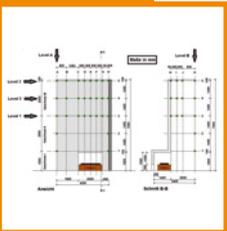
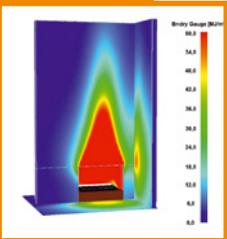
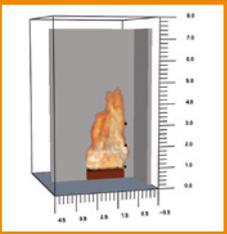


Berichte des Instituts für Bauphysik

Thomas Merkewitsch

Ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen



Ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen

von Thomas Merkwitsch

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad
Leibniz Universität Hannover
Institut für Bauphysik
Appelstraße 9A
30167 Hannover

Verfasser

Thomas Merkewitsch

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

© 2019 by Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad
Leibniz Universität Hannover
Institut für Bauphysik
ISBN (Print): 978-3-7388-0361-7
ISBN (E-Book): 978-3-7388-0362-4

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 60, D-70504 Stuttgart
Telefon 0711 970-2500
Telefax 0711 970-2508
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de
www.bauinformation.de

Berichte

des Instituts für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover
Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad;
Leibniz Universität Hannover – Institut für Bauphysik
Heft 8, August 2019

Ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie

der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Thomas Merkwitsch

geboren am 03.01.1984, in Hannover

Januar 2019

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. A. Fouad

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. L. Lohaus

Tag der Promotion: 13. März 2019

Kurzfassung

Aufgrund von eingetretenen Brandereignissen im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen wurde die öffentliche Diskussion über eine ausreichende Brandsicherheit von Fassaden in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland und in Europa deutlich verstärkt. Zudem herrscht national sowie international eine große Unsicherheit darüber, wie zukünftig Außenwandbekleidungen einheitlich in Europa geprüft werden sollen, um eine ausreichende Sicherheit zu erzielen und dabei gleichzeitig einen marktgerechten Handel innerhalb Europas zu gewährleisten.

Aus diesem Grund ist es Ziel dieser Arbeit ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen zu entwickeln, das es ermöglicht auftretende kritische Brandszenarien in einer Brandprüfung ausreichend sicher abzudecken und gleichzeitig realitätsnah zu simulieren. Dabei soll der technologische Aufwand zur Umsetzung des Prüfverfahrens auf das notwendigste Maß begrenzt sowie eine hohe Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit der Brandprüfung gewährleistet werden können.

Zur Entwicklung des Prüfverfahrens werden dazu numerische Modelle für unterschiedliche, in Brandprüfungen eingesetzte Prüffeuertypen bestimmt, die an verschiedenen Prüfstandsgeometrien von mittel und groß skalierten Brandversuchen validiert werden. Somit soll auf kostenintensive Brandversuche zur Bestimmung der wesentlichen Einflussparameter verzichtet werden.

Zum Nachweis einer realitätsnahen Brandbeanspruchung im Brandversuch wird im Rahmen einer Parameterstudie die maßgebende thermische Beanspruchung auf eine Außenwand infolge eines Raumbrandszenarios anhand analytischer Berechnungsmethoden bestimmt und mit den Simulationsmodellen für die untersuchten Prüffeuertypen an einem repräsentativen Prüfstand auf Übereinstimmung überprüft.

Auf Grundlage des bestimmten Prüffeuers werden die geometrischen und materialspezifischen Einflüsse des Prüfstandes sowie die Auswirkungen der Umgebungsbedingungen zur Herleitung notwendiger, festzulegender Randbedingungen im Prüfverfahren bestimmt. Des Weiteren werden Randbedingungen zum Prüfablauf erarbeitet, die es ermöglichen, eine gute Reproduzierbarkeit der Prüfung zu erzielen.

