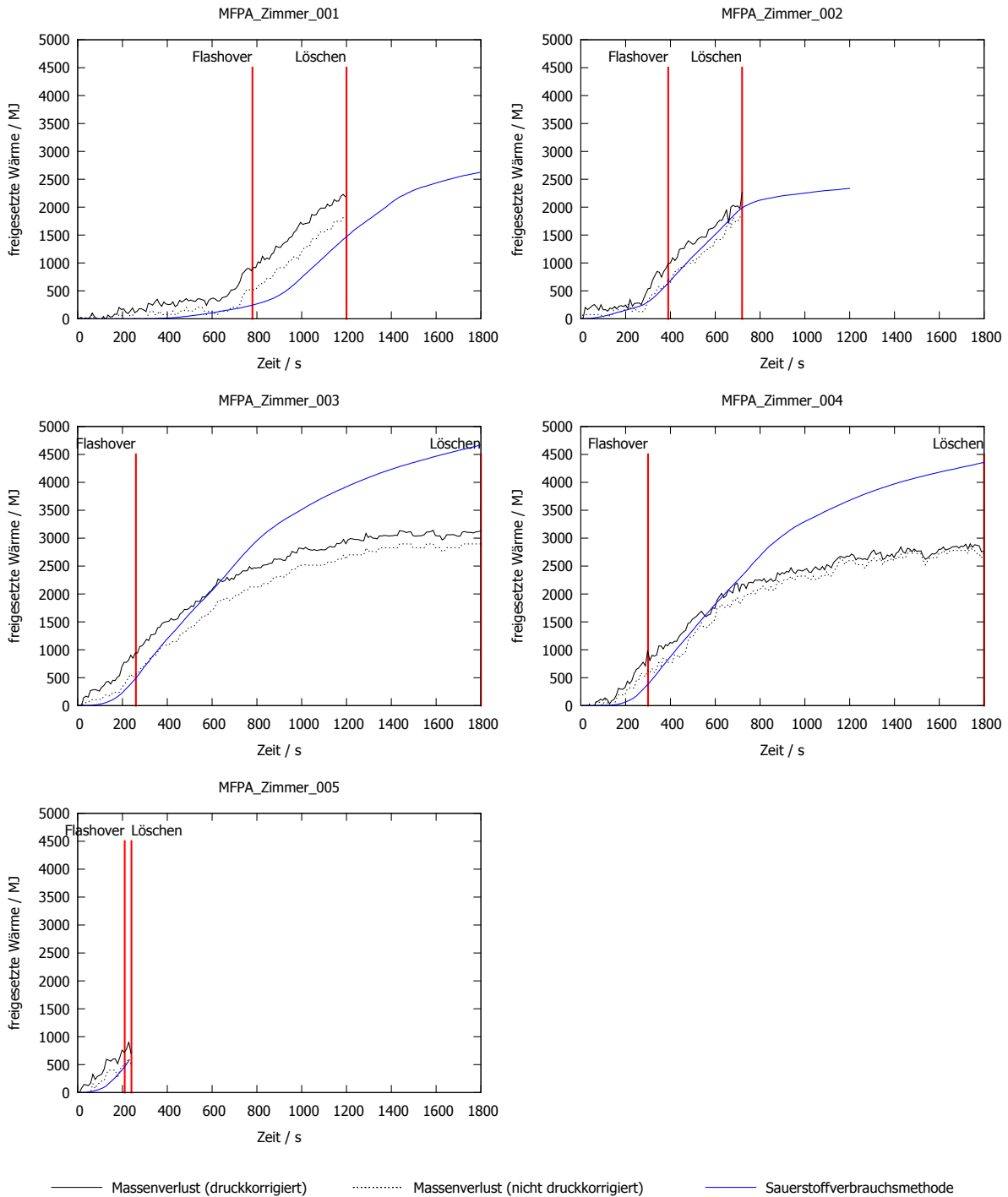


Abbildung N.4: Vergleich der freigesetzten Wärme, Berechnung als Produkt des Massenverlusts mit dem mittleren Heizwert und mit der Sauerstoffverbrauchsmethode. Abweichungen (im zeitlichen Verlauf) zwischen den Methoden können durch die Strömung der Rauchgase durch den Schlot begründet sein (vgl. Kap. 3.3.6). Dies wirkt sich vor allem bei Versuch MFWA_Zimmer_001 aus. Bei der Berechnung auf Basis der Massenverlustrate wurde die Verbrennungseffektivität nicht berücksichtigt. Somit wird bei diesem Ansatz die Wärmefreisetzungsrate tendenziell überschätzt.

N.2 Masse, Massenverlustrate und absoluter Massenverlust

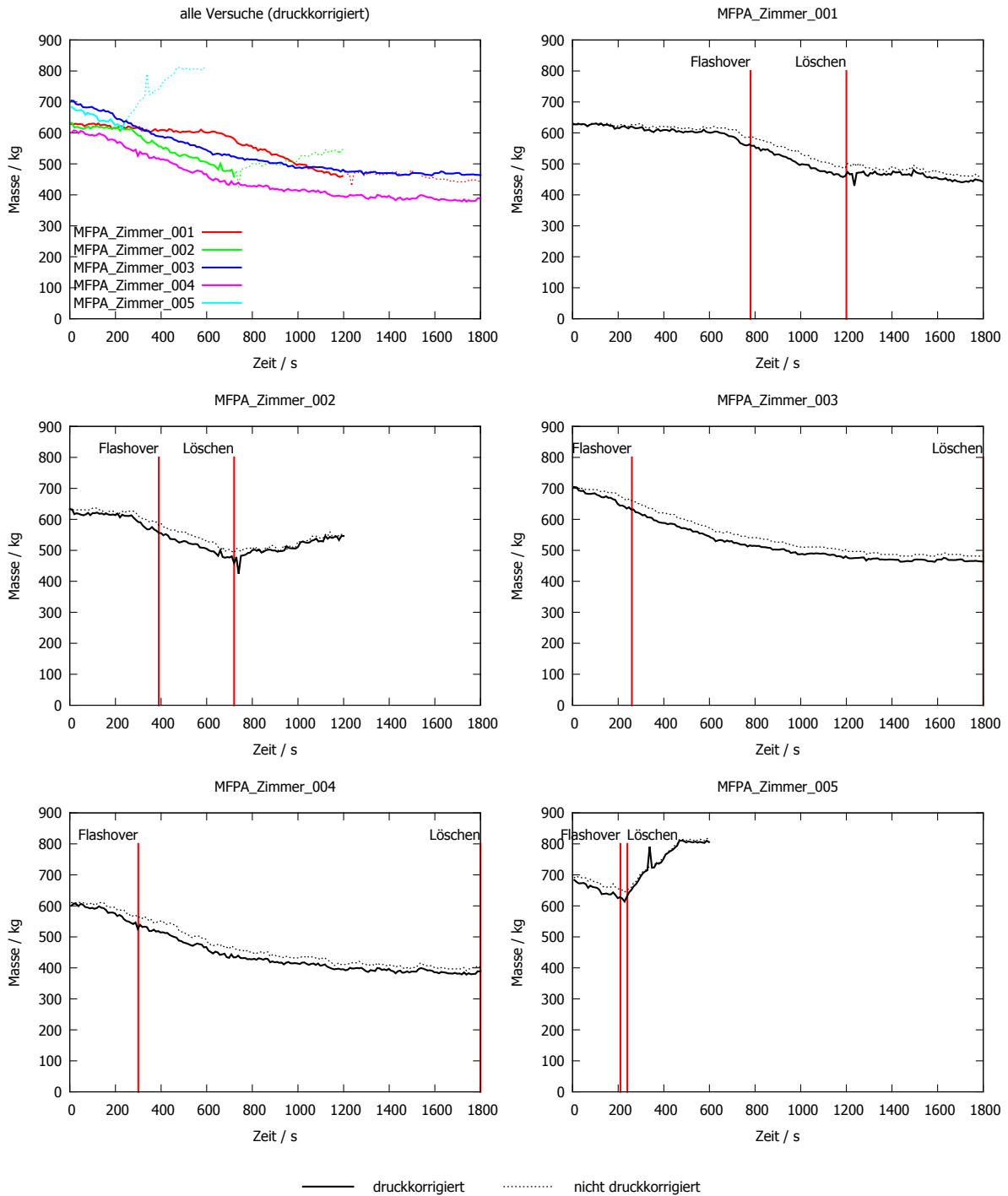


Abbildung N.5: Masse: vergleichende Darstellung der Versuche

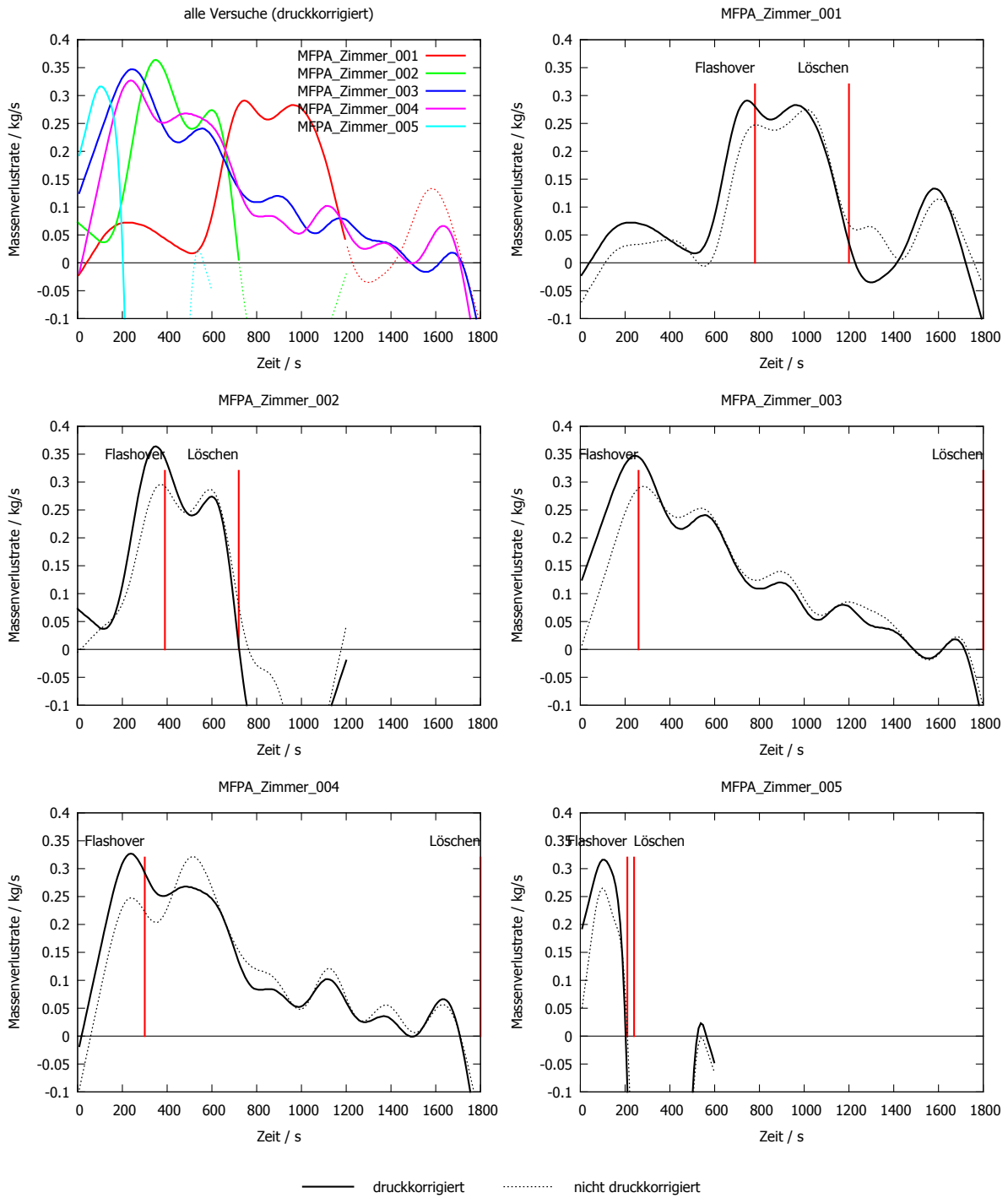


Abbildung N.6: Massenverlust: vergleichende Darstellung der Versuche

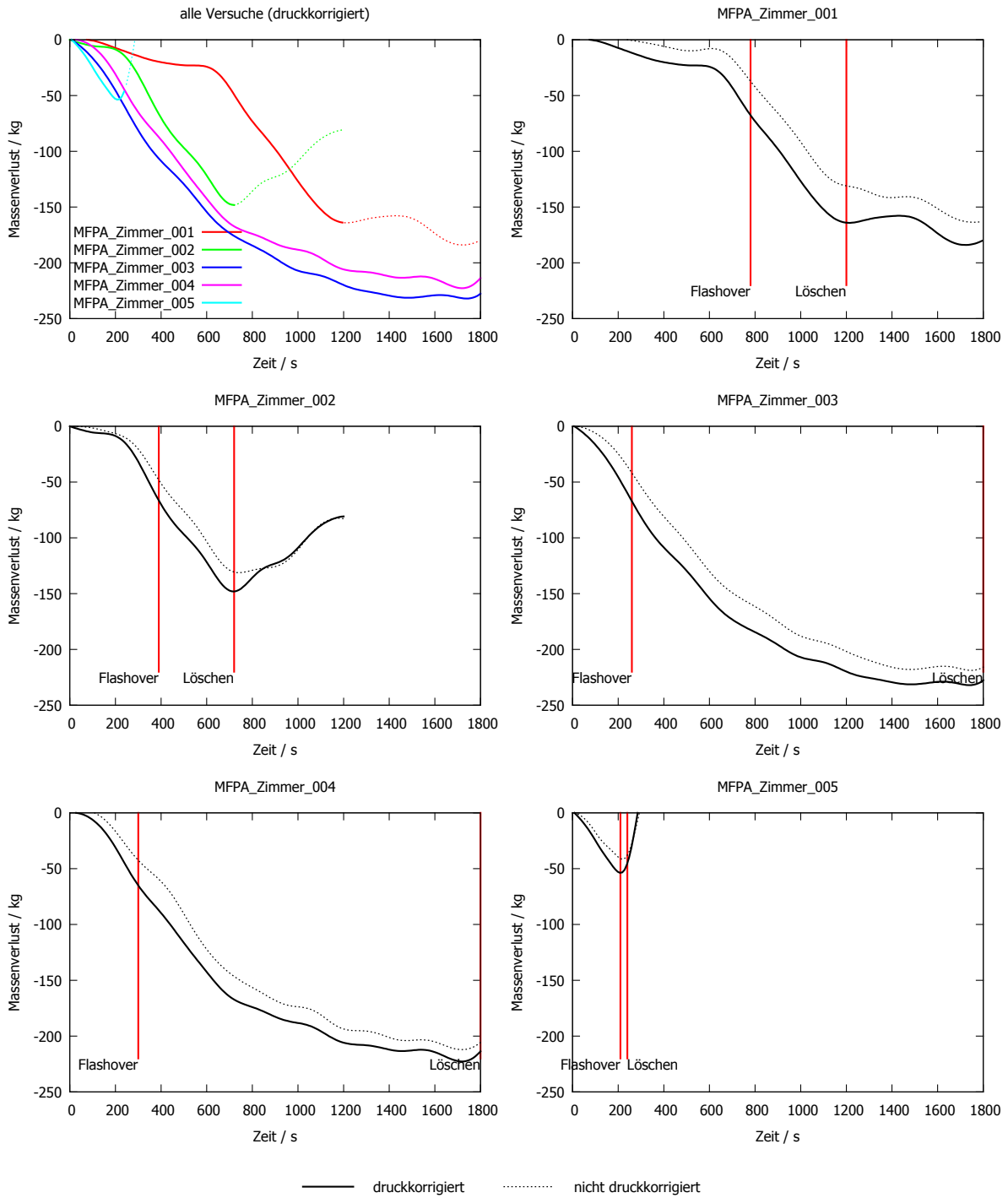


Abbildung N.7: Absoluter Massenverlust: geglättete, vergleichende Darstellung der Versuche

N.3 Temperaturen im Brandraum

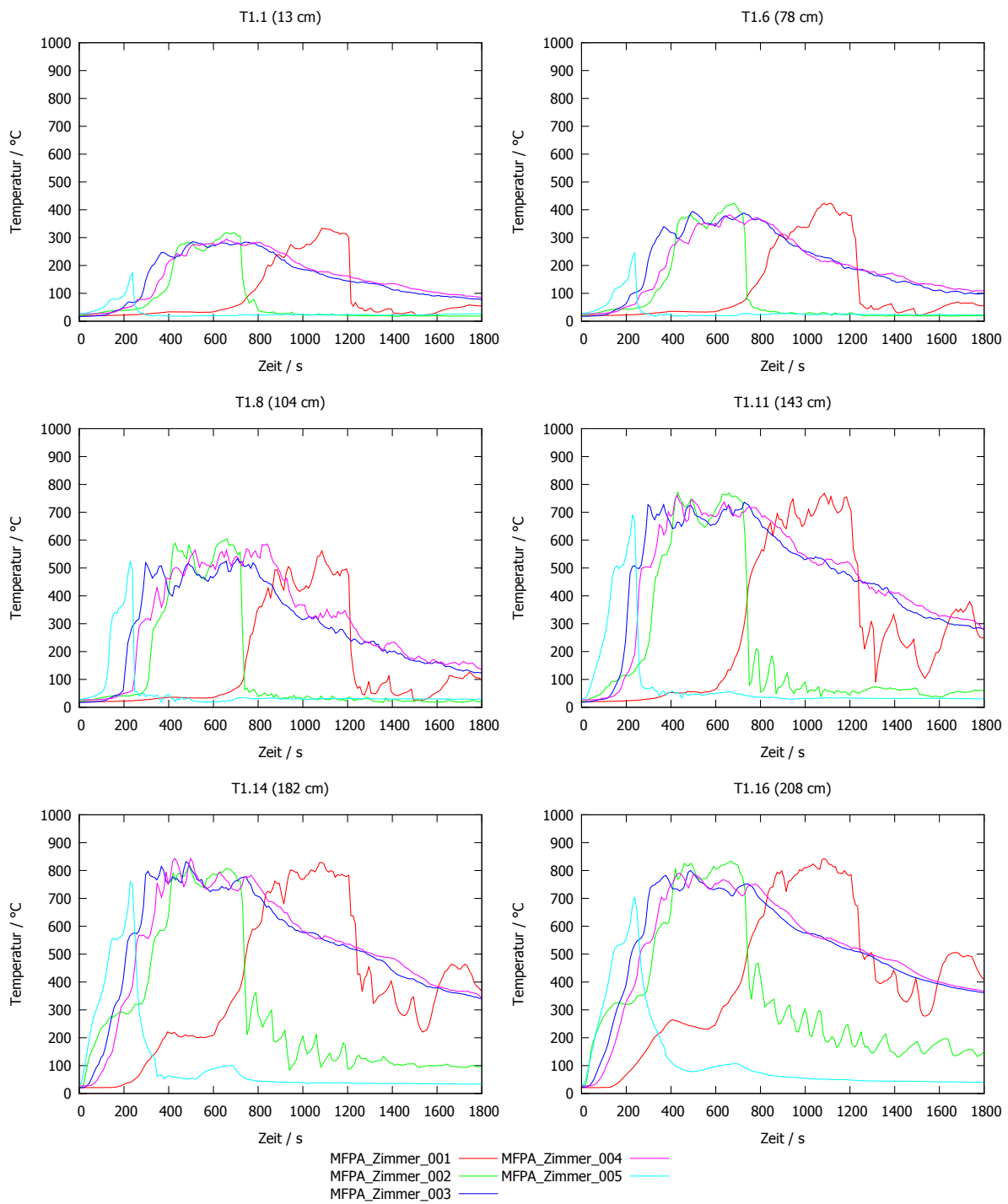


Abbildung N.8: Temperaturen vertikale Messstelle T1 (Brandraumöffnung): vergleichende Darstellung ausgesuchter Messstellen für alle Versuche