Durch Vergleichsbetrachtungen mit dem nationalen Sockelbrandversuch und den wesentlichen europäischen groß skalierten Brandversuchen für Außenwandbekleidungen wird die Gleichwertigkeit des entwickelten Brandversuchs nachgewiesen, sodass das Prüfverfahren sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene Anerkennung finden kann.

Schlagworte: Brandversuch, Brandausbreitung, Außenwandbekleidung

Abstract

Due to the outbreak of building fires, which have occurred in connection with combustible external wall cladding, a public debate about the adequacy of the fire safety of building facades has increased significantly in the recent past in Germany and Europe. Furthermore, there is great uncertainty both nationally and internationally as to how outer wall coverings should be tested in the future in order to ensure an equitable testing process and compliance system will properly function in the European cladding market.

For this reason, the aim of this work has been to develop an experimental testing process which would provide evidence-based design guidance for limiting the propagation of fire of external cladding, and which would simulate and cover adequately the most common and critical fire scenarios during fire testing. In this case, the technical effort required to undertake an appropriate testing regime has been limited to a level which would guarantee a highly-consistent reproducibility of the fire test.

For the development of the testing process, numerical models for different fire-test categories were defined, which were validated on various bench-test geometries by means of experiments from medium and large-scale fire tests. Thus, expensive fire tests can be dispensed with in order to determine the essential influencing parameters for the test method.

In order to provide the evidence of a realistic fire-load during testing, the decisive thermal fire-load on an exterior wall during a critical room fire scenario was determined in a parameter study using analytical calculation methods and tested for validity on a representative bench-test using simulation models for the test fire types investigated

During a specific fire test, the geometric and material-specific influences of the bench-test, as well as the influences of the ambient conditions, were determined in order to derive the necessary boundary conditions. Furthermore, boundary conditions for the test sequence were developed, which enabled a good reproducibility of the test.

Comparative studies from the national-based fire test and the main European large-scale fire tests for external wall cladding demonstrated the equivalence of the test procedure, so that the test can be recognized at both national and European level.

Keywords: Fire test, fire spread, wall cladding

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Umsetzung.....	5
2	Stand der Technik und Forschung	7
2.1	Einführung	7
2.2	Brandszenarien.....	9
2.2.1	Brand in einem Gebäude	9
2.2.2	Brand von außen, angrenzend zur Fassade.....	10
2.2.3	Brand in einem Nachbargebäude	11
2.3	Baurechtliche Anforderungen.....	13
2.3.1	Anforderungen gemäß MBO [105] sowie Sonderbauvorschriften	13
2.3.2	Klassifizierungen von Bauprodukten und Bauarten	18
2.3.3	Nachweis der Verwendbarkeit in Deutschland	21
2.3.3.1	Mittel skaliertes Brandversuch zur Prüfung von Außenwandbekleidungen - Brand von innen gemäß DIN 4102-20 [32].....	22
2.3.3.2	Groß skaliertes Brandversuch zur Prüfung von schwerentflammbaren WDVS mit EPS - Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107].....	23
2.3.4	Auswertung von Brandschadeneignissen.....	25
2.3.5	Abwehrender Brandschutz – Einsatzgrenzen der Feuerwehr	27
2.3.5.1	Hilfsfrist	28
2.3.5.2	Notwendige Prüfzeiten im Brandversuch aus Sicht der Feuerwehr	30
2.3.5.3	Mögliche kritische Einsatzgrenzen der Feuerwehr	30
2.3.5.4	Brandrisiko bei Gebäuden besonderer Art und Nutzung	32
2.4	Groß skaliertes Brandversuch für Außenwandbekleidungen.....	33
2.5	Prüffeuer von groß skalierten Brandversuchen	38
2.5.1	Anforderungen	38
2.5.2	Brandtechnische Parameter	39
2.5.3	Gasbrenner	41