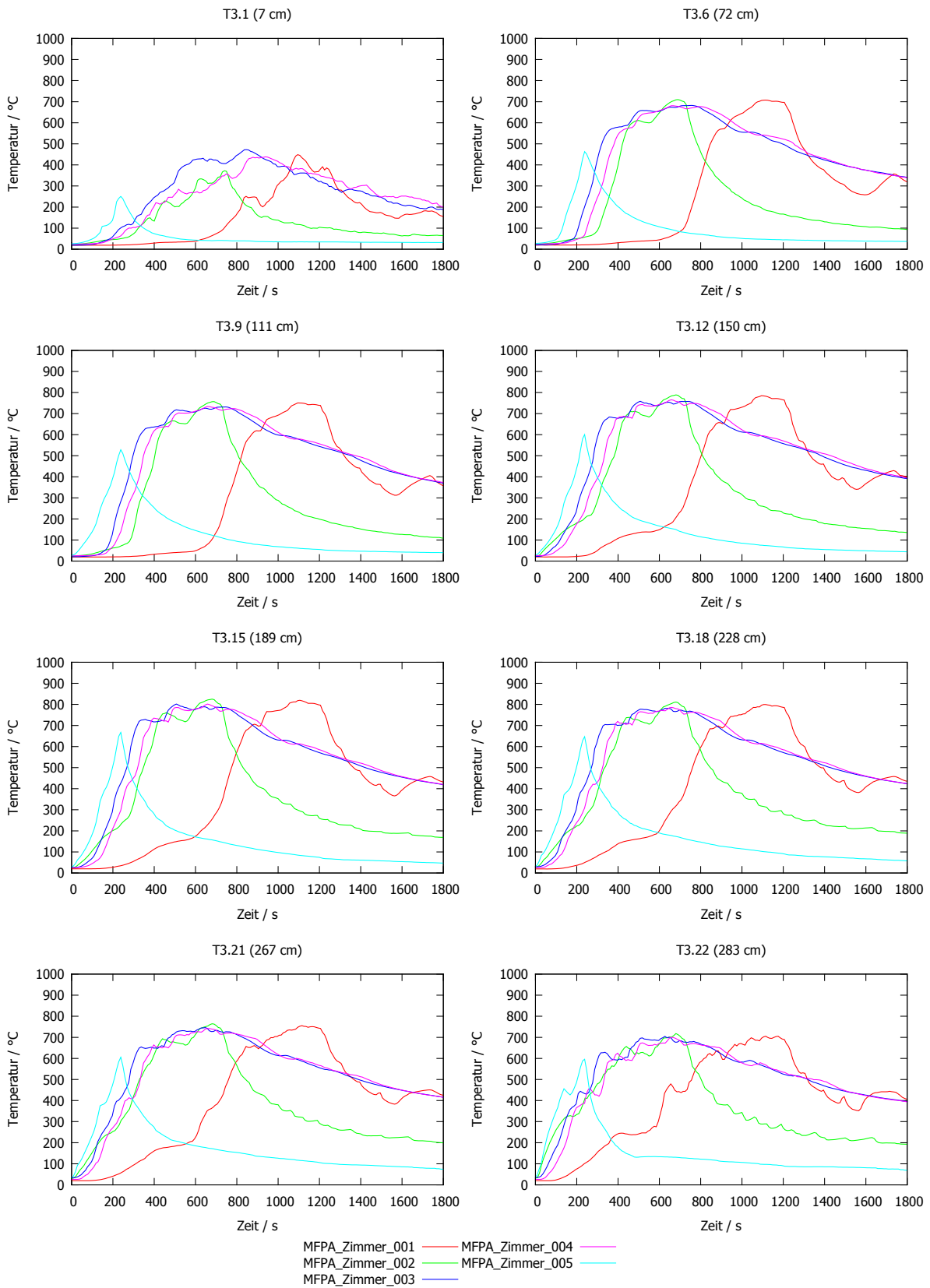


Abbildung N.9: Temperaturen vertikale Messstelle T3 (Referenzecke): vergleichende Darstellung ausgesuchter Messstellen für alle Versuche

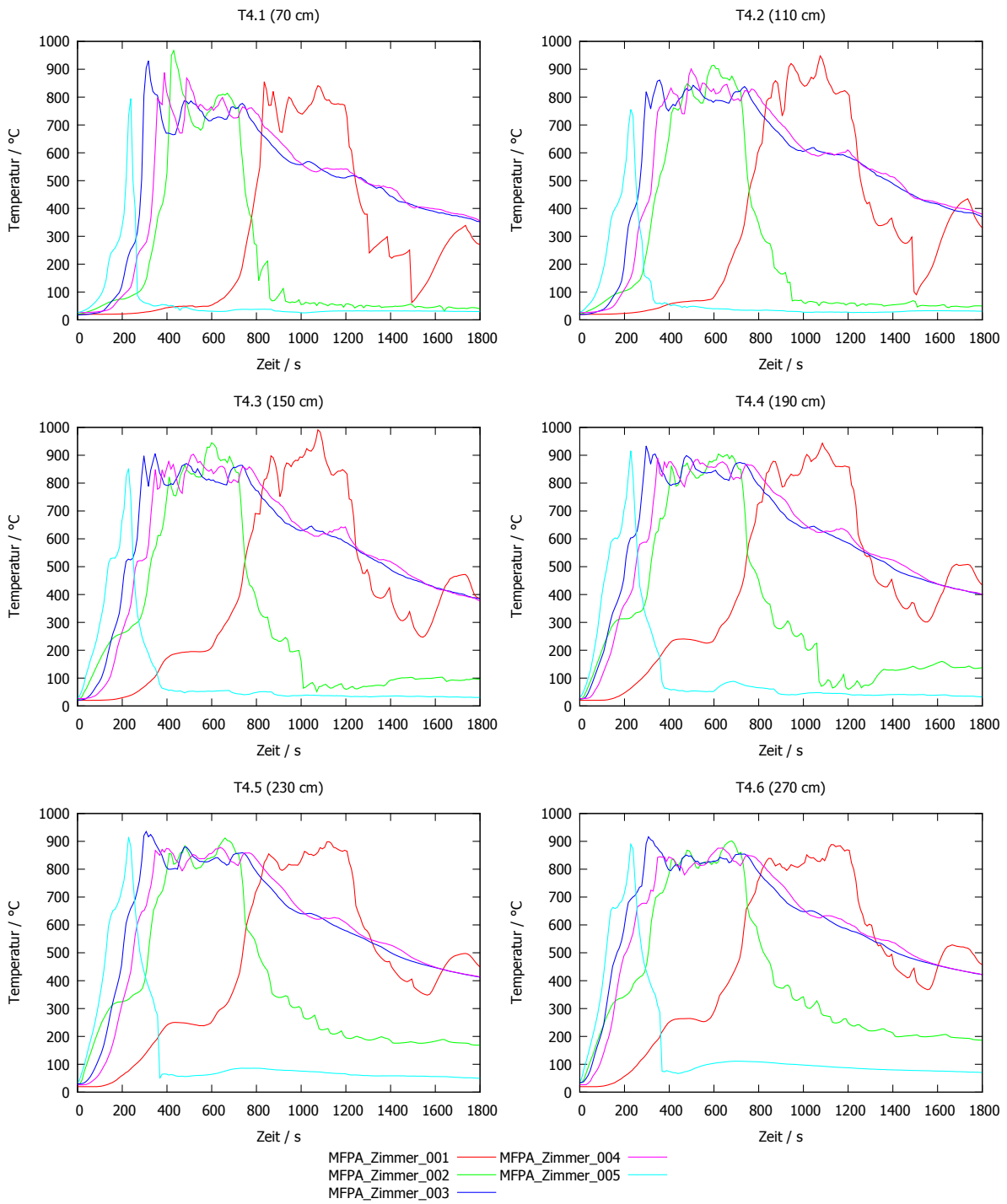


Abbildung N.10: Temperaturen vertikale Messstelle T4 (Brandraummitte): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche

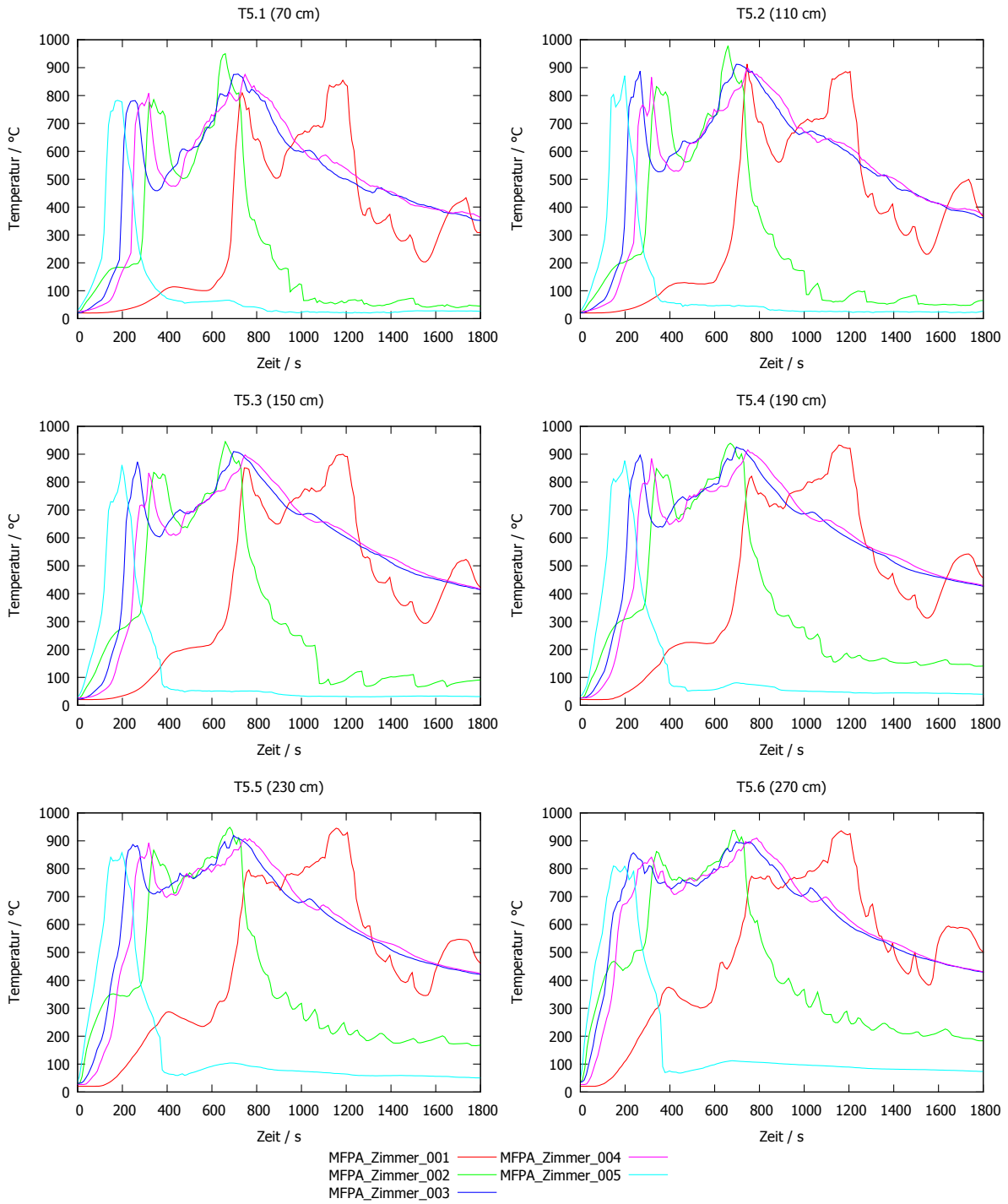


Abbildung N.11: Temperaturen vertikale Messstelle T5 (Sofa 2): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche

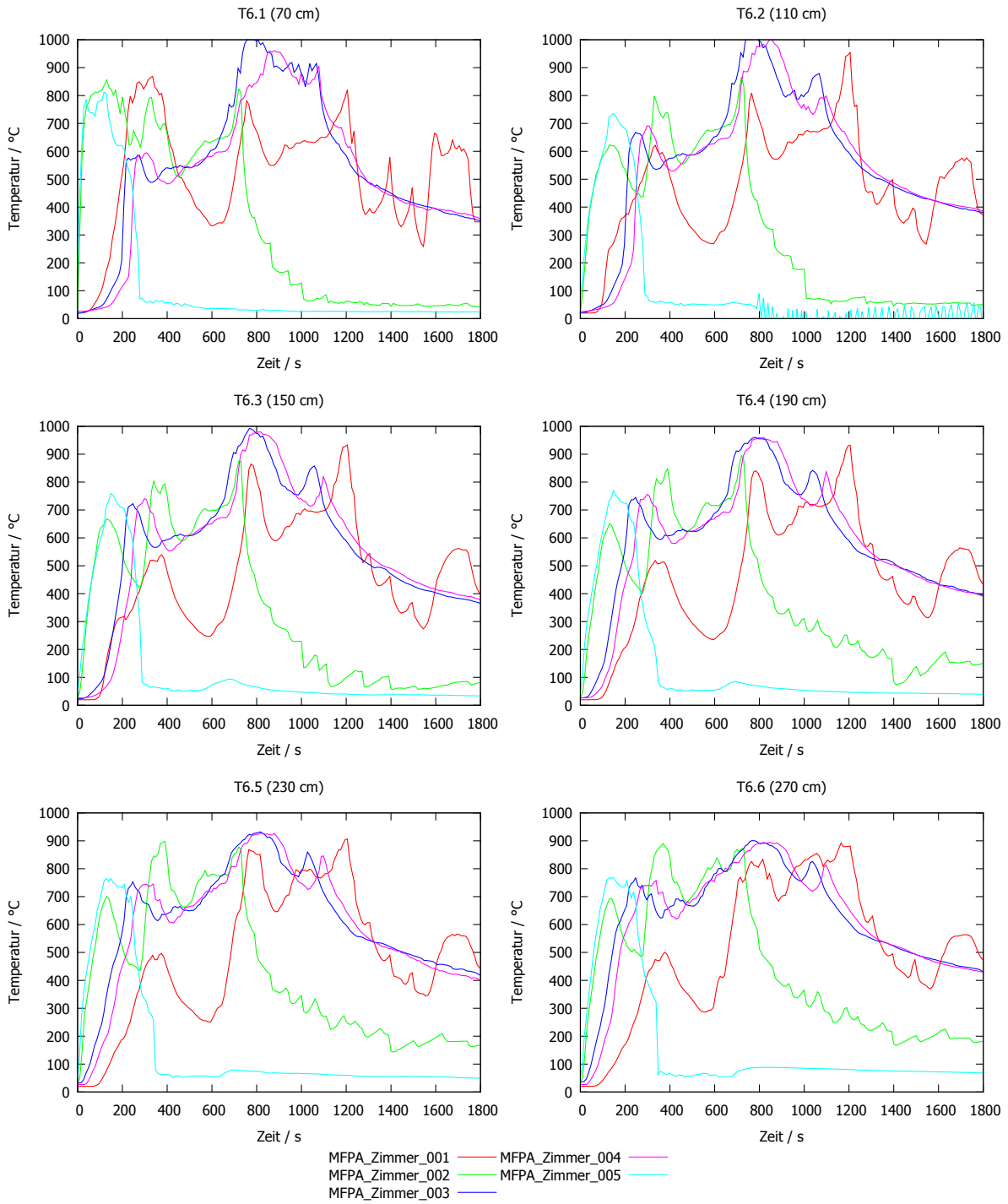


Abbildung N.12: Temperaturen vertikale Messstelle T6 (Sofa 1): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche

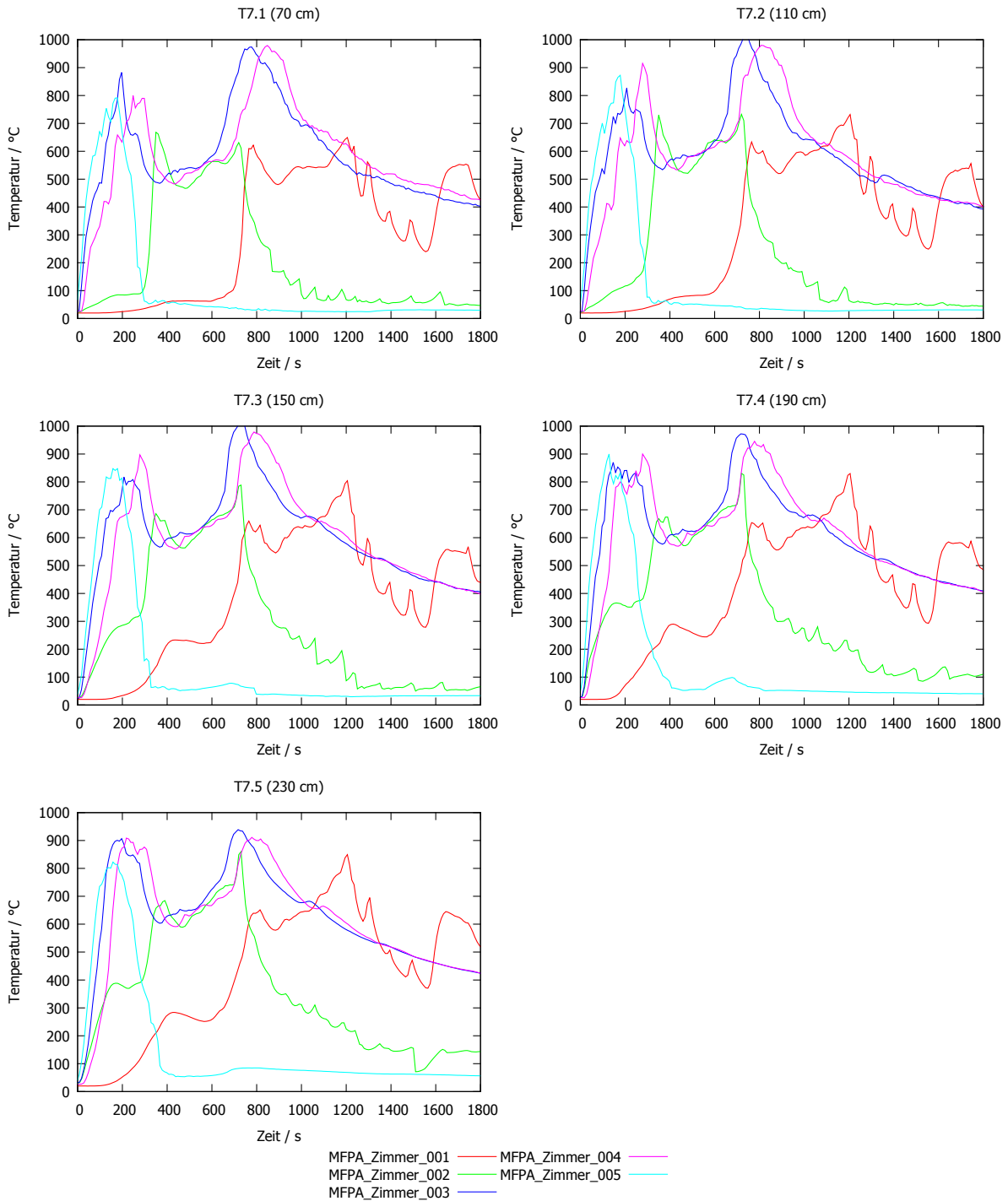


Abbildung N.13: Temperaturen vertikale Messstelle T7 (Regalecke): vergleichende Darstellung der einzelnen Messstellen für alle Versuche

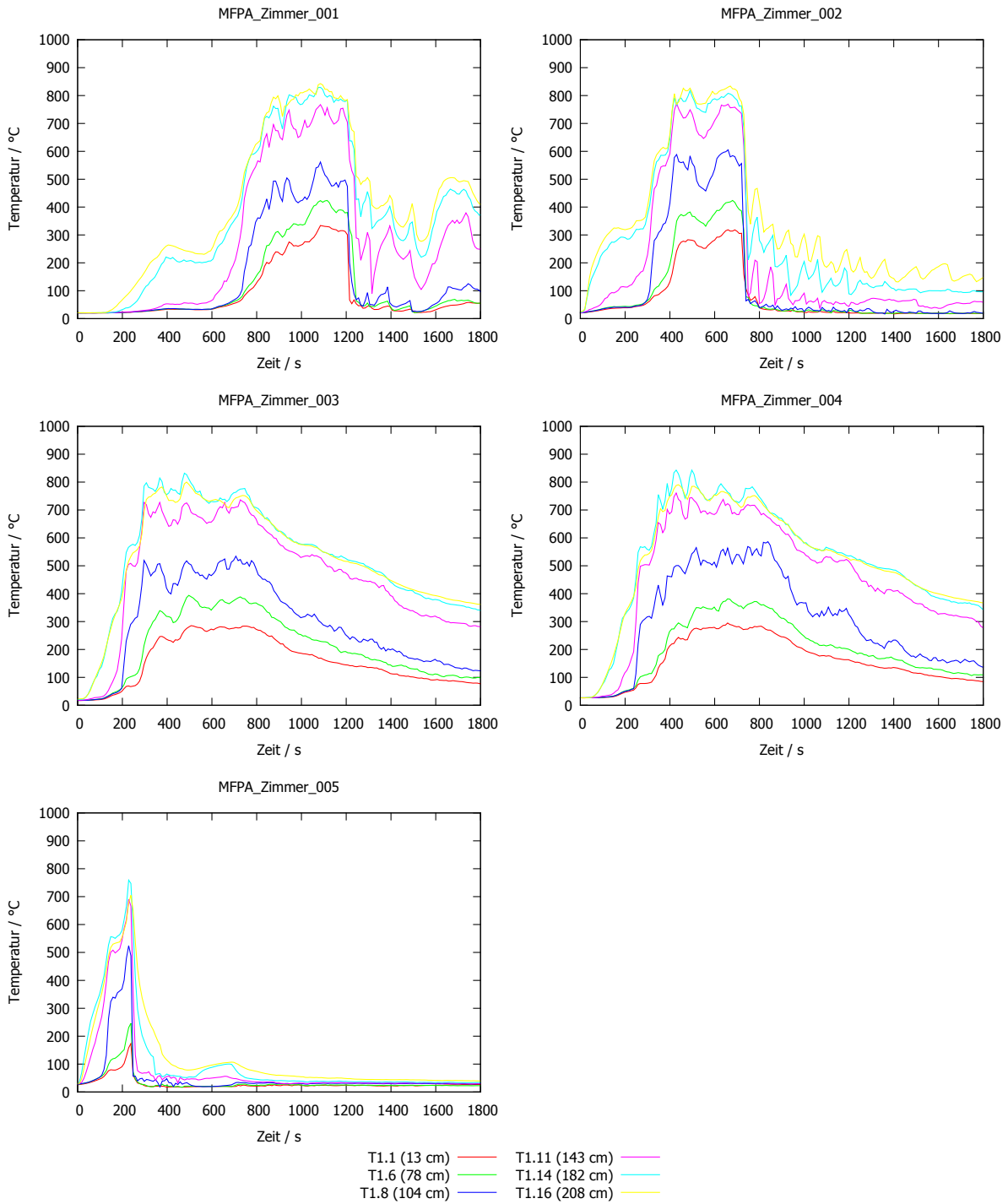


Abbildung N.14: Temperaturen vertikale Messstelle T1 (Brandraumöffnung): vergleichende Darstellung der Versuche für ausgesuchte Messstellen