2.5.4	Holzkrippe	43
2.5.5	Poolfeuer.....	50
2.6	Zusammenfassung	52
3	Bestimmung der maßgebenden Brandbeanspruchung für Außenwandbekleidungen – Raumbrandszenario.....	53
3.1	Einführung	53
3.2	Grundlagen	54
3.3	Brandtechnische Parameter.....	56
3.3.1	Bemessung der Brandlastdichte.....	56
3.3.2	Wärmefreisetzungsrate im Brandraum	56
3.3.3	Wärmeabgabe über die Brandraumöffnung.....	57
3.3.4	Branddauer	57
3.4	Einfluss geometrischer Randbedingungen des Brandraums	59
3.4.1	Form der Öffnungen und resultierender Heißgasstrom.....	59
3.4.2	Einfluss der Brandraumgeometrie	61
3.4.3	Flammenhöhen an der Brandraumöffnung.....	62
3.5	Bestimmung der Brandbeanspruchung auf eine Außenwand.....	64
3.5.1	Allgemeines Vorgehen	64
3.5.2	Randbedingungen.....	64
3.5.3	Maßgebende Brandbeanspruchung der Außenwand oberhalb der Brandraumöffnung	66
3.6	Sonderszenarien - Raumbrände	68
3.6.1	Ausführung der Umfassungsbauteile aus sichtbaren Holz oder mit Holzbekleidungen.....	68
3.6.2	Einfluss der Querbeltüftung infolge von Windbeanspruchungen.....	69
3.6.3	Einfluss der Sonneneinstrahlung und der Umgebungstemperatur	71
3.7	Fassadengeometrie	72
3.7.1	Einfluss von Kragplatten.....	72
3.7.2	Einfluss von Eckwänden- und U-förmigen Wänden	72
3.8	Zusammenfassung	73

4	Grundlagen zu den numerischen und experimentellen Untersuchungen	74
4.1	Einführung	74
4.2	Berechnungsmethodik FDS	76
4.2.1	Hydrodynamisches Modell	76
4.2.1.1	Grundgleichungen	76
4.2.1.2	Turbulenzen	77
4.2.2	Geometrische Diskretisierung	78
4.2.3	Wärmetransportmechanismen	79
4.2.3.1	Strahlung	79
4.2.3.2	Konvektion	81
4.2.3.3	Wärmeleitung	82
4.2.4	Pyrolyse Modelle	83
4.2.4.1	Vorgabe der Pyrolyserate	83
4.2.5	Pyrolyserate über reaktionskinematische Ansätze	83
4.2.5.1	Flüssigkeiten	83
4.2.5.2	Feststoffe	84
4.2.6	Modellierung der Verbrennung	85
4.3	Experimentelle und numerische Auswertungen	87
4.3.1	Messtechnik	87
4.3.2	Bewertungsmethoden von Validierungsversuchen	90
4.3.2.1	Modellunsicherheiten	90
4.3.2.2	Hilfsmittel zur Validierung	91
5	Experimentelle und numerische Untersuchung von Prüffeuern	93
5.1	Einführung	93
5.2	Gasbrenner	94
5.2.1	Experimentelle Untersuchung	94
5.2.1.1	Randbedingungen	94
5.2.1.2	Prüffeuern	96
5.2.1.3	Messdaten	98

5.2.1.4	Versuchsergebnisse	100
5.2.2	Numerische Untersuchung	105
5.2.2.1	Geometrie.....	105
5.2.2.2	Gitternetz.....	106
5.2.2.3	Simulation Prüffeuier	107
5.2.2.4	Verwendete Materialien	109
5.2.3	Ergebnisse	110
5.2.3.1	Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie.....	110
5.2.3.2	Ohne Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie	116
5.2.3.3	Wärmestromdichten	117
5.2.4	Fazit.....	119
5.3	Holzkrippe.....	120
5.3.1	Experimentelle Untersuchung	120
5.3.1.1	Randbedingungen	120
5.3.1.2	Prüffeuier.....	122
5.3.1.3	Messdaten.....	124
5.3.1.4	Versuchsergebnisse	126
5.3.2	Numerische Untersuchung	132
5.3.2.1	Geometrie.....	132
5.3.2.2	Gitternetz.....	133
5.3.2.3	Simulation Prüffeuier	134
5.3.2.4	Verwendete Materialien	136
5.3.3	Ergebnisse	136
5.3.3.1	Wärmefreisetzungsrater.....	137
5.3.3.2	Auswertungen ohne Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie	138
5.3.3.3	Auswertungen mit Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie	144
5.3.3.4	Auswertungen Flächenintegral Wärmestromdichte	146
5.3.4	Fazit.....	147
5.4	Poolfeuier	148

5.4.1	Experimentelle Untersuchung	148
5.4.1.1	Randbedingungen	148
5.4.1.2	Prüffeuer.....	149
5.4.1.3	Messdaten.....	151
5.4.2	Numerische Untersuchung.....	152
5.4.2.1	Geometrie.....	152
5.4.2.2	Gitternetz.....	152
5.4.2.3	Simulation Prüffeuer	153
5.4.2.4	Verwendete Materialien	154
5.4.3	Ergebnisse	154
5.4.3.1	Wärmefreisetzungsrate.....	154
5.4.3.2	Temperaturen und Wärmestromdichten	156
5.4.3.3	Flammenbild.....	158
5.4.4	Fazit.....	159
5.5	Zusammenfassung	160
6	Experimentelle und numerische Untersuchung von groß skalierten Brandversuchen.....	161
6.1	Einführung	161
6.2	BS 8414-1 [19].....	162
6.2.1	Experimentelle Untersuchung	162
6.2.1.1	Randbedingungen	162
6.2.1.2	Prüffeuer.....	164
6.2.1.3	Messdaten.....	166
6.2.2	Numerische Untersuchung.....	168
6.2.2.1	Geometrie.....	168
6.2.2.2	Gitternetz.....	168
6.2.2.3	Simulation Prüffeuer	169
6.2.2.4	Verwendete Materialien	170
6.2.3	Ergebnisse	170
6.2.3.1	Allgemein.....	170

6.2.3.2	Temperaturen.....	171
6.2.3.3	Flammenausbildung.....	173
6.2.3.4	Wärmestromdichten.....	174
6.2.4	Fazit.....	175
6.3	LEPIR 2 [115].....	176
6.3.1	Experimentelle Untersuchung.....	176
6.3.1.1	Randbedingungen.....	176
6.3.1.2	Prüffeuer.....	178
6.3.1.3	Messdaten.....	180
6.3.1.4	Versuchsergebnisse.....	181
6.3.2	Numerische Untersuchung.....	184
6.3.2.1	Geometrie.....	184
6.3.2.2	Gitternetz.....	184
6.3.2.3	Simulation Prüffeuer.....	185
6.3.2.4	Verwendete Materialien.....	186
6.3.3	Ergebnisse.....	186
6.3.3.1	Temperaturen.....	187
6.3.3.2	Flammenausbildung.....	189
6.3.3.3	Wärmestromdichten.....	190
6.3.4	Fazit.....	191
6.4	SP FIRE 105 [120].....	192
6.4.1	Experimentelle Untersuchung.....	192
6.4.1.1	Randbedingungen.....	192
6.4.1.2	Prüffeuer.....	195
6.4.1.3	Messdaten.....	196
6.4.1.4	Versuchsergebnisse.....	198
6.4.2	Numerische Untersuchung.....	199
6.4.2.1	Geometrie.....	199
6.4.2.2	Gitternetz.....	199

6.4.2.3	Simulation Prüffeuern	200
6.4.2.4	Verwendete Materialien	201
6.4.3	Ergebnisse	201
6.4.3.1	Temperaturen	201
6.4.3.2	Flammenausbildung	204
6.4.3.3	Wärmestromdichten	204
6.4.4	Fazit	205
6.5	ISO 13785-2 [71]	206
6.5.1	Numerische Untersuchung - Modellierung	206
6.5.1.1	Geometrie und Randbedingungen	206
6.5.1.2	Simulation Prüffeuern	209
6.5.1.3	Gitternetz	210
6.5.1.4	Verwendete Materialien	210
6.5.1.5	Messdaten	211
6.5.2	Numerische Untersuchungen - Ergebnisse	213
6.5.2.1	Temperaturen und Wärmestromdichten	213
6.5.2.2	Flammenausbildung	216
6.5.3	Fazit	217
6.6	Vergleich und Bewertung Brandversuche	218
6.6.1	Randbedingungen Simulationsvarianten	218
6.6.2	Ergebnisse	220
6.7	Zusammenfassung	226
7	Numerische Untersuchungen zur Entwicklung eines Prüfverfahrens für Außenwandbekleidungen	228
7.1	Einführung	228
7.2	Grundmodell	230
7.2.1	Randbedingungen Simulationsmodelle	231
7.2.2	Poolfeuer	231
7.2.3	Holzkrippe	233
7.2.4	Kompakt-Gasbrenner	236