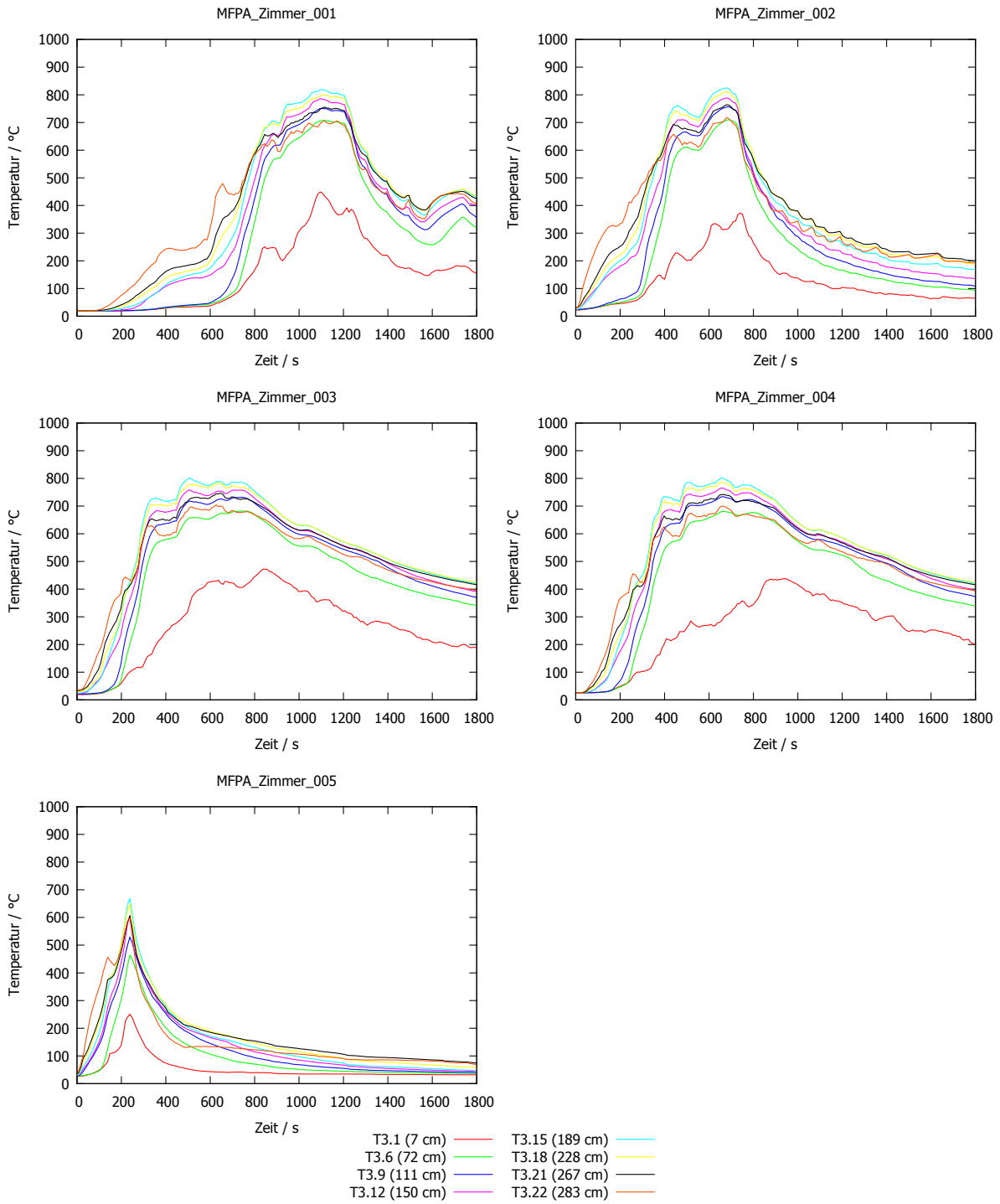


Abbildung N.15: Temperaturen vertikale Messstelle T3 (Referenzecke): vergleichende Darstellung der Versuche für ausgesuchte Messstellen

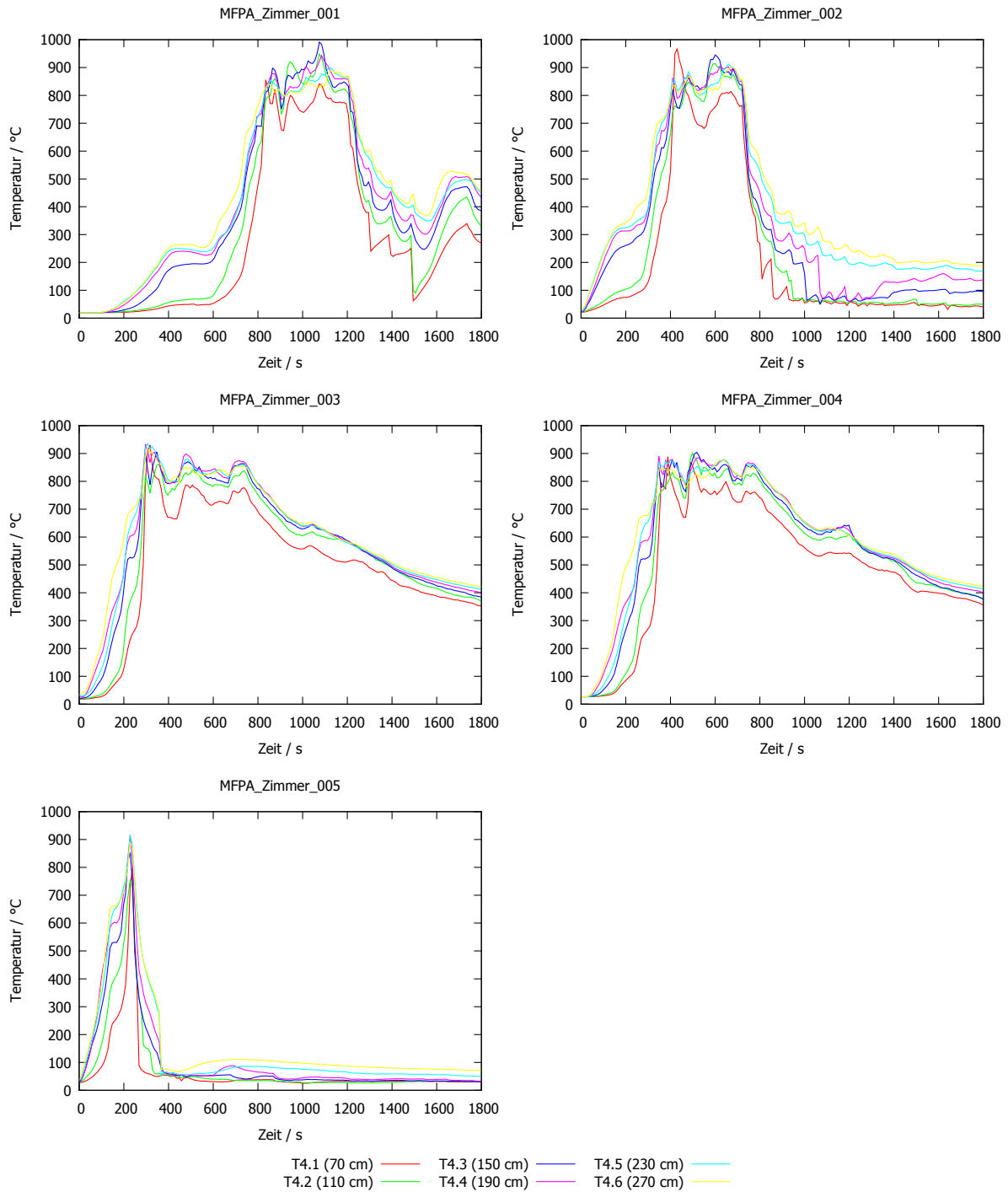


Abbildung N.16: Temperaturen vertikale Messstelle T4 (Brandraummitte): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen

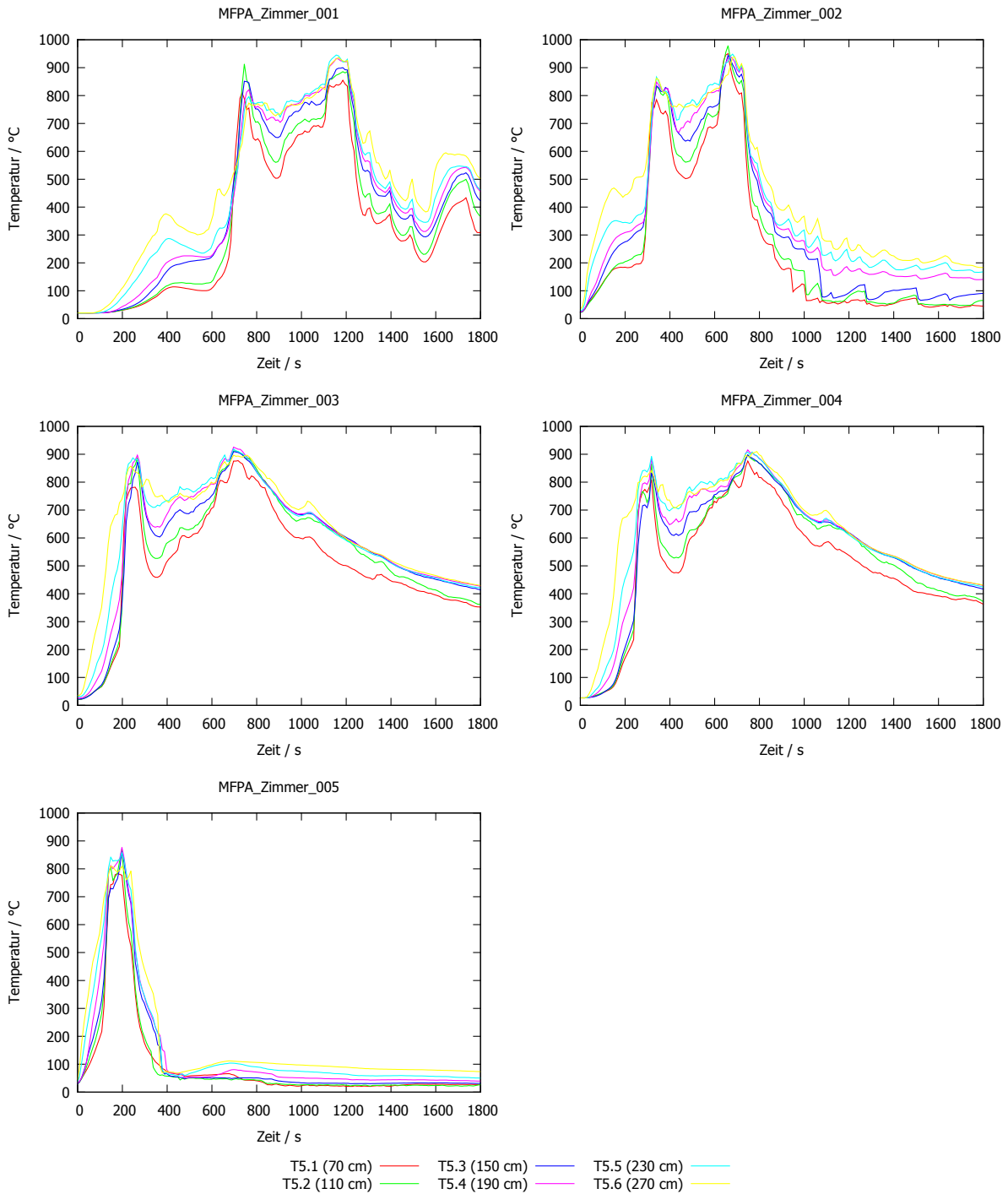


Abbildung N.17: Temperaturen vertikale Messstelle T5 (Sofa 2): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen

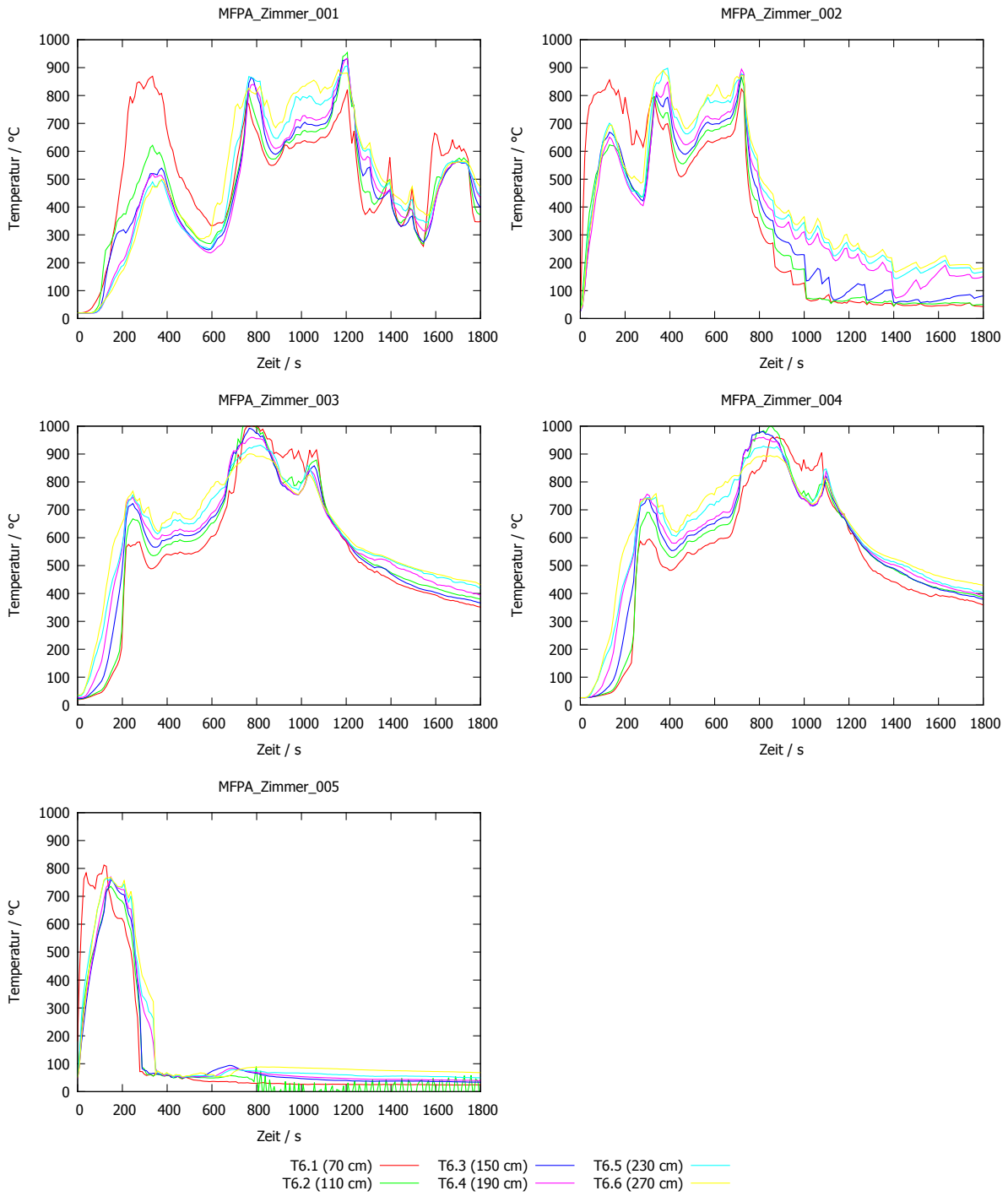


Abbildung N.18: Temperaturen vertikale Messstelle T6 (Sofa 1): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen

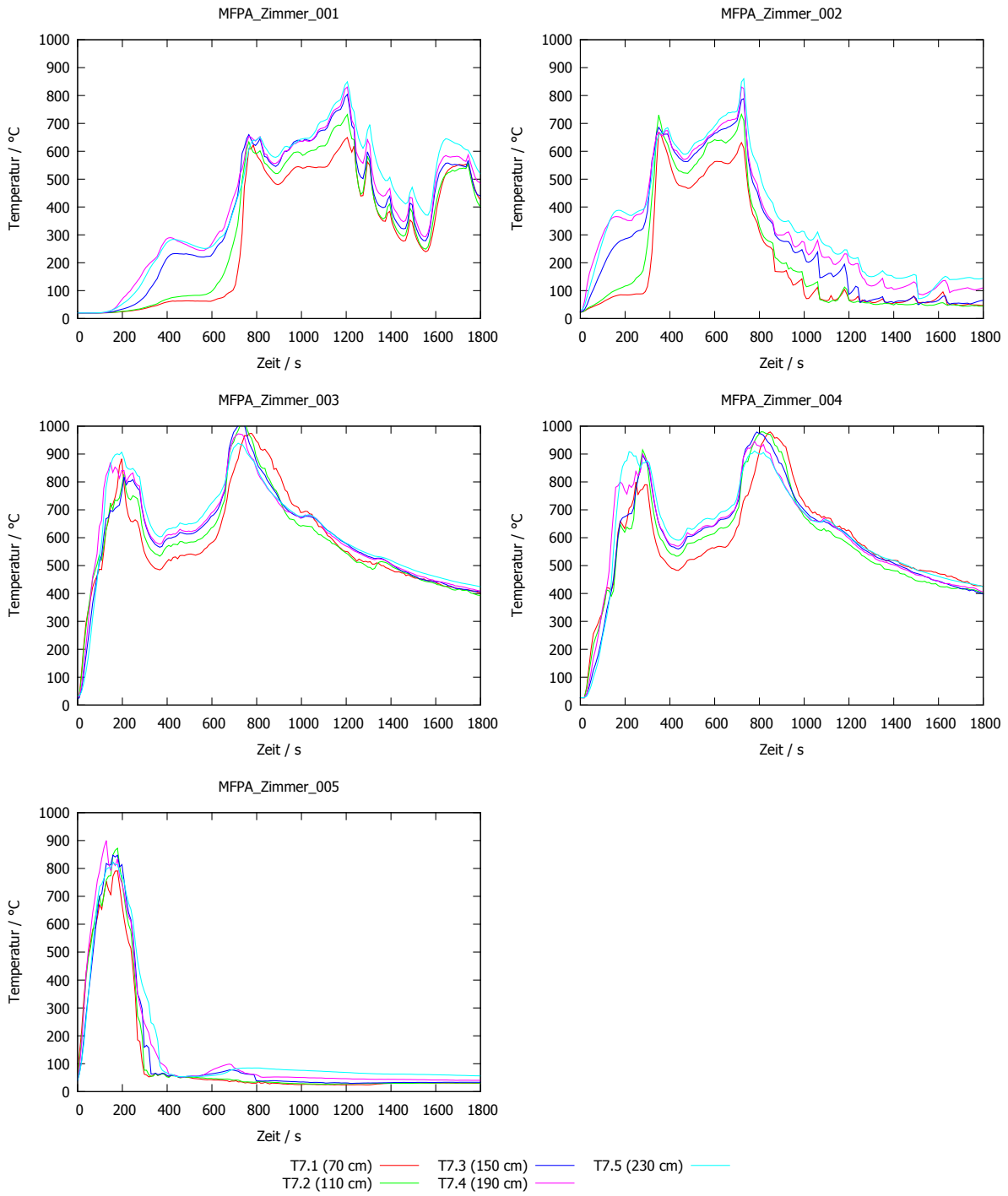


Abbildung N.19: Temperaturen vertikale Messstelle T7 (Regalecke): vergleichende Darstellung der Versuche für alle Messstellen

N.4 Messergebnisse Plattenthermometer

Die Darstellung ist auf den Gültigkeitsbereich der jew. Messreihen begrenzt (vgl. Tab. D.10) bzw. endet mit Beginn des Löscheinsatzes.

N.4.1 Einfallende Strahlungswärmestromdichte

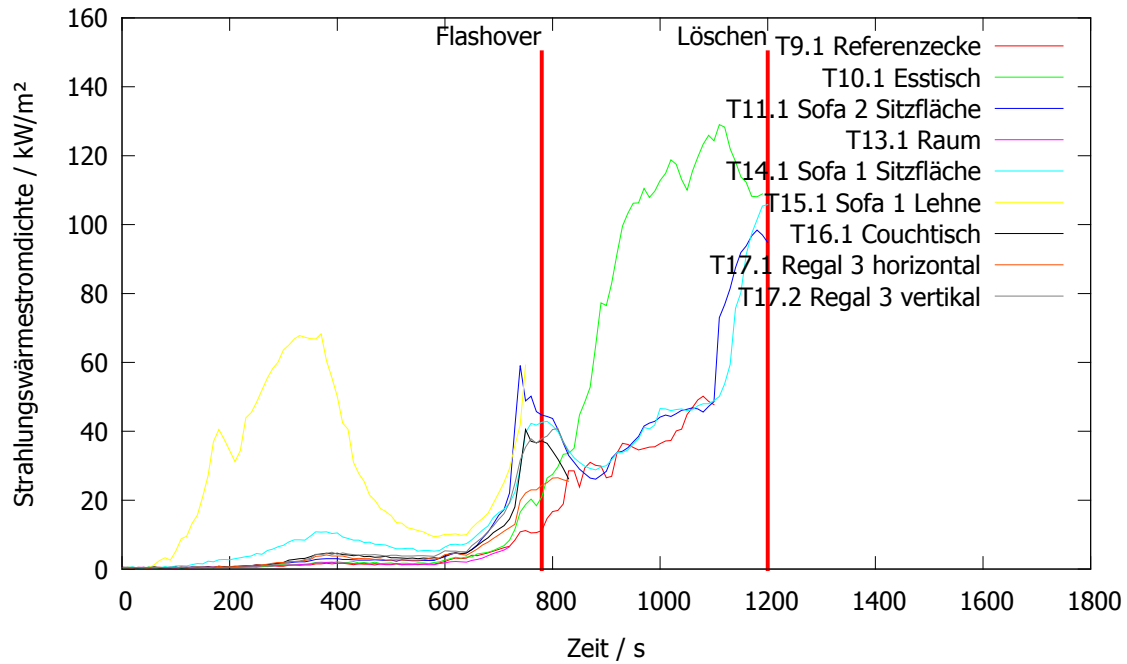


Abbildung N.20: Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_001, alle Messstellen

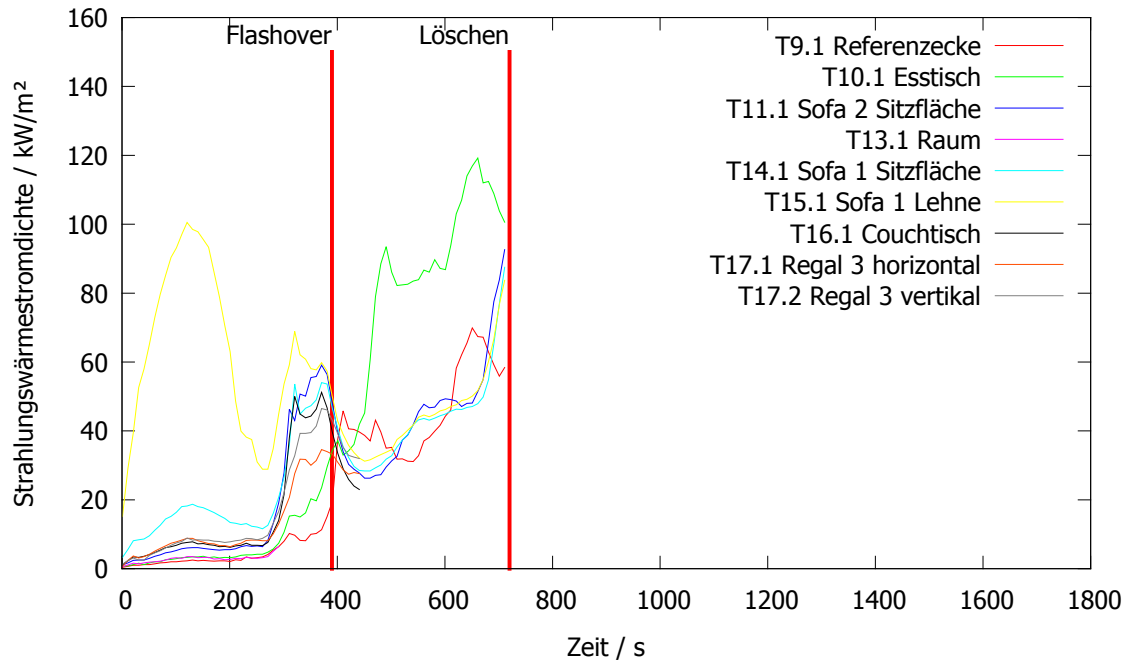


Abbildung N.21: Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_002, alle Messstellen

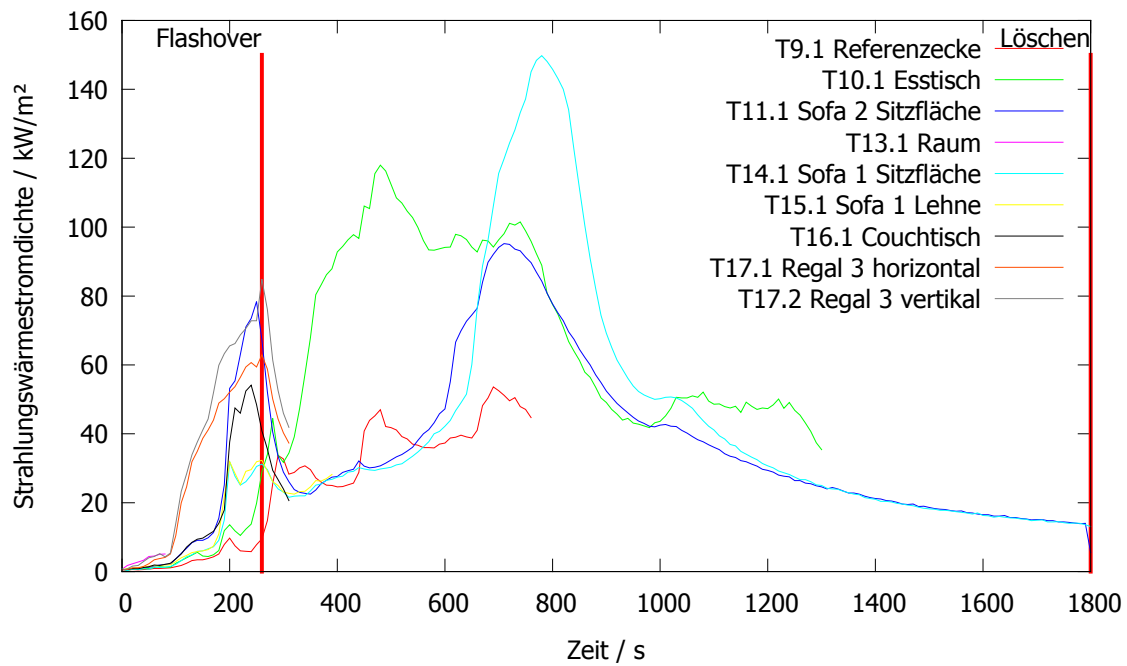


Abbildung N.22: Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFPA_Zimmer_003, alle Messstellen

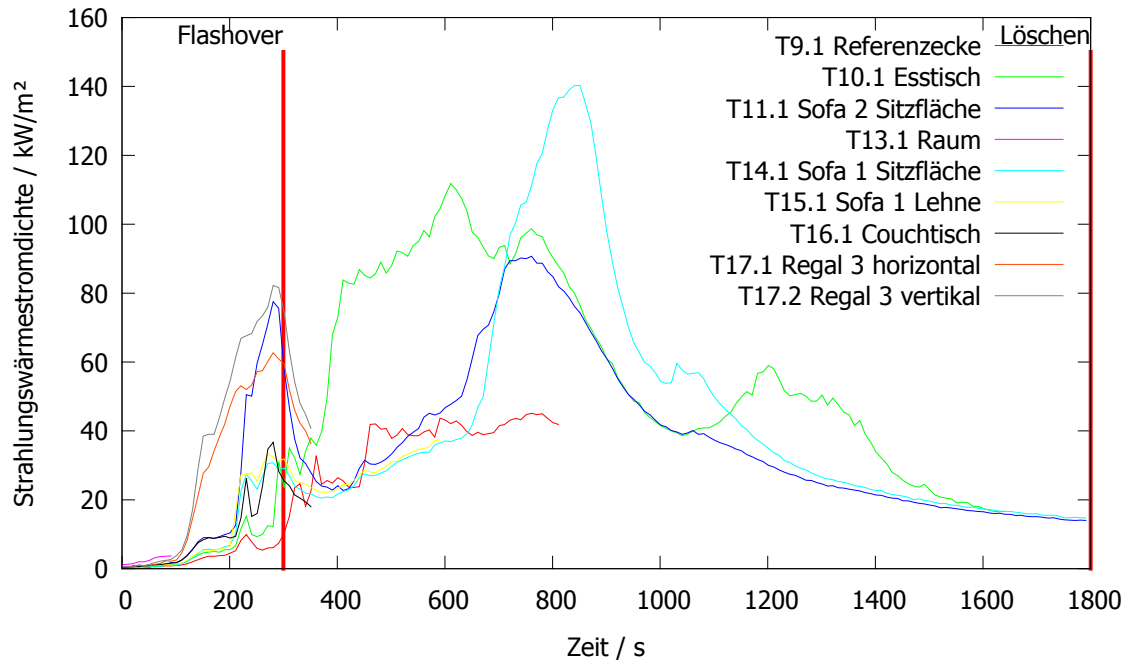


Abbildung N.23: Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFWA_Zimmer_004, alle Messstellen

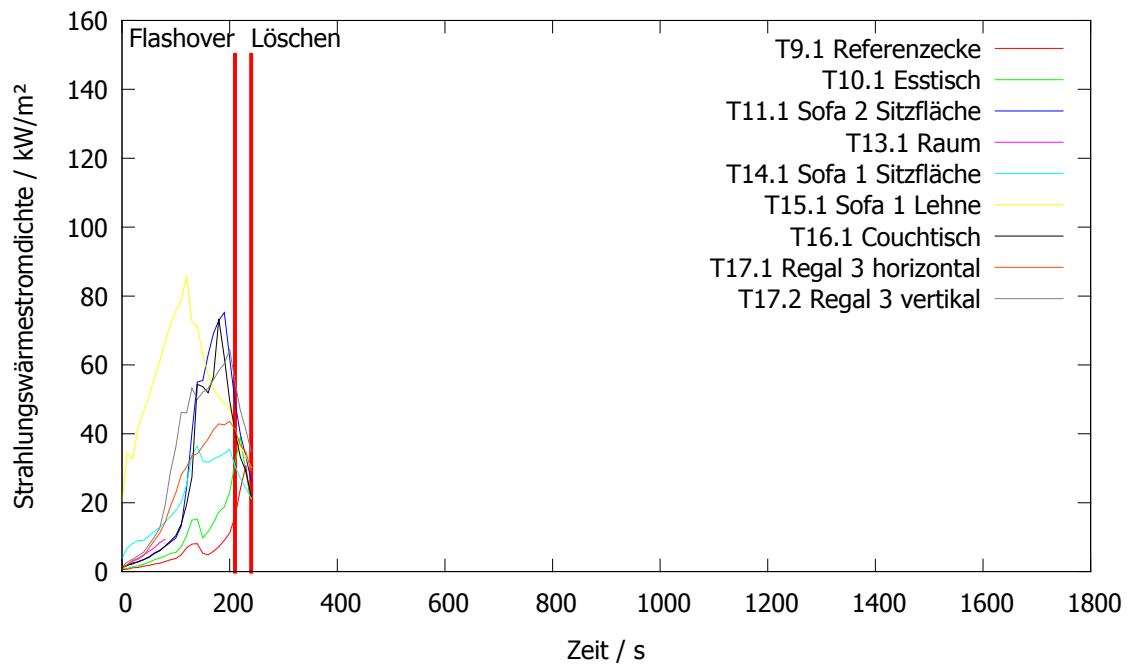


Abbildung N.24: Einfallende Strahlungswärmestromdichte: MFWA_Zimmer_005, alle Messstellen

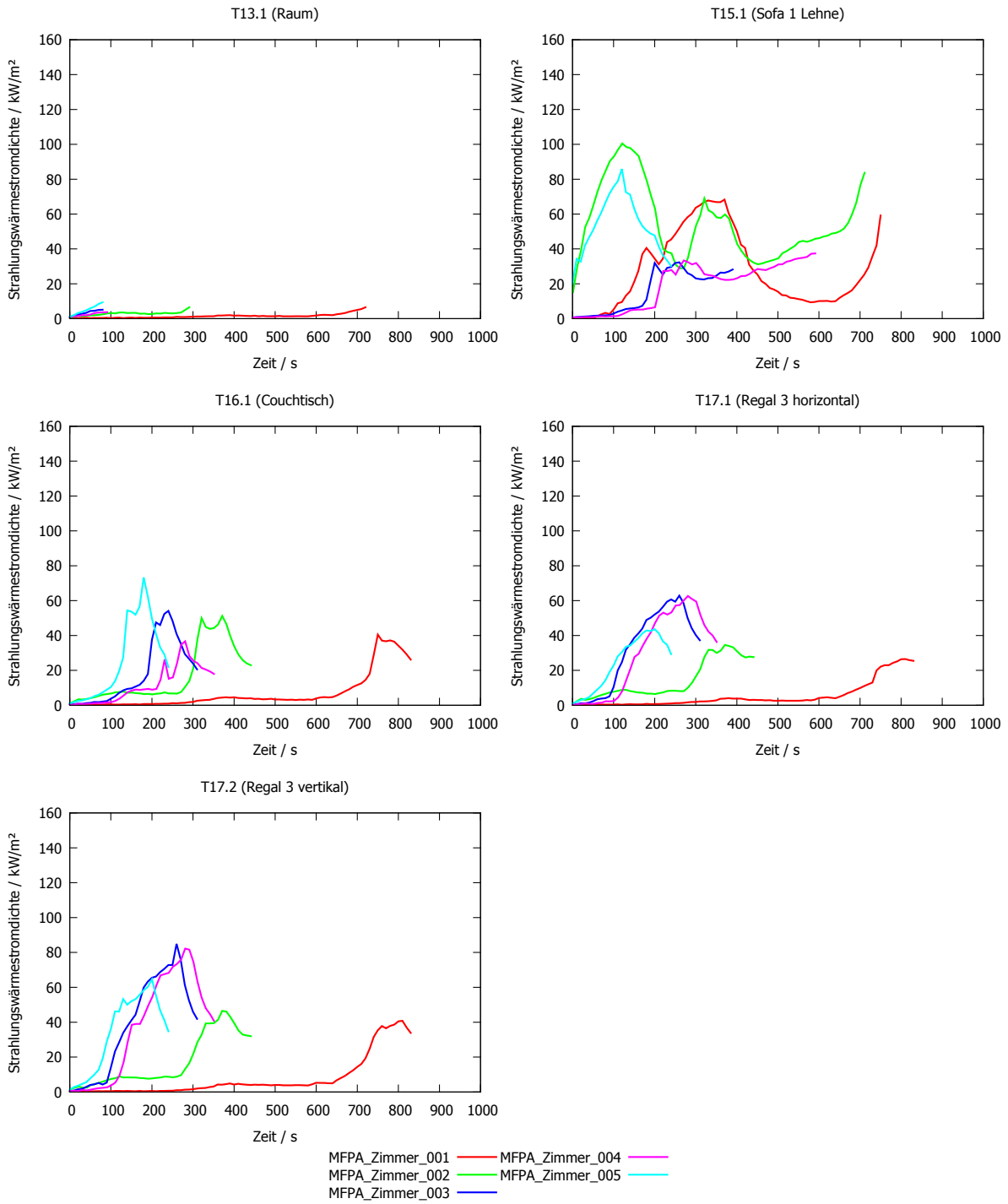


Abbildung N.25: Einfallende Strahlungswärmestromdichte: ausgesuchte Messstellen

N.4.2 Gesamtwärmestromdichte

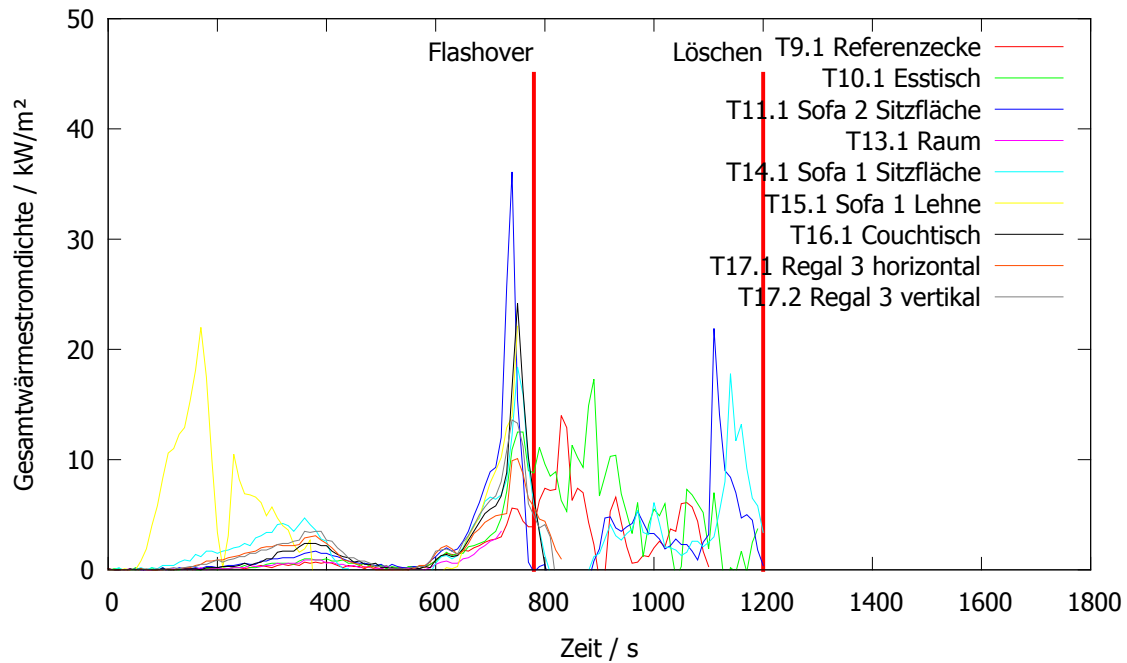


Abbildung N.26: Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_001, alle Messstellen

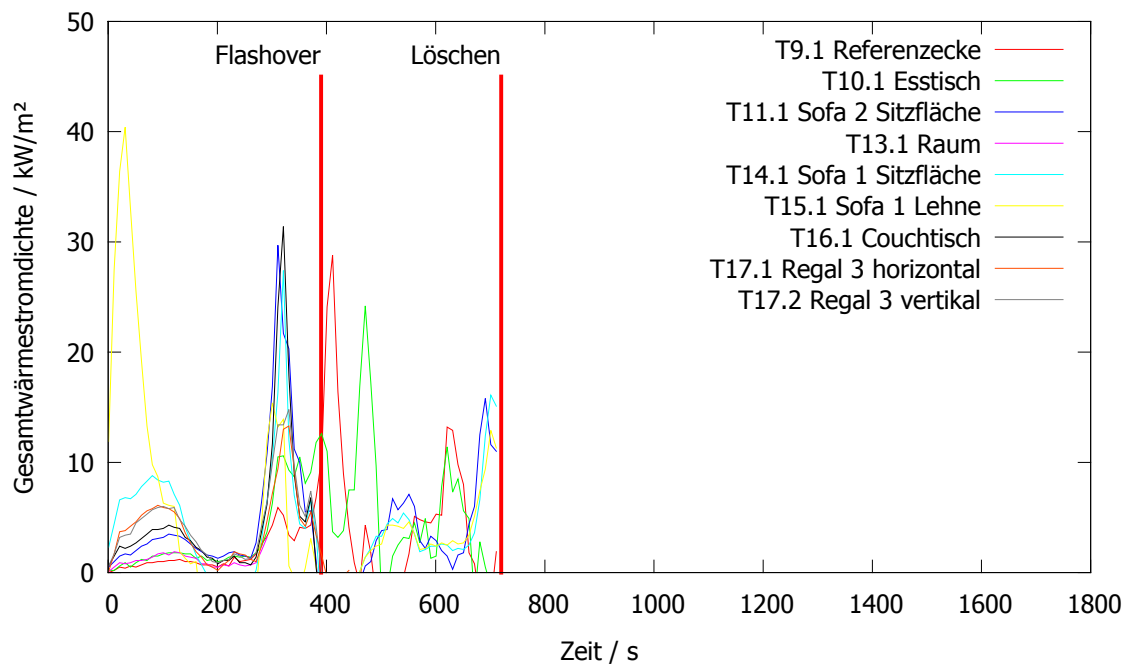


Abbildung N.27: Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_002, alle Messstellen

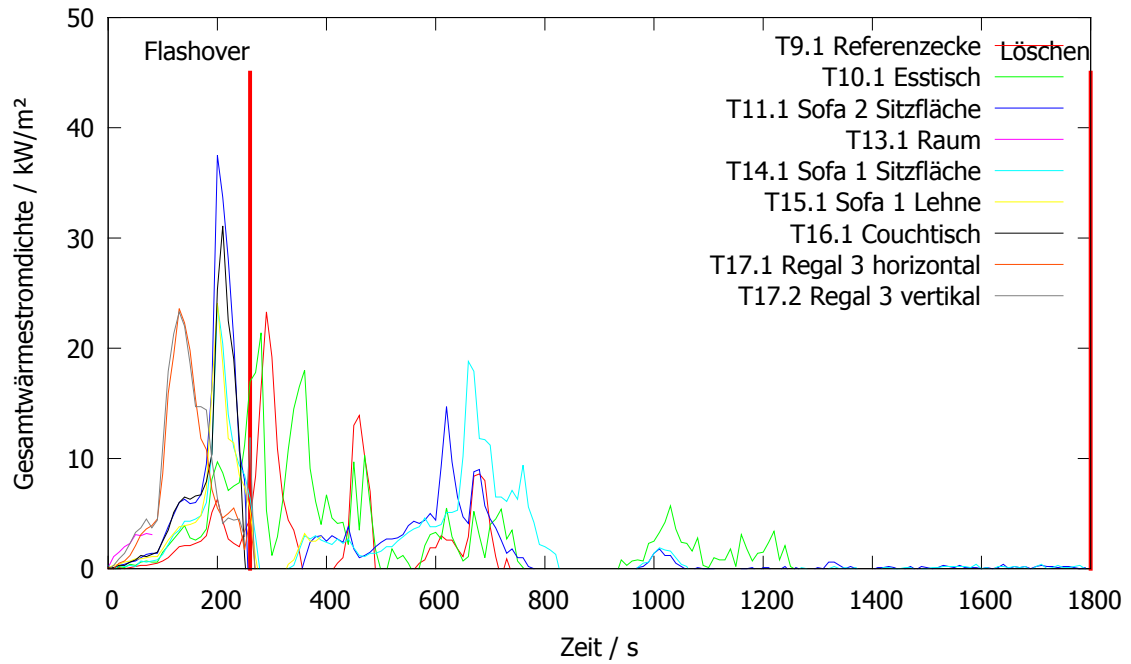


Abbildung N.28: Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_003, alle Messstellen