7.2.5	Messdaten	237
7.2.6	Ergebnisse	239
7.2.7	Fazit	241
7.3	Parameterstudie	242
7.3.1	Brandkammer	243
7.3.1.1	Einfluss der Höhe	243
7.3.1.2	Einfluss der Zuluft	246
7.3.1.3	Einfluss des Materials	248
7.3.2	Eckwände	251
7.3.3	U-förmige Wände	255
7.3.4	Brandversuche mit Außenwandbekleidungen – Vergleichsnachweis Sockelbrandprüfung	258
7.3.5	Prüfablauf, Geometrie und Messstellen	260
7.3.5.1	Prüfablauf	260
7.3.5.2	Geometrie und Messstellen	261
7.3.6	Umgebungsbedingungen im Brandversuch	264
7.3.6.1	Einfluss Umgebungsklima	264
7.3.6.2	Einfluss Prüfhallenhallengeometrie	268
7.3.6.3	Einfluss Lüftungsbedingungen	278
8	Zusammenfassung und Ausblick	279
9	Literaturverzeichnis	284
10	Anlagen	295
10.1	Anlage A – Zusammenfassung relevanter Prüfbedingungen von groß skalierten Brandversuchen zur Prüfung von Außenwandbekleidungen in Europa	295
10.2	Anlage B - Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate von Holzkrippen	302
10.3	Anlage C - Auswertung Raumbrandmodelle	303
10.3.1	Modifiziertes Berechnungsverfahren gemäß EC 1-1-2 Anhang B [37]	303
10.3.1.1	Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate gemäß EC 1-1-2/NA Anhang BB [38] und vfdb-Leitfaden [67]	303

10.3.1.2	Bestimmung der Flammenlänge gemäß EC 1-1-2 Anhang B [37].....	304
10.3.1.3	Bestimmung der Temperatur an der Brandraumöffnung.....	304
10.3.1.4	Bestimmung der Temperaturen entlang der Flammenachse.....	304
10.3.2	Parameterstudie zur Bestimmung der thermischen Beanspruchung von Außenwänden infolge Wohnraumbränden.....	306
10.4	Anlage D - Validierungsversuche Prüffeuer.....	307
10.4.1	DIN 4102-20 [32] – Validierungsversuch Kompakt-Gasbrenner.....	307
10.4.2	Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] – Validierung Holzkrippe.....	308
10.5	Anlage E – Bestimmung eines Prüfverfahrens.....	309
10.5.1	Vergleich Grundmodell mit maßgebenden Raumbrandszenario.....	309
10.5.2	Aufbau Poolfeuerkonstruktion.....	311
10.6	Anlage F – Materialspezifische Eingabewerte für FDS.....	312
10.6.1	Beton DIN EN 1992-1-2 [39].....	312
10.6.2	Kohlenstoffstahl DIN EN 1993-1-2 [40].....	313
10.6.3	Kalksandstein DIN EN 1996-1-2 [42].....	313
10.6.4	Porenbeton DIN EN 1996-1-2 [42].....	314
10.6.5	Leichtbeton DIN 4108-4 [34].....	314
10.6.6	Fensterglas DIN EN ISO 10456 [44].....	314
10.6.7	Kalziumsilikatplatte (Promatect) [51].....	315
10.6.8	Mineralwolle (Steinwolle).....	315
10.6.9	Keramikfaserplatte [72].....	315
10.6.10	Keramikfaserisolierung [72].....	316
10.6.11	Plattenthermoelement.....	316