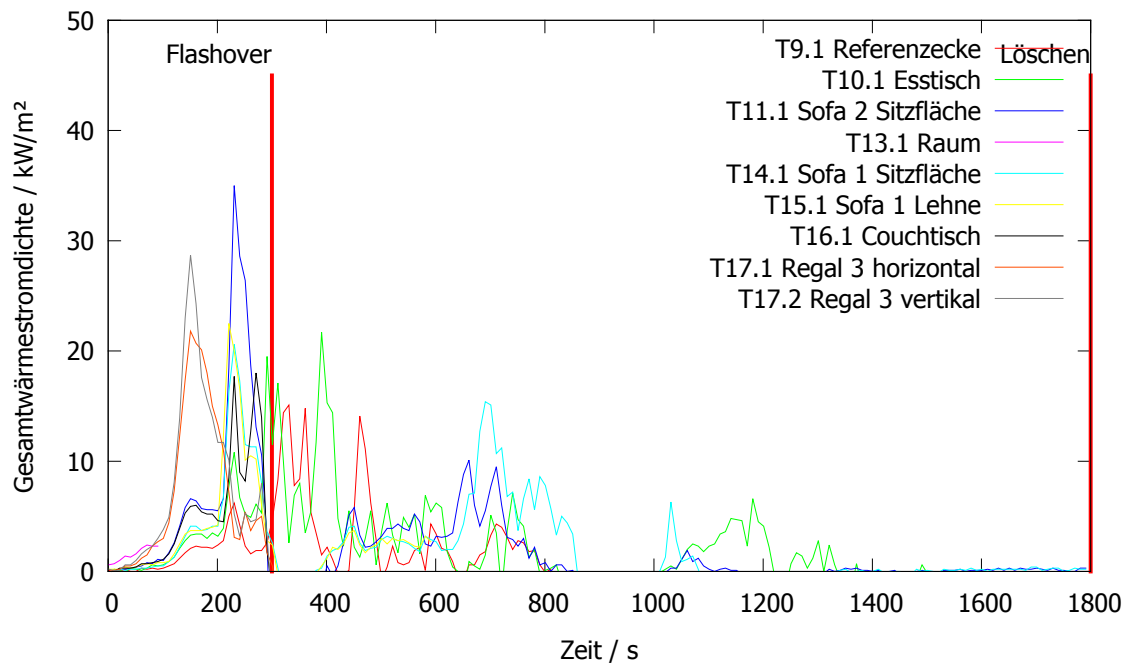


Abbildung N.29: Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_004, alle Messstellen

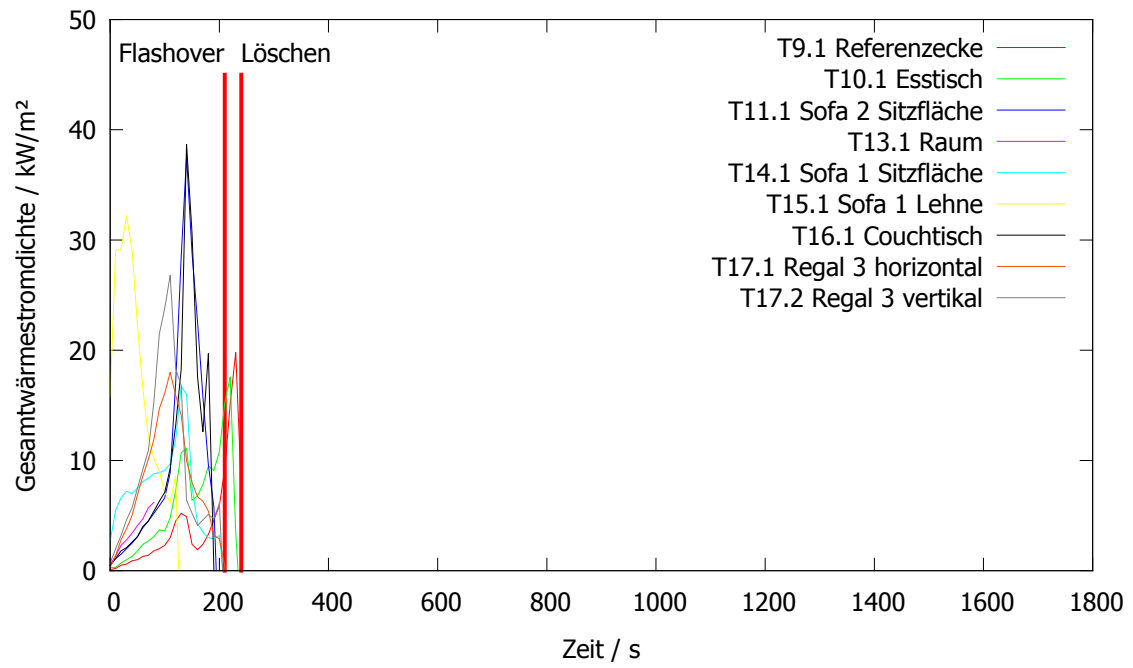


Abbildung N.30: Gesamtwärmestromdichte: MFPA_Zimmer_005, alle Messstellen

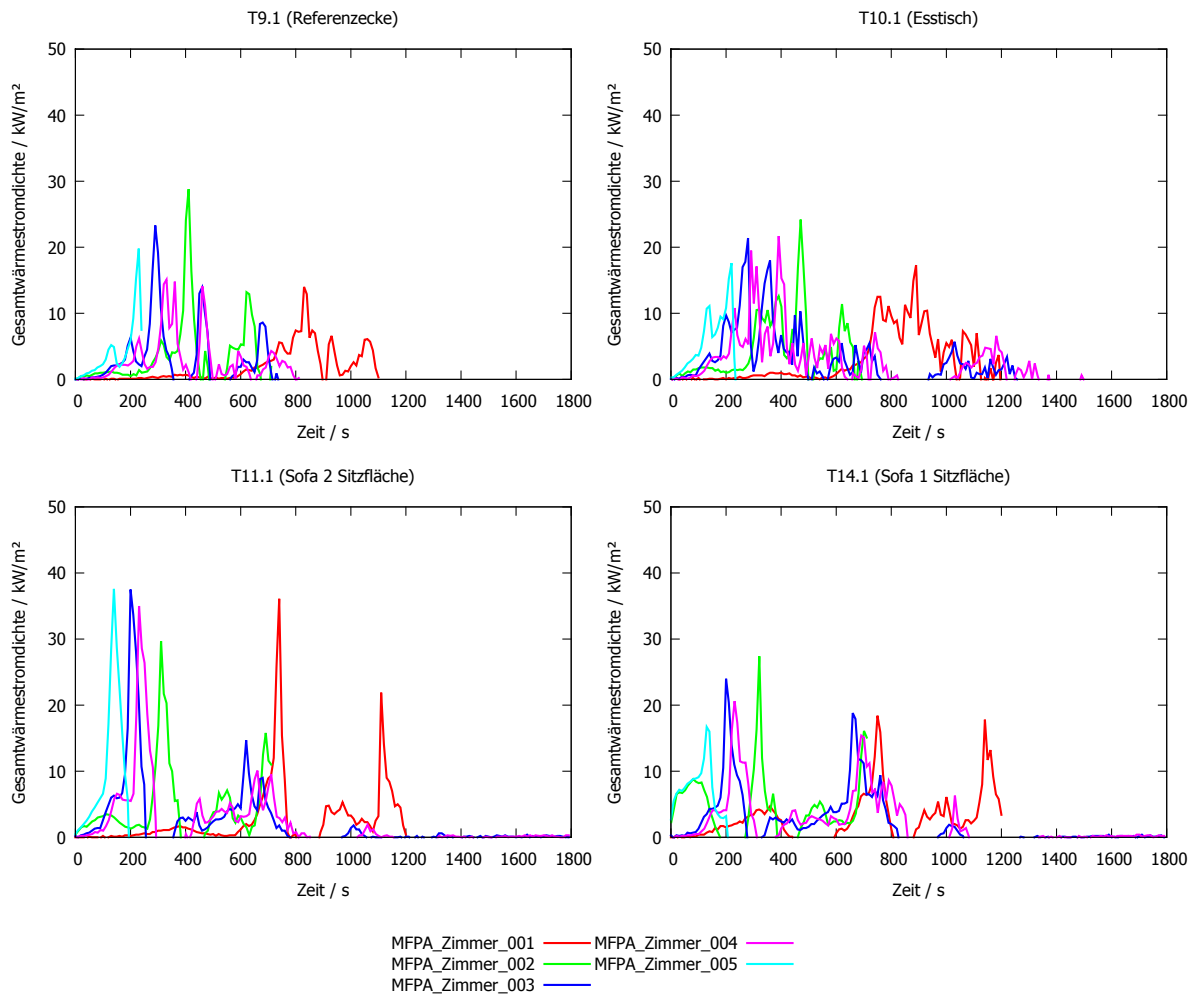


Abbildung N.31: Gesamtwärmestromdichte: Vergleich der Versuche, Messstellen T9.1, T10.1, T11.1, T14.1

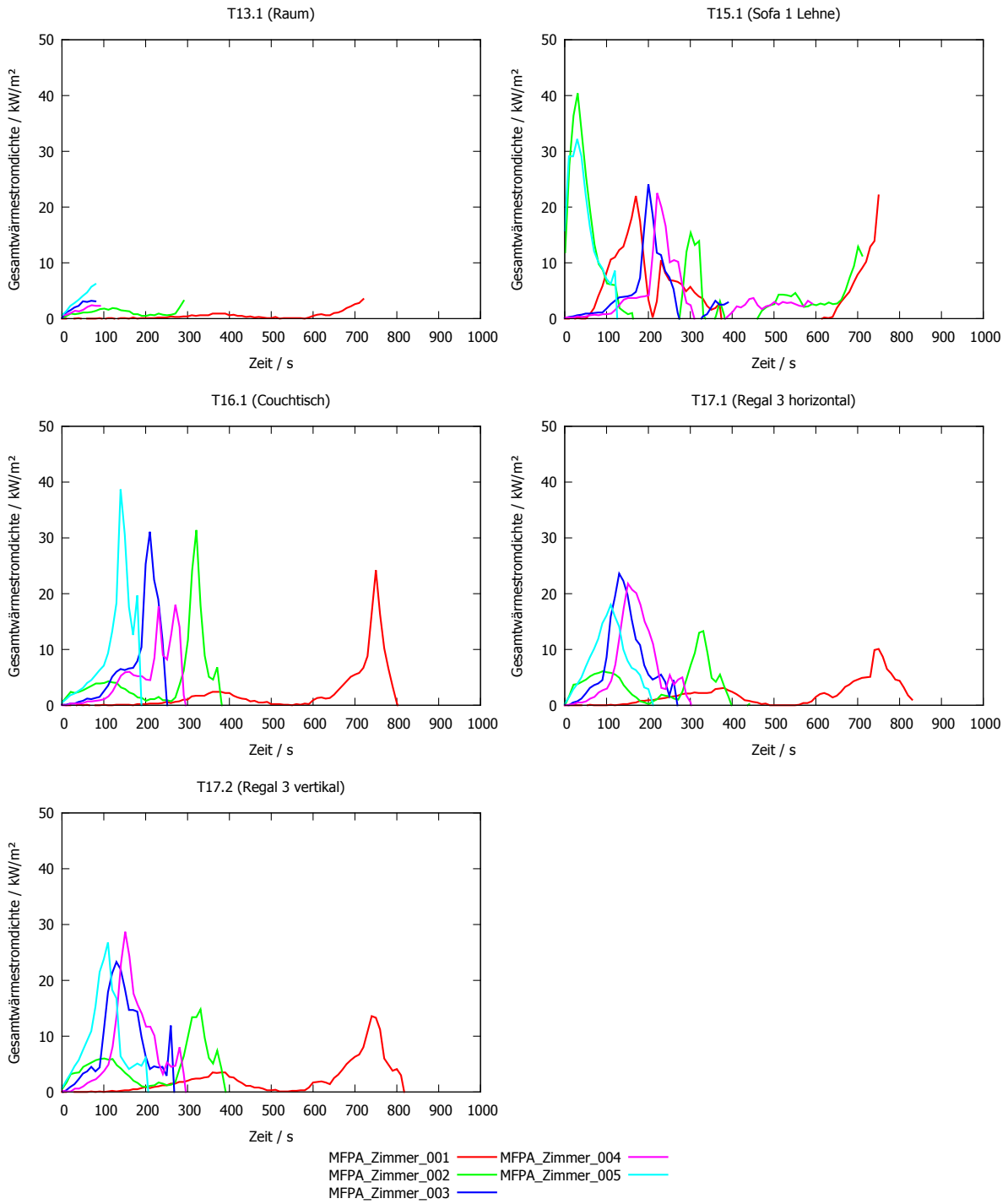


Abbildung N.32: Gesamtwärmestromdichte: Vergleich der Versuche, Messstellen T13.1, T15.1, T16.1, T17.1 und T17.2

N.4.3 Adiabate Oberflächentemperatur

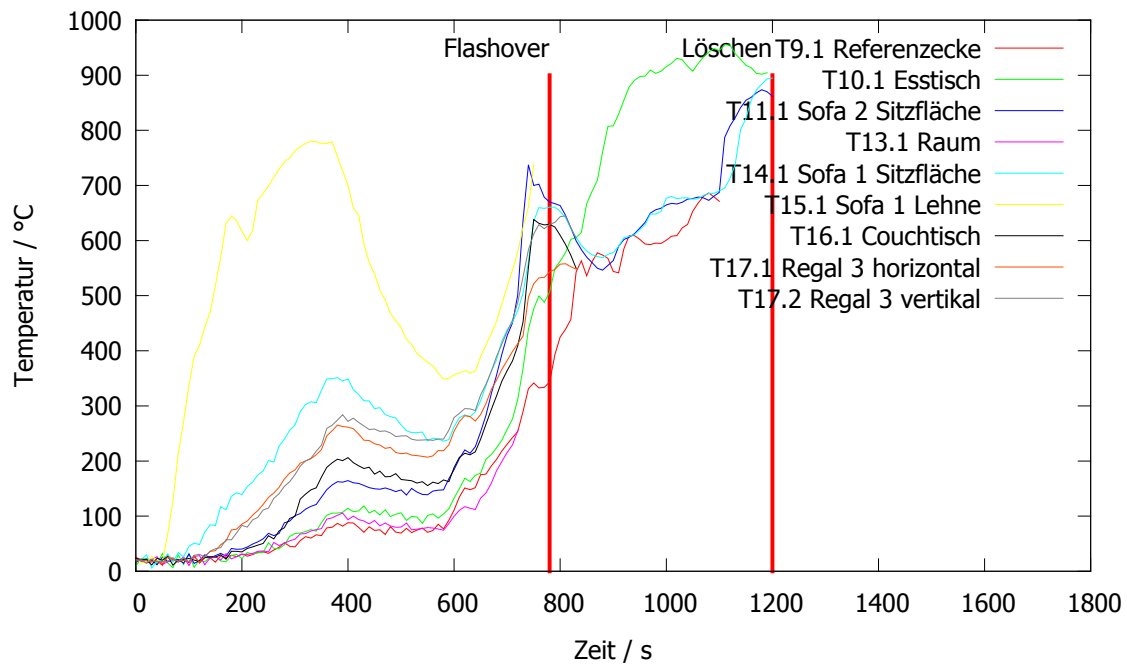


Abbildung N.33: Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_001, alle Messstellen

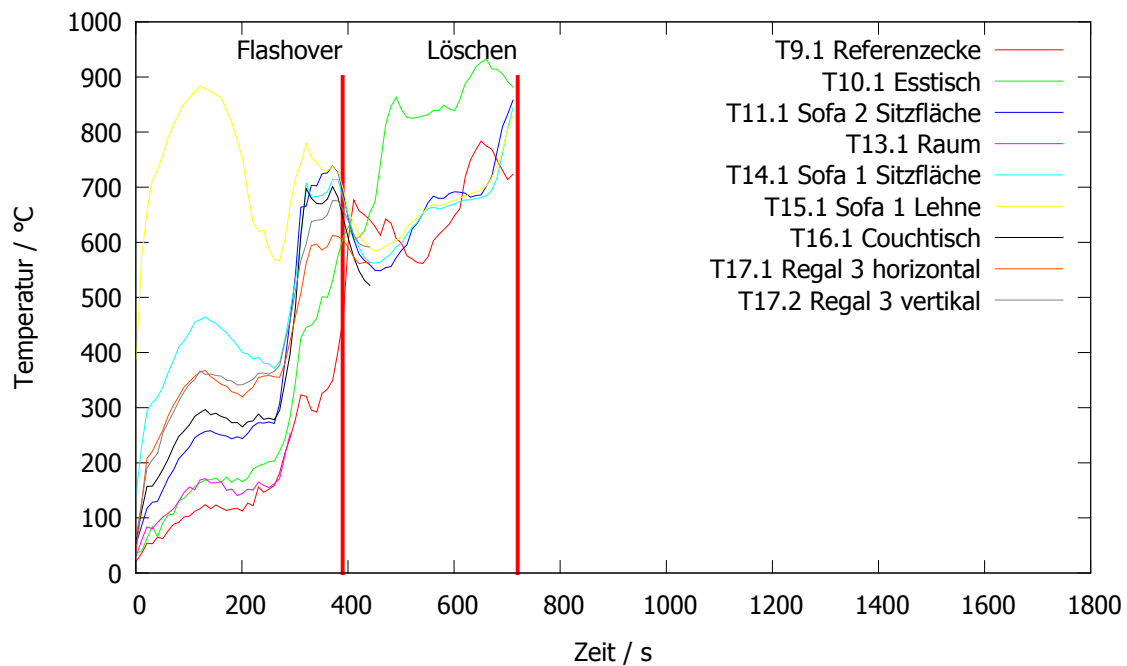


Abbildung N.34: Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_002, alle Messstellen

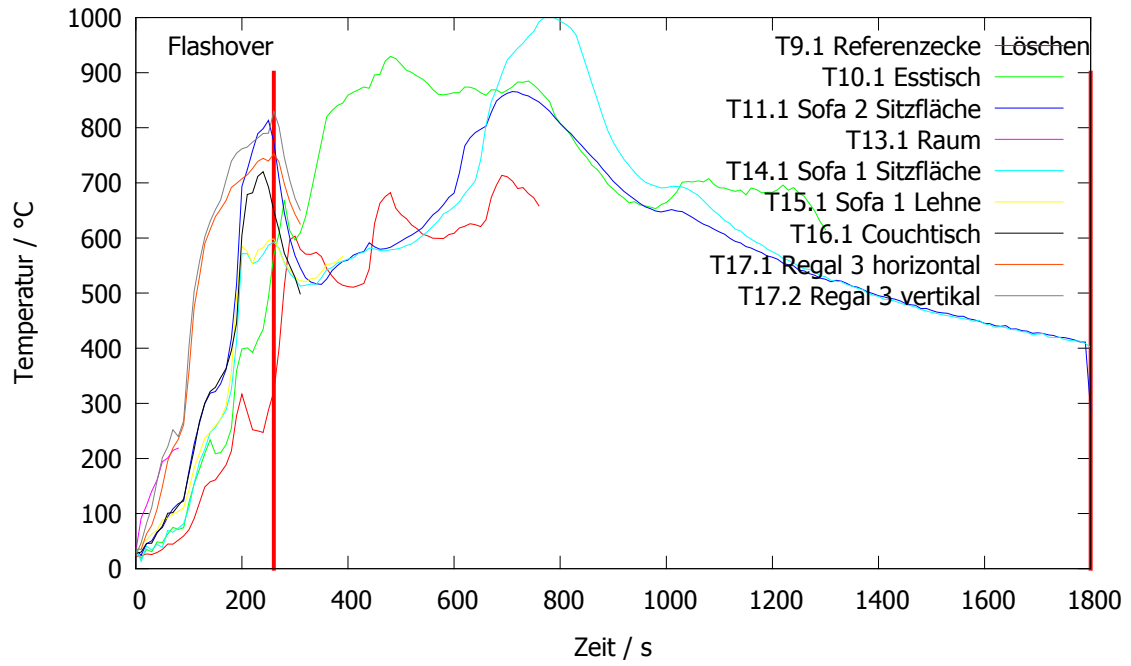


Abbildung N.35: Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_003, alle Messstellen

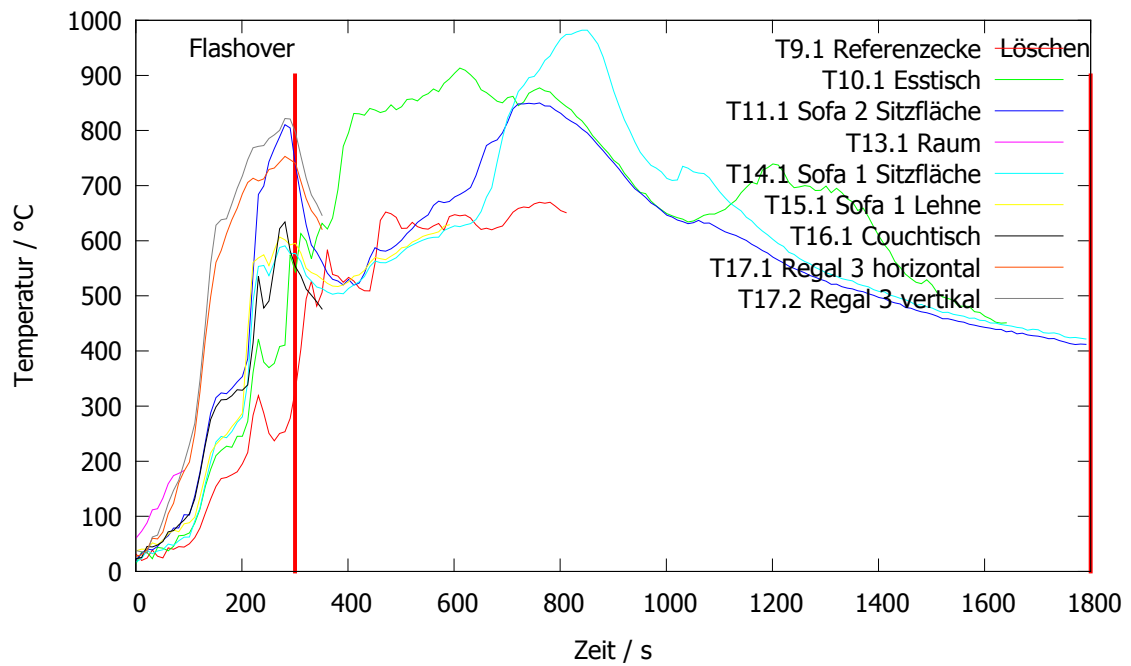


Abbildung N.36: Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_004, alle Messstellen