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Präexponentieller Faktor	[1/s]
$A_{\text{Außen}}$	brandwirksame seitliche und obere Krippenfläche	[m ²]
$A_{\text{F,max}}$	maximal beherrschbare Brandfläche der Feuerwehren	[m ²]
A_s	Stabfläche (Holzkrippen)	[m]
$B(x, \lambda)$	Emissionsquellterm	[-]
b	Stabhöhe (Holzkrippen)	[m]
b	Wärmeeindringzahl	$[(W^2 \cdot s / (m^4 \cdot K^2))^{0,5}]$
C	experimentell ermittelte Konstante zur Bestimmung von Wärmefreisetzungsraten bei Holzkrippen ($1,05 \times 10^{-3}$)	$[gcm^{-3/2} \cdot s^{-1}]$
c_p	spezifische Wärmekapazität	[kJ/(kg·K)]
D	Stabbreite (Holzkrippen)	[m]
D^*	Charakteristischer Branddurchmesser	[m]
E	Aktivierungsenergie	[J/mol]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
ΔH_c	Verbrennungswärme	[MJ/kg]
H_o	oberer Heizwert	[MJ/kg]
H_u	Unterer Heizwert	[MJ/kg]
h_c	Krippenhöhe (Holzkrippen)	[m]
h_s	Enthalpie	[J]
I	Bewertungszahl	[-]
$I_\lambda(x, s)$	Strahlungsintensität bei der Wellenlänge λ	[W/m ²]
l	Stablänge (Holzkrippen)	[m]
L_v	Vergasungs- oder Pyrolyseenergie	[MJ/kg]

n	Anzahl der Stäbe pro Schicht (Holzkrippen)	[-]
M	Molare Masse	[g/mol]
m	Masse	[kg]
m_0	Masse bei Prüfbeginn	[kg]
\dot{m}	Massenstrom; Massenverlust; Abbrandrate	[kg/s]
N	Anzahl der Schichten pro Lage (Holzkrippen)	[-]
Nu	Nußelt-Zahl	[-]
R	Gaskonstante $8,314 \times 10^{-3}$	[kJ/(mol·K)]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
Sc	Schmidt-Zahl	[-]
t	Zeit	[s]
T	Temperatur	[K]
Pr	Prandtl-Zahl	[-]
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate	[kW]
\dot{q}	flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate	[kW/m ²]
\dot{q}''	Wärmestromdichte	[kW/m ²]
\dot{q}'''	Wärmequelle	[kW/m ³]

Griechische Buchstaben

ε	Emissivität	[-]
θ	Polarwinkel	[°]
κ	effektiver Absorptionskoeffizient	[-]
κ_n	Absorptionskoeffizient innerhalb des Frequenzbandes n	[-]
$\kappa(x, \lambda)$	lokaler Absorptionskoeffizient	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]
λ	Wellenlänge	[m]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ν_p	Abbrandfaktor von Krippenstäben	[-]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	[W/(m ² ·K ⁴)]
$\sigma_s(x, \lambda)$	lokaler Streukoeffizient	[-]
Φ	Konfigurationsfaktor	[-]
ϕ	Azimutwinkel	[°]
ϕ	Krippenporositätsfaktor (Holzkrippen)	[cm ^{1,1}]
ϕ	relative Luftfeuchtigkeit	[%]
χ	Verbrennungseffektivität	[-]

Begriffe

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
aBG	allgemeine Bauartgenehmigung
BiR	Brand in Räumen (Artikelreihe vfdb-Zeitschrift)
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHF	einwirkende Wärmestromdichte infolge Konvektion (Convective Heat Flux)
DNS	Direct Numerical Simulation
EPS	expandierter Polystyrolschaum
ETA	europäisch technische Bewertung
ETICS	External Thermal Insulation Composite Systems
FDS	Fire Dynamic Simulator
GHF	einwirkende Wärmestromdichte infolge Konvektion und Strahlung
GKL	Gebäudeklasse nach Musterbauordnung
LBO	Landesbauordnung
LES	Large Eddy Simulation
MBO	Musterbauordnung
MTE	Mantelthermoelement
MVV TB	Muster Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmung
NIST	National Institut of Standards and Technology
PTE	Plattenthermoelement
RMF	einwirkende Wärmestromdichte infolge Strahlung (Radiometer Heat Flux)
RTE	Strahlungsübertragungsgleichung (Radiative Transfer Equation)
TE	Thermoelement
VHF	vorgehängte hinterlüftete Fassade
WDVS	Wärmedämm-Verbundsystem
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Aufgrund von eingetretenen Brandereignissen im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen wurde die öffentliche Diskussion über eine ausreichende Brandsicherheit von Fassaden in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland und in Europa deutlich verstärkt. Die aufgetretenen Brandereignisse in Deutschland waren für die Bauministerkonferenz (IS-ARGEBAU) der Anlass dafür, die bisher in den Brandprüfungen nicht berücksichtigten Auswirkungen von außenliegenden Brandquellen intensiver untersuchen zu lassen. Auf der Grundlage, der seit 2013 gewonnenen Untersuchungsergebnisse, wurde ein groß skaliertes Brandversuch (Sockelbrandprüfung) entwickelt, welcher in die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmung (MVV TB) [107], eingeflossen ist. Dieser groß skalierte Brandversuch diente bisher explizit der Prüfung von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) aus expandiertem Polystyrol (EPS) mit der bauordnungsrechtlichen Anforderung schwerentflammbar. Inzwischen steht auch eine Ausweitung der Sockelbrandprüfung auf weitere schwerentflammbare Außenwandbekleidungs-systeme zur Diskussion, da mit der Brandprüfung gemäß DIN 4102-20 [32] und dem dabei zu verwendenden, skalierten Prüffeuer bisher keine repräsentativen Raumbrandszenarien simuliert werden können.

Die Prüfung im Sockelbrandversuch wird an einer mindestens 9,8 m hohen, L-förmigen Prüf-wand (Rück- und Eckwand) durchgeführt. Als Prüffeuer dient eine im Eckbereich des Prüfstandes platzierte Holzkrippe mit einer Masse von ca. 200 kg. Das Prüffeuer erreicht während der Vollbrandphase eine mittlere Wärmefreisetzung von ca. 2,0 bis 2,5 MW.

Die Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen infolge eines Raumbrandes, welche die Anforderung schwerentflammbar erfüllen müssen, wird – zusätzlich zu den einzelnen Baustoffprüfungen (klein skalierte Brandversuche im Labor) – im Bausatz gemäß DIN 4102-20 [32] geprüft. Dabei wird die Brandbeanspruchung im Brandversuch an einer L-förmigen Prüf-wand mit einer Höhe von mindestens 5,5 m durch eine in der Brandkammer platzierte Holzkrippe mit einer Masse von ca. 30 kg (mittlere Wärmefreisetzung während der Vollbrandphase von ca. 0,40 bis 0,45 MW) oder eines Propangasbrenners mit einem Gasdurchsatz von ca. 7,4 g/s (mittlere Wärmefreisetzungsrates während der Vollbrandphase von ca. 0,34 MW) simuliert.

Auf der Grundlage von Raumbrandversuchen an typisch ausgestatteten Wohn- und Büroräumen wurde festgestellt, dass in der Vollbrandphase ca. 1/3 der insgesamt aufgetretenen Wärmefreisetzungsrates im Brandraum als Wärmeabgabe an der

Brandraumöffnung vorherrschen kann [138]. Die auf die Außenwand wirkende Flamme erreicht bei Raumgrößen von bis ca. 20 m² eine durchschnittliche Leistung von 1,5 bis 2,5 MW. In Abhängigkeit von der Geometrie der Brandraumöffnung werden dadurch Flammenhöhen von bis zu 4 m erreicht. Somit werden bei dem Prüfansatz gemäß DIN 4102-20 [32] an der Brandkammeröffnung bei einer Breite von 1 m im ungünstigsten Fall lediglich ca. 1/4 bis 1/8 der Wärmeabgabe im Vergleich zu den repräsentativen Raumbrandversuchen nach [138] simuliert.