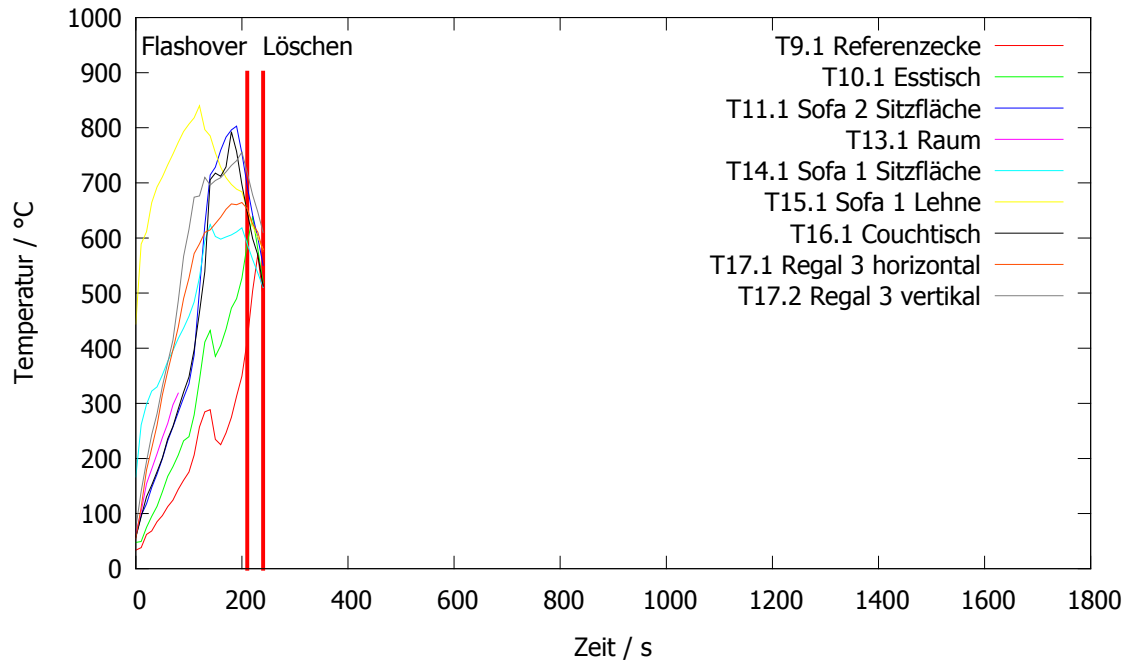


Abbildung N.37: Adiabate Oberflächentemperatur: MFPA_Zimmer_005, alle Messstellen

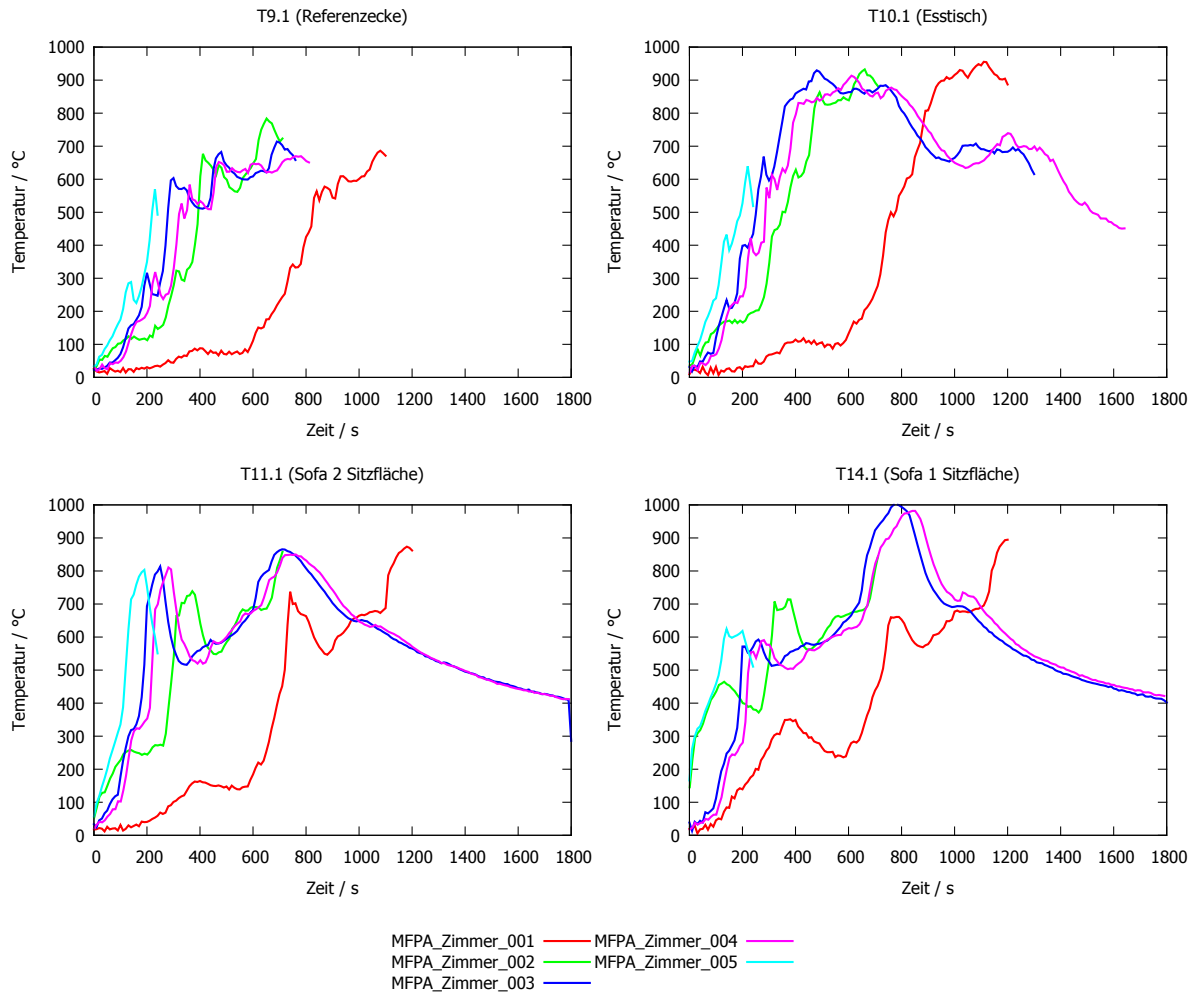


Abbildung N.38: Adiabate Oberflächentemperatur: Vergleich der Versuche, Messstellen T9.1, T10.1, T11.1, T14.1

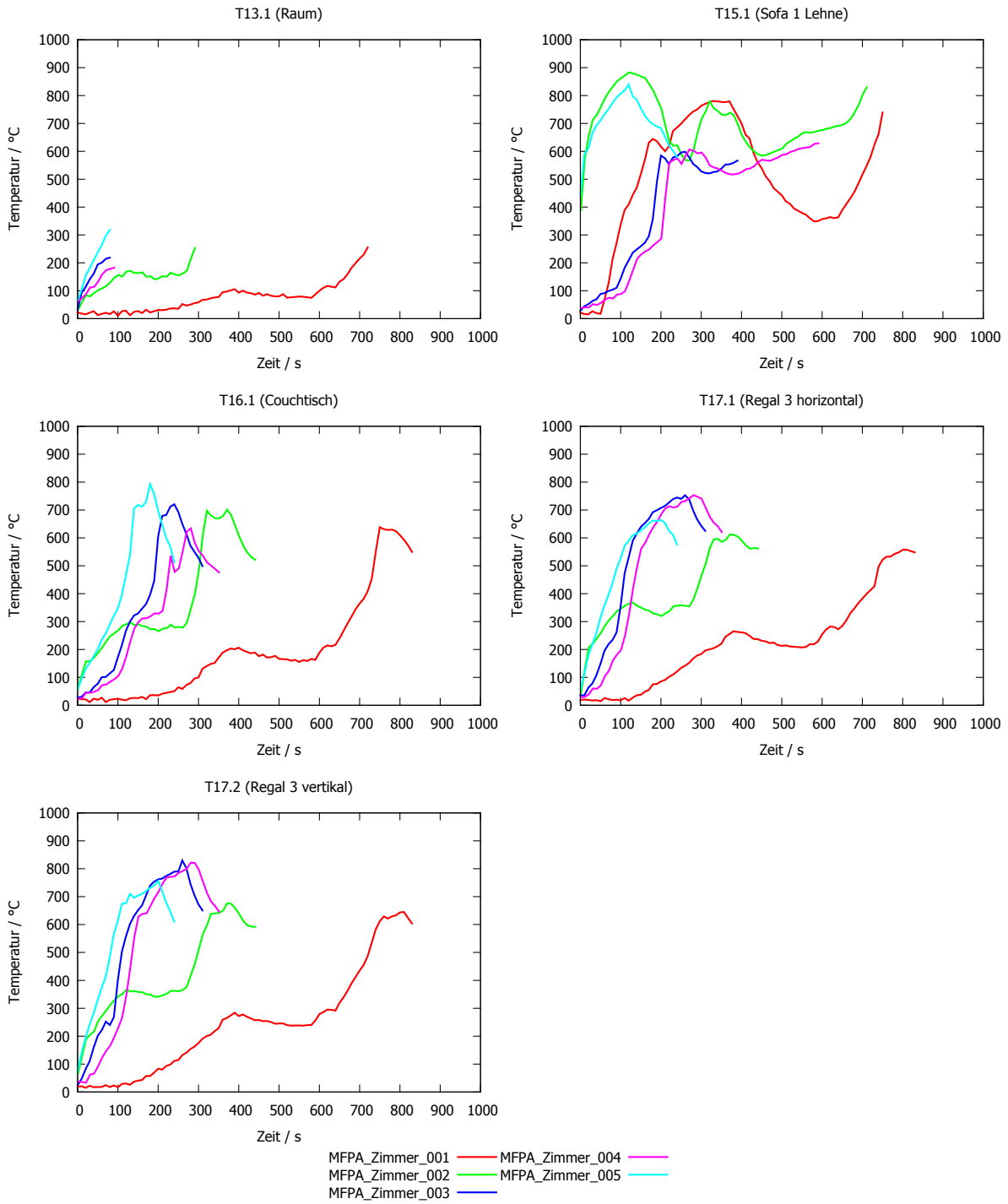


Abbildung N.39: Adiabate Oberflächentemperatur: Vergleich der Versuche, Messstellen T13.1, T15.1, T16.1, T17.1 und T17.2

N.5 Massenstrom durch die Brandraumöffnung

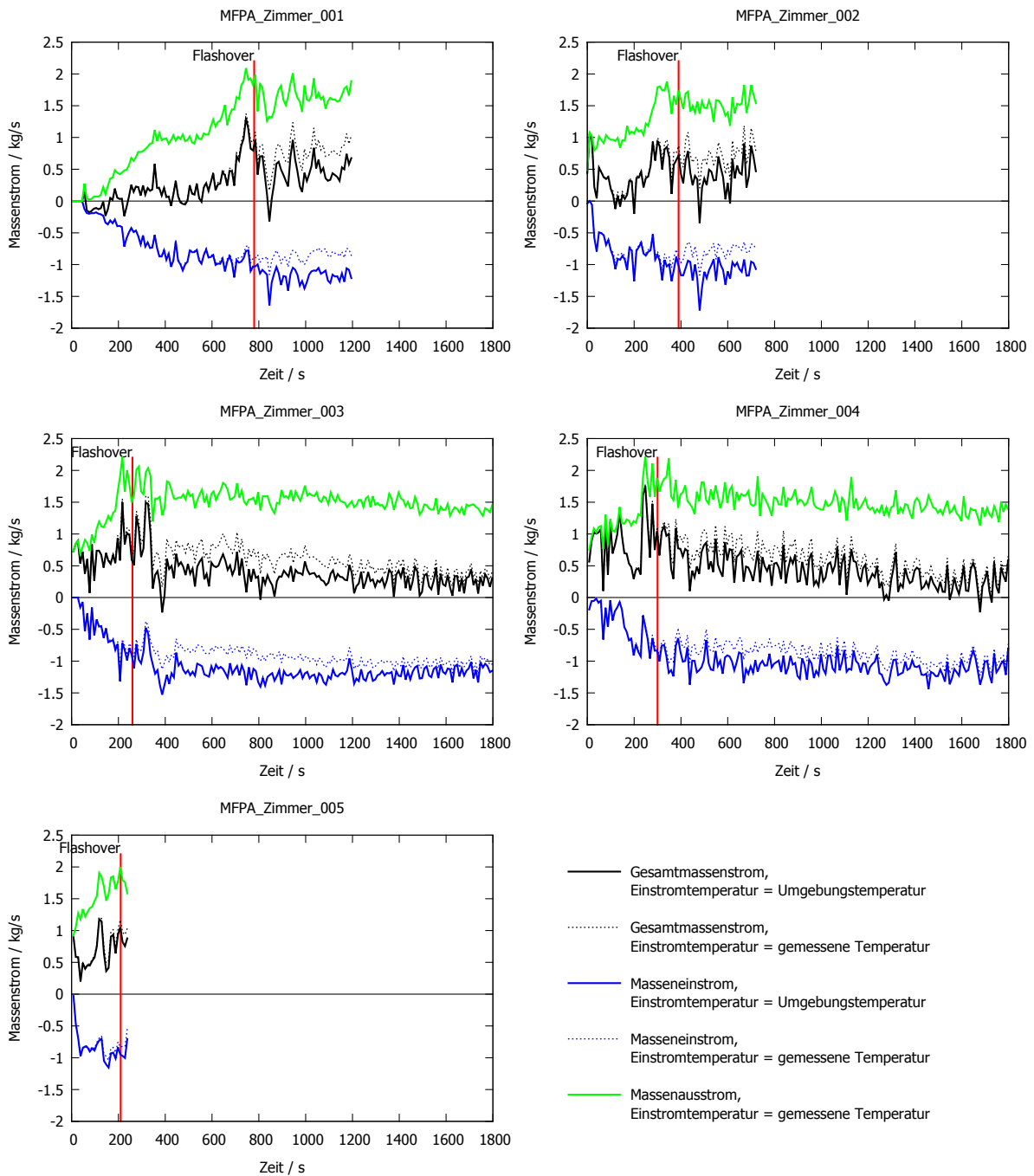


Abbildung N.40: Massenstrom durch die Brandraumöffnung: Vergleich der Versuche

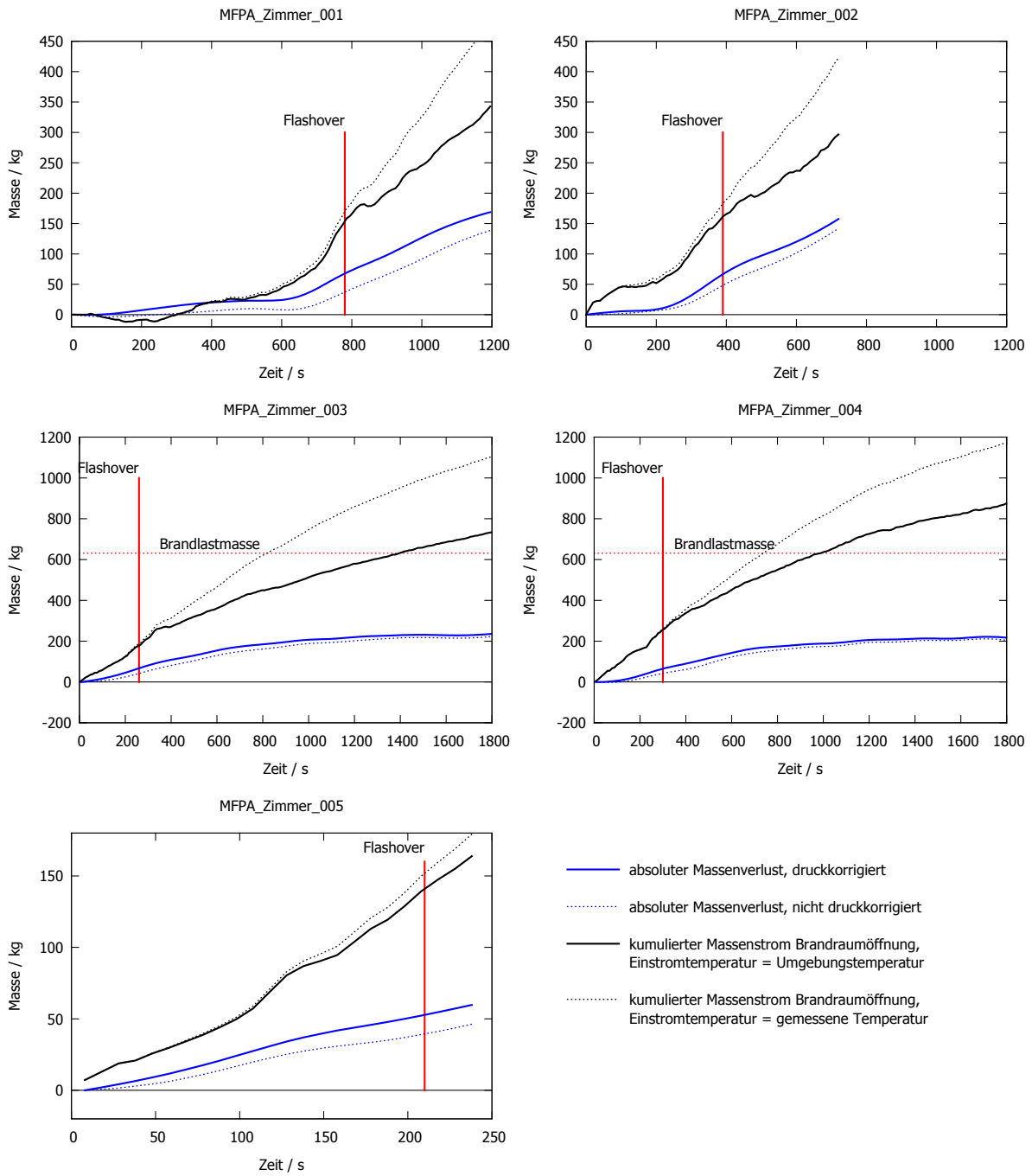


Abbildung N.41: Kumulierter Massenstrom durch die Brandraumöffnung und absoluter Massenverlust: Vergleich der Versuche

N.6 Spanplattenprobekörper

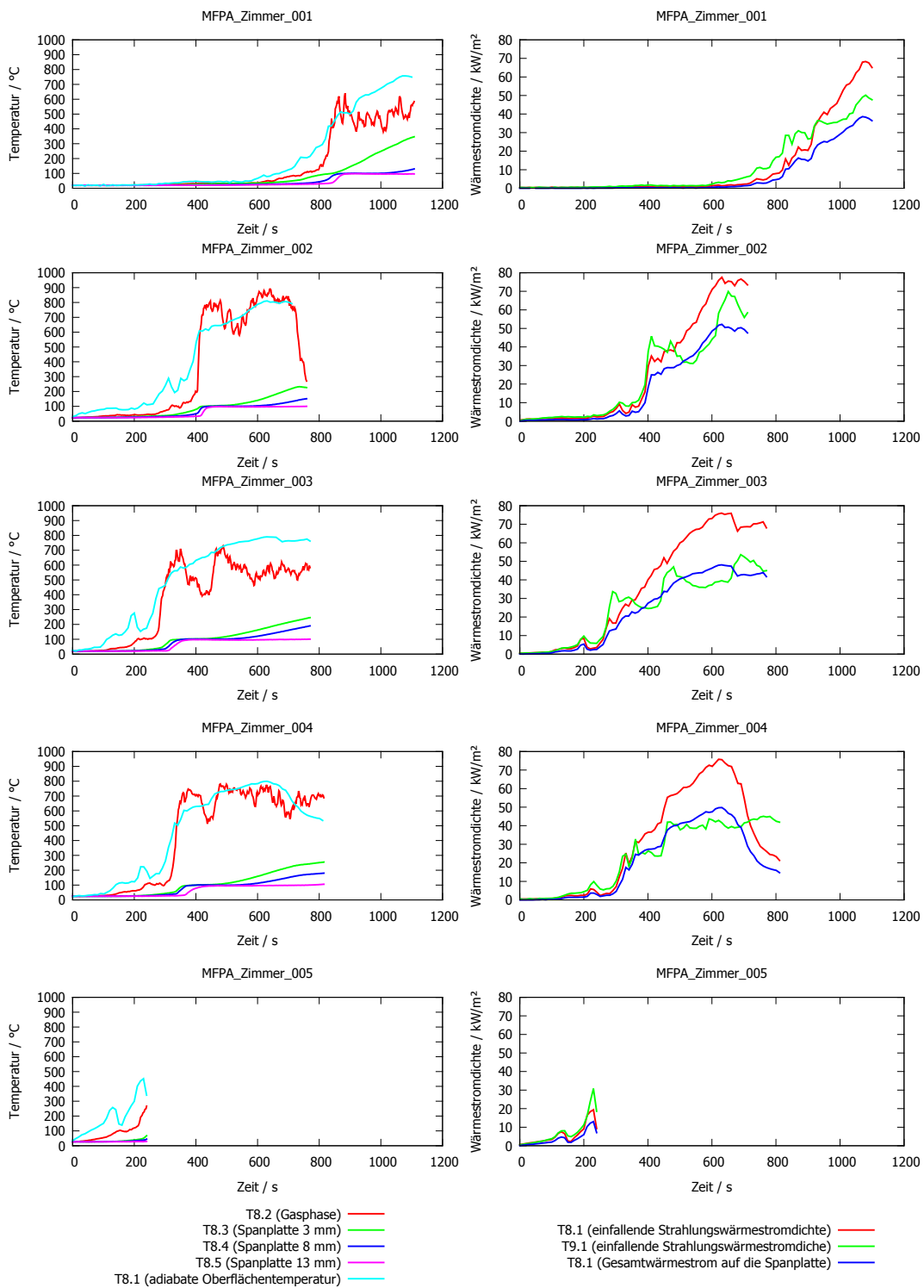


Abbildung N.42: Spanplattenprobekörper Referenzecke: Temperaturen und Wärmestromdichten

N.7 Gasspezieskonzentrationen

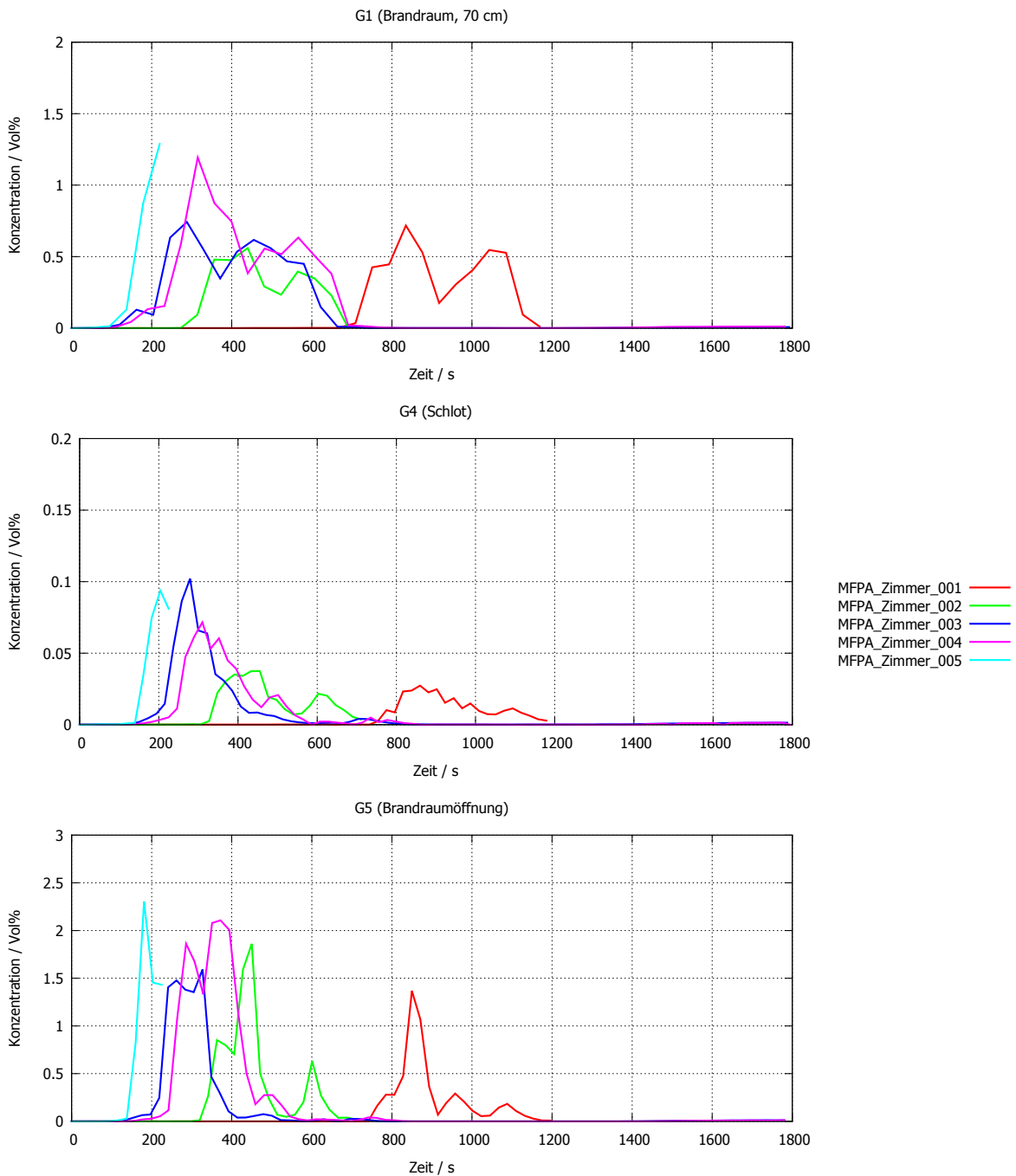


Abbildung N.44: Konzentrationsverlauf Methan (CH₄), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

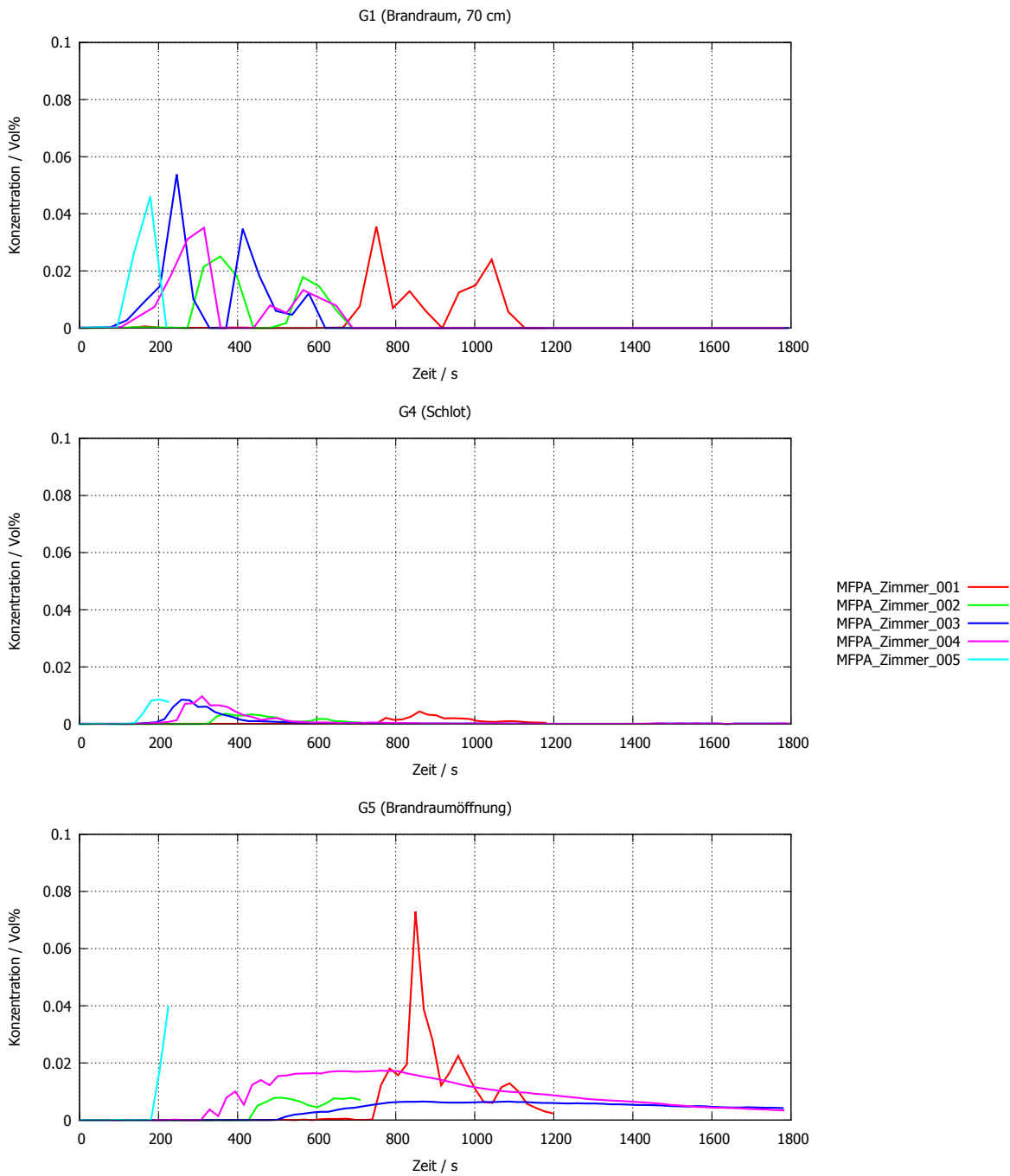


Abbildung N.45: Konzentrationsverlauf Benzol (C₆H₆), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

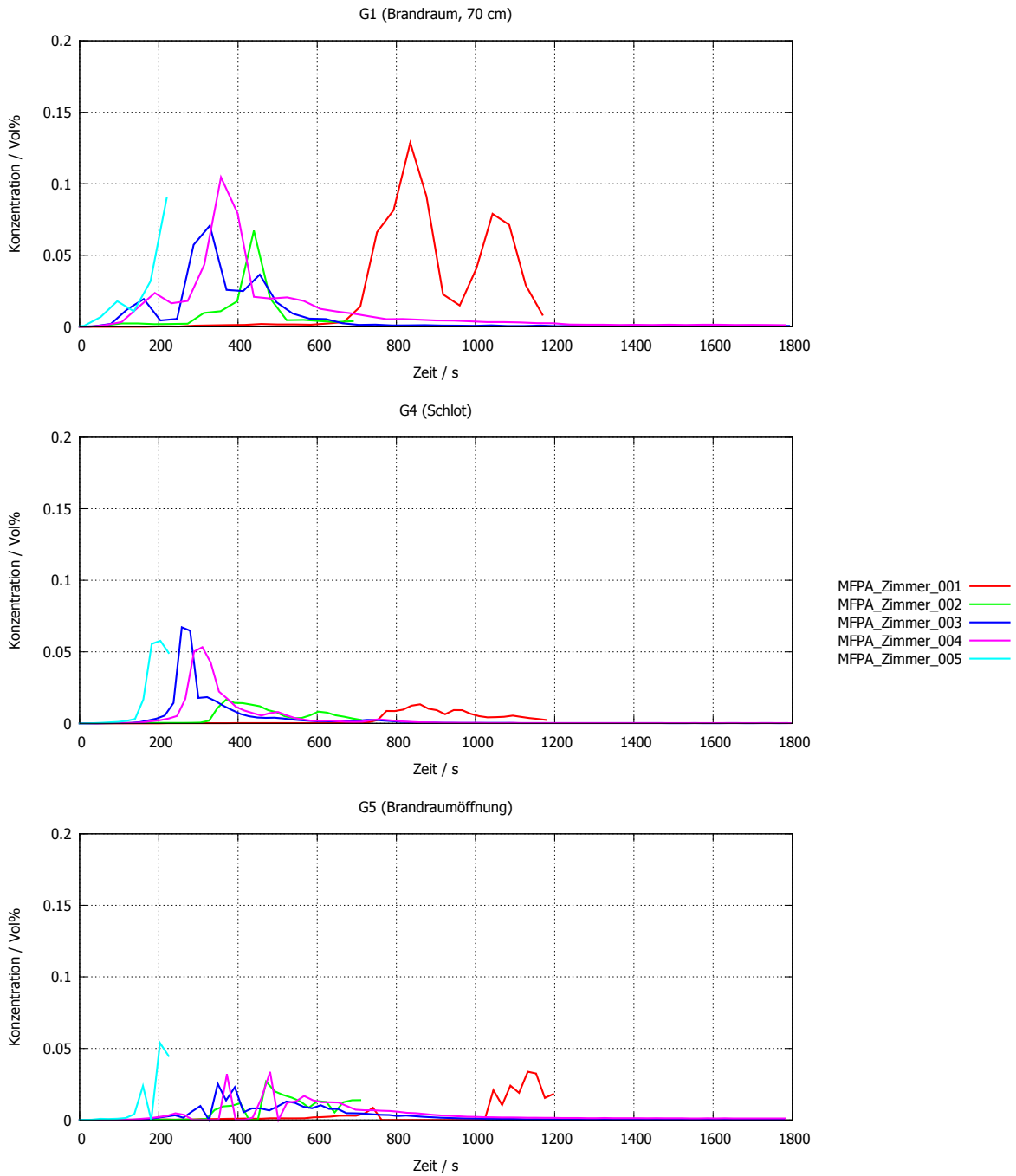


Abbildung N.46: Konzentrationsverlauf Cyanwasserstoff (HCN), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

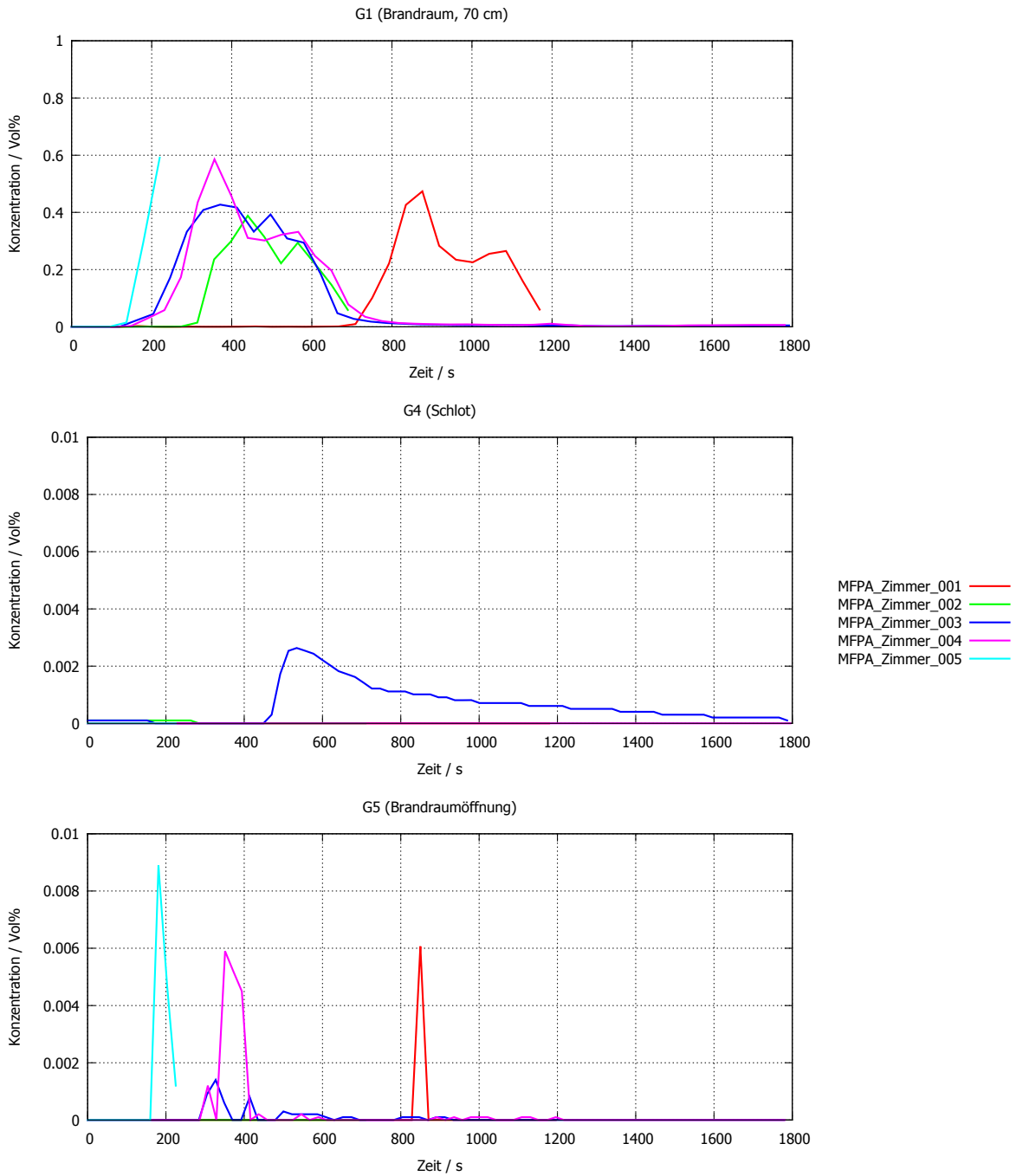


Abbildung N.47: Konzentrationsverlauf Ammoniak (NH₃), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

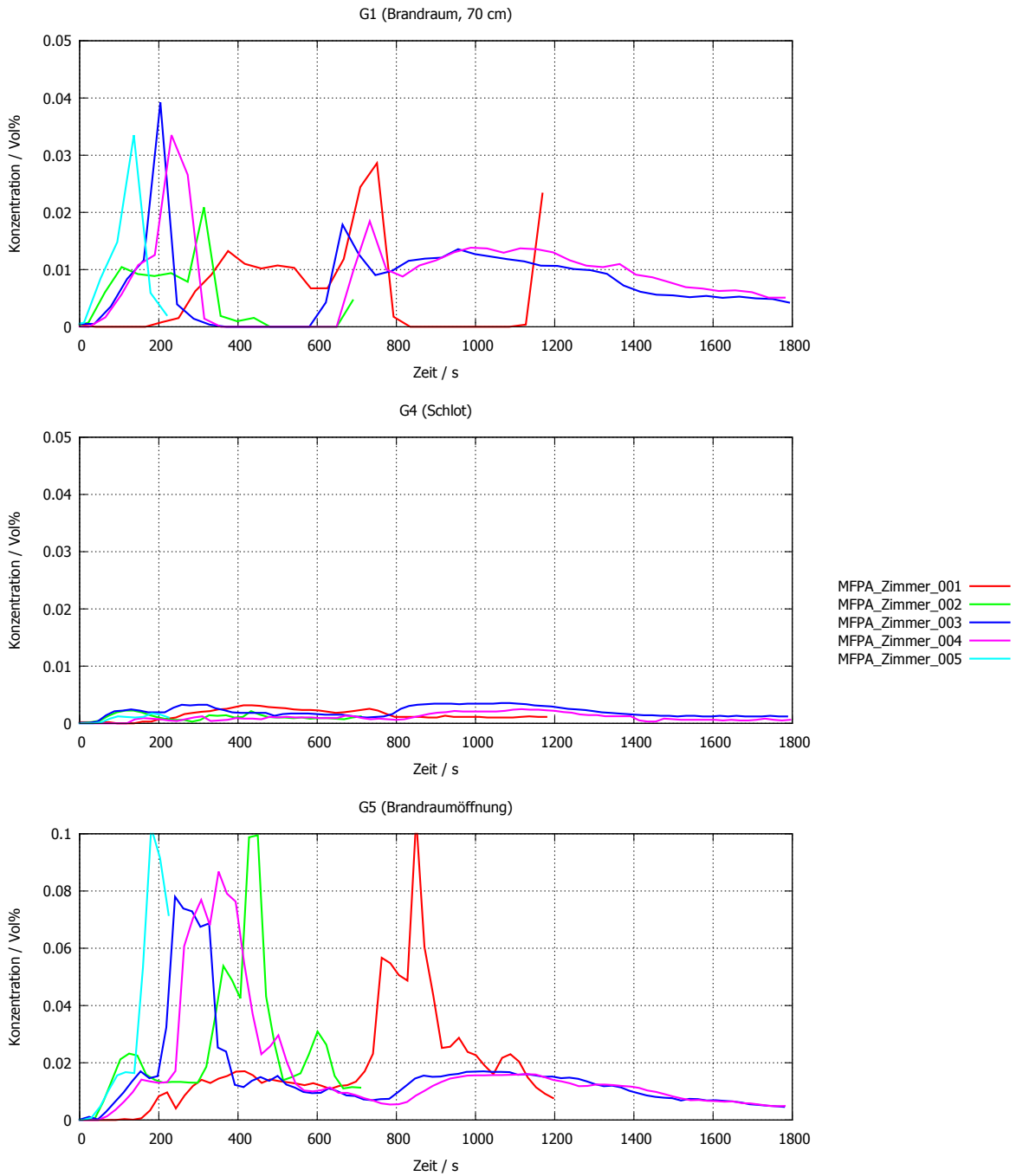


Abbildung N.48: Konzentrationsverlauf Stickstoffmonoxid (NO), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

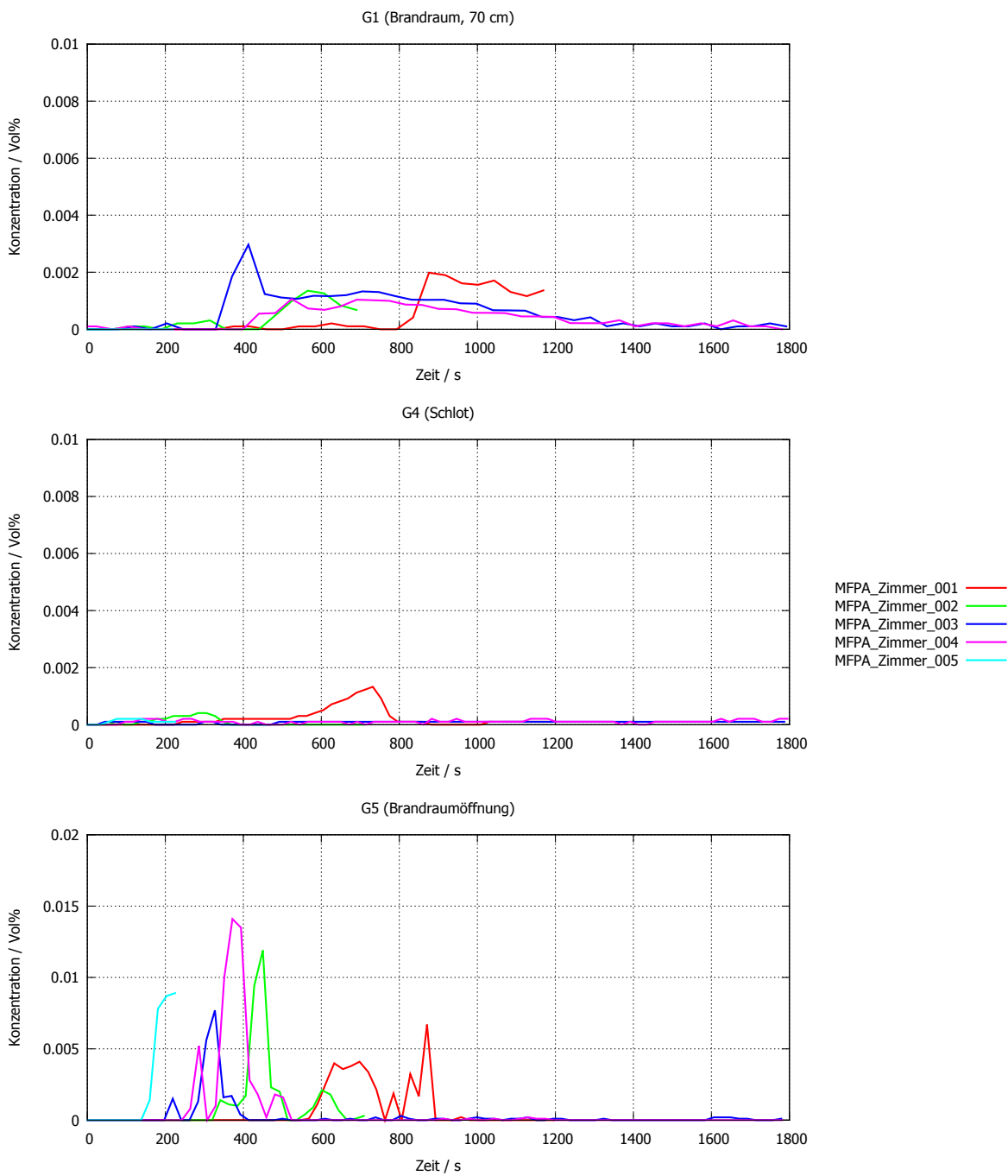


Abbildung N.49: Konzentrationsverlauf Stickstoffdioxid (NO₂), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

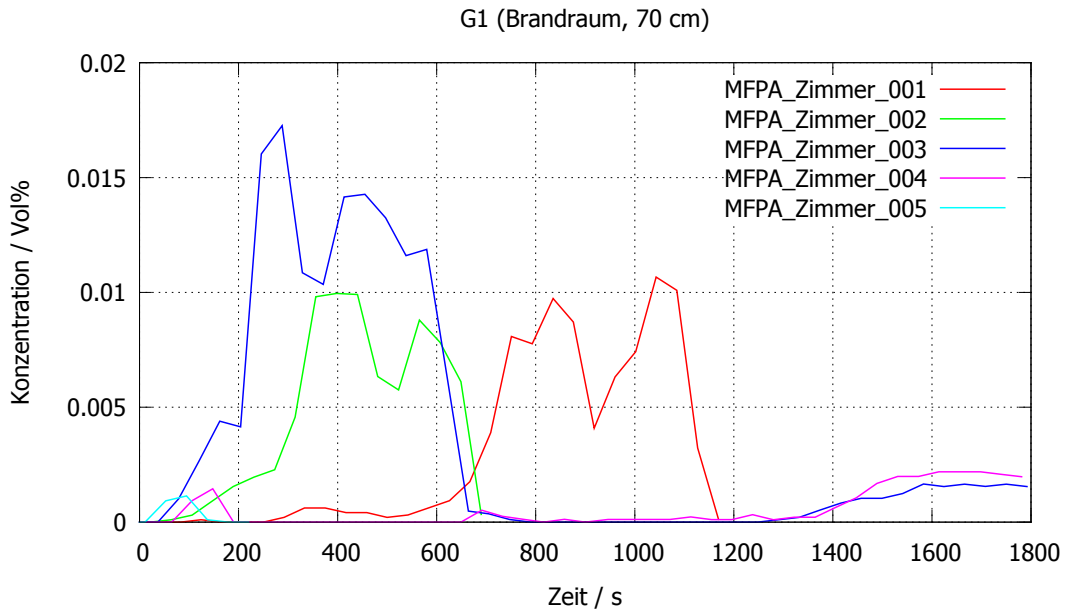


Abbildung N.50: Konzentrationsverlauf Formaldehyd (CH₂O), Messstelle G1, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn, an den Messstellen G4 und G5 wurde Formaldehyd nicht nachgewiesen

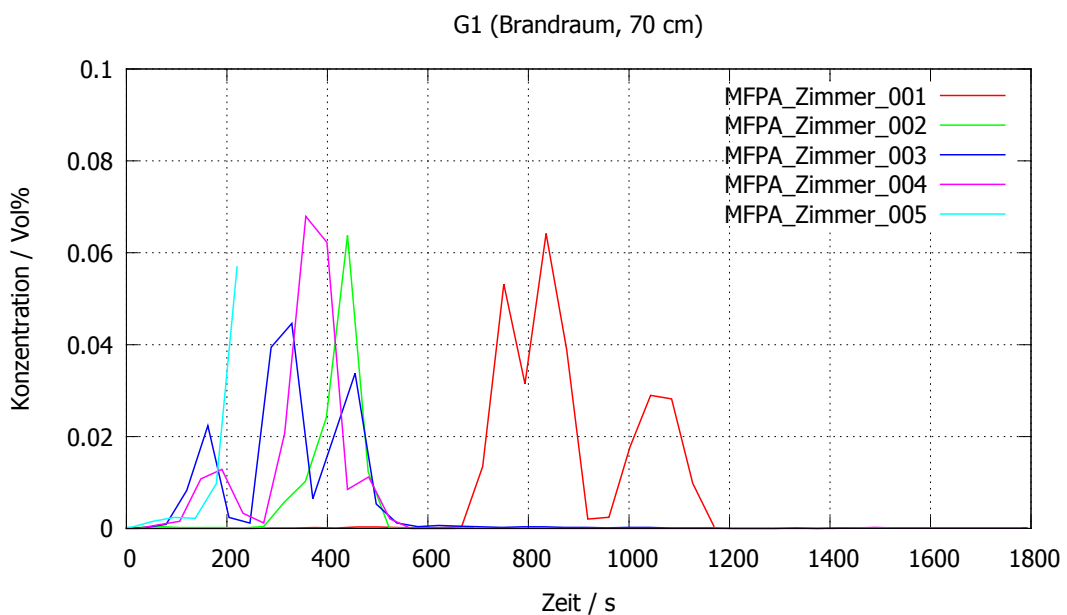


Abbildung N.51: Konzentrationsverlauf Ethin (C₂H₂), Messstelle G1, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

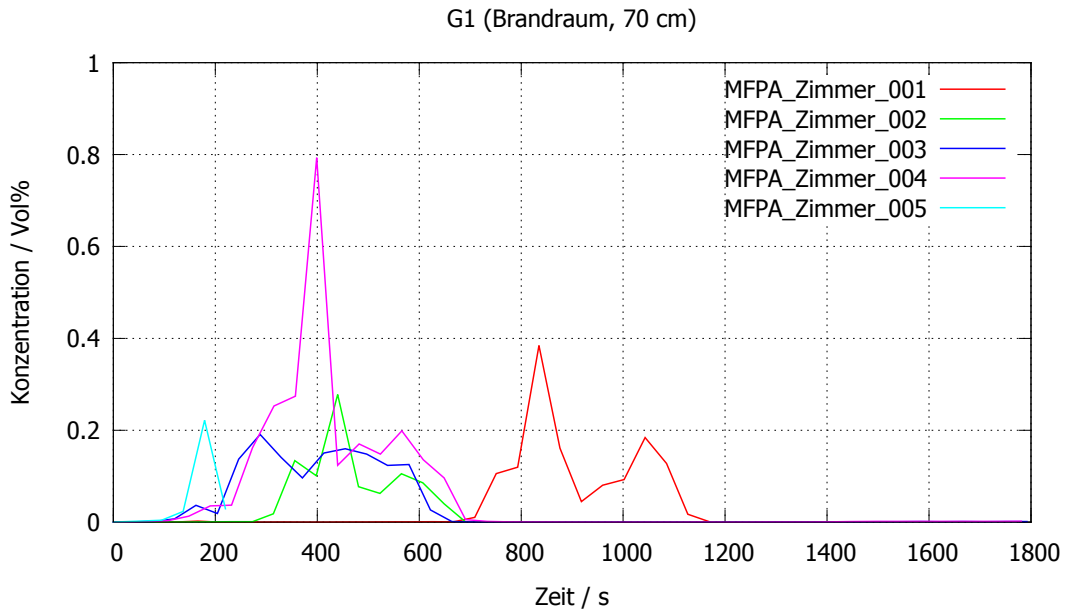


Abbildung N.52: Konzentrationsverlauf Ethen (C_2H_4), Messstelle G1, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

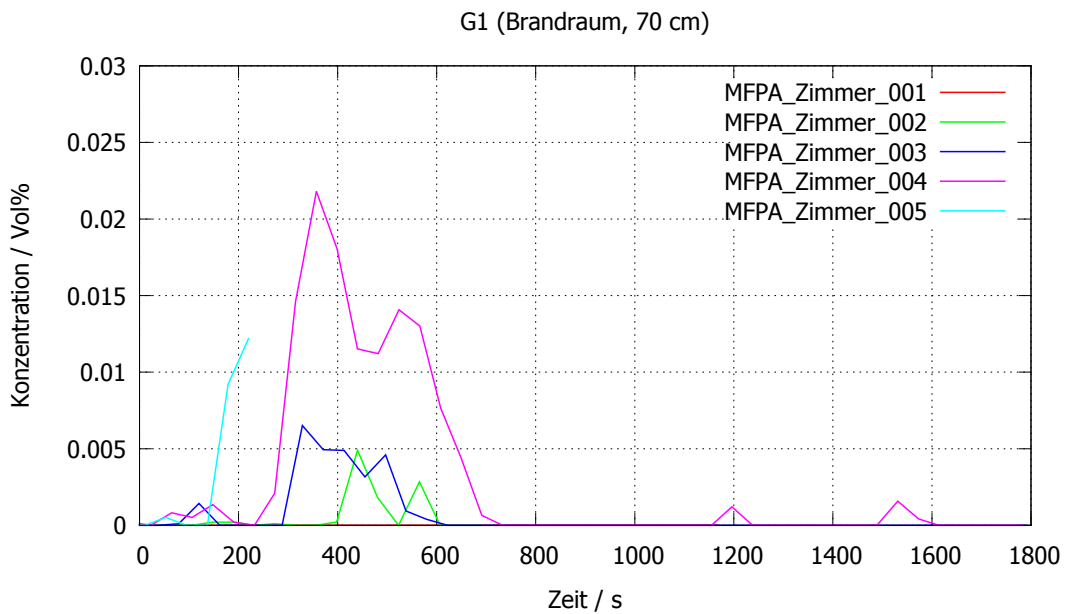


Abbildung N.53: Konzentrationsverlauf Acrolein (C_3H_4O), Messstelle G1, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

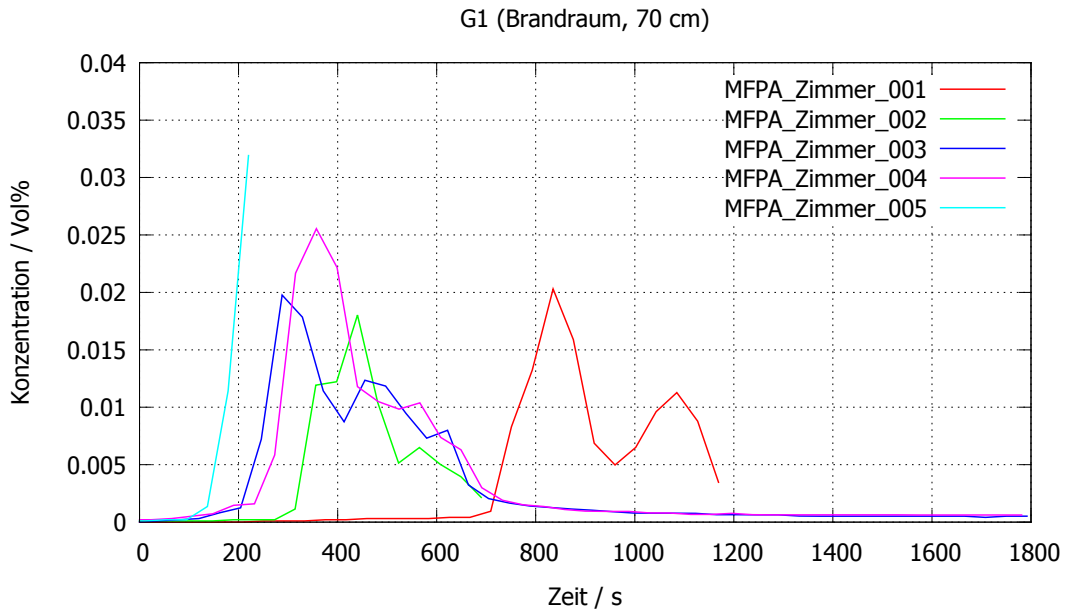


Abbildung N.54: Konzentrationsverlauf Phenol (C_6H_6O), Messstelle G1, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

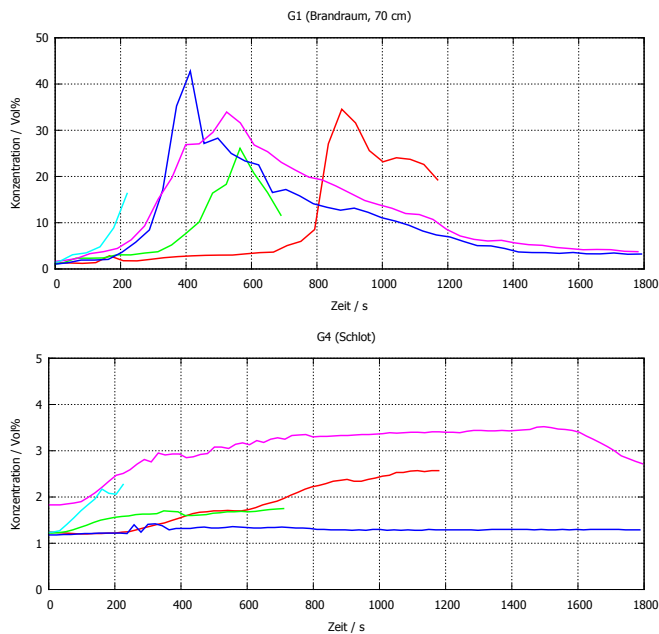


Abbildung N.55: Konzentrationsverlauf Wasserdampf (H_2O), Vergleich der Messstellen, Darstellung bis Löschbeginn

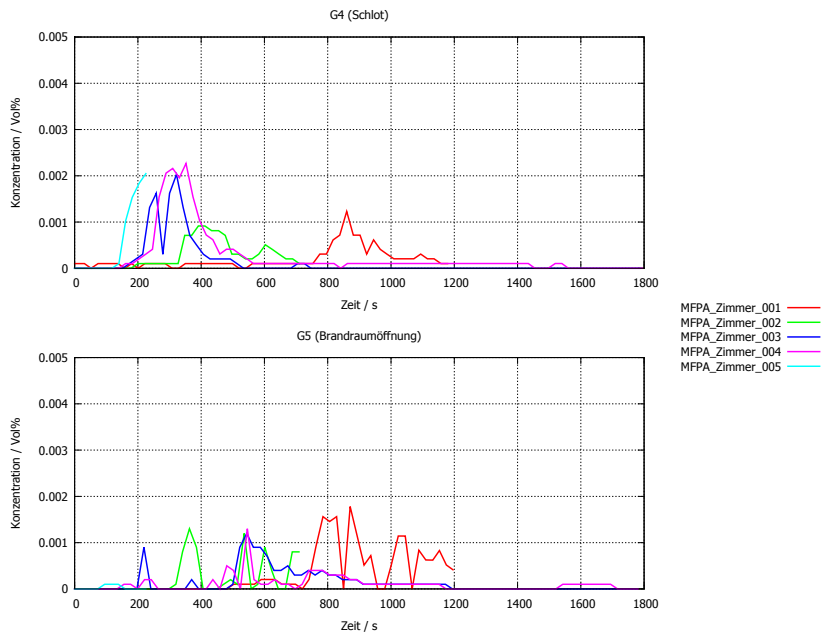


Abbildung N.56: Konzentrationsverlauf Schwefeldioxid (SO_2), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn, an der Messstelle G1 wurde Schwefeldioxid nicht nachgewiesen

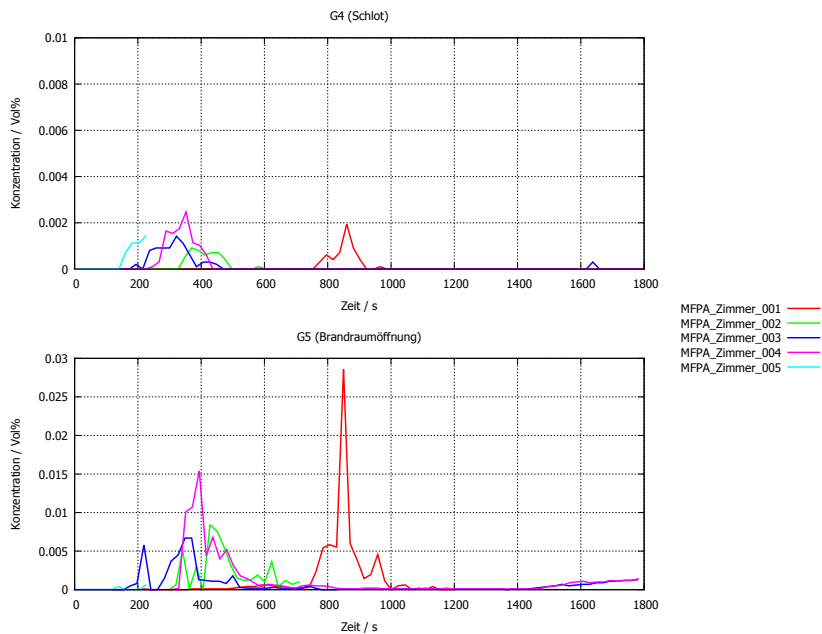


Abbildung N.57: Konzentrationsverlauf Ethan (C_2H_6), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

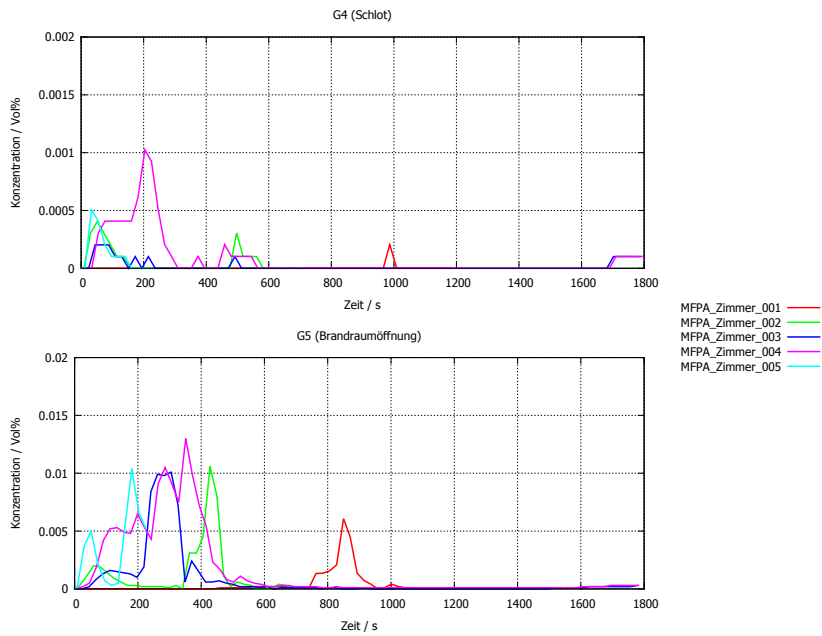


Abbildung N.58: Konzentrationsverlauf Propan (C_3H_8), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn

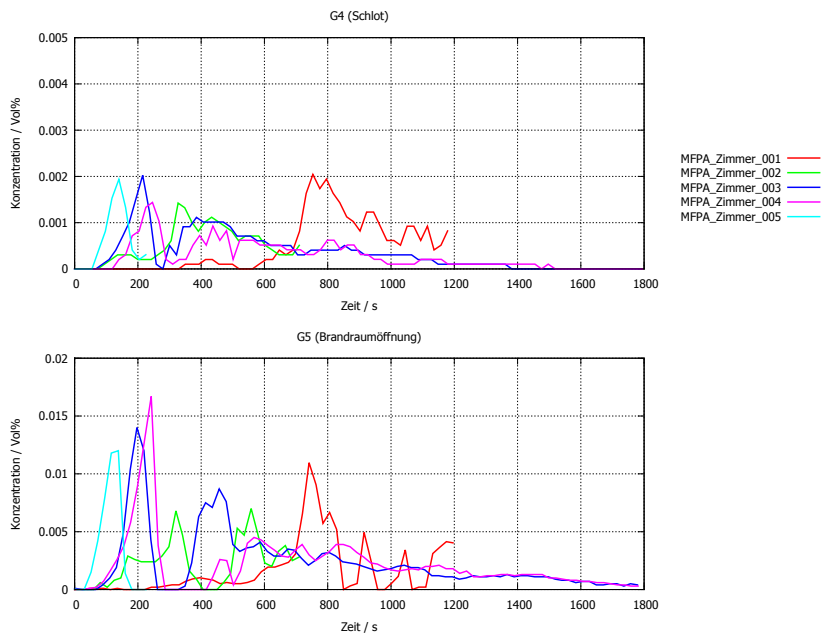


Abbildung N.59: Konzentrationsverlauf Distickstoffmonoxid (N_2O), Vergleich der Messstellen, Werte bezogen auf trockenes Messgas, Darstellung bis Löschbeginn