Mit zunehmender Höhe oberhalb der Brandkammeröffnung kann die Brandbeanspruchung durch den Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] (Flammenhöhe von ca. 1,0 bis 1,5 m) im Vergleich zu einem im Vollbrand befindlichen kritischen Raumbrand (Flammenhöhe bis ca. 4,0 m) nicht mehr realitätsnah simuliert werden. Insbesondere die maßgebende Strahlungswirkung der Flamme wird aufgrund des reduzierten Flammenkörpers deutlich unterschätzt. Dies hat zur Folge, dass die Wechselwirkung aus kritischer Sturz- und großflächiger thermischer Brandbeanspruchung der Außenwandbekleidung oberhalb des Sturzes nicht abgedeckt wird und damit eine realitätsnahe, thermische Beanspruchung im Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] nicht erreicht werden kann.



Abbildung 1-1: Sockelbrandversuch an einem WDVS mit EPS (Rohdichte 25 kg/m³) und einem Brandriegel auf einer Höhe von 5 m über Oberkante Fußboden. Foto links: Darstellung des applizierten Dämmstoffes mit der Ausführung eines Brandriegels an einem 9,8 m hohem Prüfstand vor Applizierung des Putzes. Foto mitte: Brandgeschehen in der 15. Prüfminute (ca. 10 Minuten Vollbrand der Krippe). Foto rechts: Nach Beendigung des Brandversuchs vollständiger Abbrand der Außenwandbekleidung. [98]

Untersuchungen an WDVS mit EPS im Sockelbrandversuch zeigen die Problematik von bisher entwickelten Brandschutzmaßnahmen für Außenwandbekleidungen aus dem mittel skalierten Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32]. In Abbildung 1-1 ist ein

Sockelbrandversuch an einem WDVS mit EPS mit einer Rohdichte von 25 kg/m^3 unter Verwendung einer Brandriegelausbildung in jedem zweiten Geschoss [98] dargestellt. An einem Prüfstand mit einer Höhe von ca. 9.8 m bedeutet dies, dass maximal ein Brandriegel bei einer Höhe von ca. 5 m ausgeführt wird. Dabei wird deutlich, dass die abgeleiteten Brandschutzmaßnahmen bei brennbaren Außenwandbekleidungen aus dem mittel skalierten Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] gegenüber einer repräsentativen Naturbrandbeanspruchung im ungünstigsten Fall keinen ausreichenden Schutz zur Vermeidung einer Brandausbreitung über zwei Geschosse hinaus gewährleisten können. Durchgeführte Untersuchungen von Agarwal [1] zeigten ähnliche signifikante Unterschiede zum Brandverhalten von Außenwandbekleidungen zwischen skalierten und nicht skalierten Brandbeanspruchungen im Brandversuch.

Auch auf EU-Ebene werden Außenwandbekleidungen mit Brandversuchen geprüft. Dabei variiert der Ansatz der Prüfung bei den Mitgliedsstaaten zwischen mittel skalierten und groß skalierten Brandversuchen. Bisher ist es nicht gelungen, einen einheitlichen Brandversuch für die Anwendung in Europa zu bestimmen, welcher die baurechtlichen Anforderungen der Mitgliedsstaaten ausreichend abdeckt, eine ausreichende Reproduzierbarkeit gewährleistet sowie technologisch mit einem möglichst geringen Aufwand durchgeführt werden kann. Auch aus diesen Gründen ist bis heute in Europa kein uneingeschränkter Handel mit Außenwandbekleidungs-systemen möglich, da die Systemhersteller für viele Mitgliedsstaaten jeweils ein eigenes Anwendungsdokument mit ergänzenden Brandprüfungen für die Anwendung vorlegen müssen.

1.2 Zielsetzung

Bei der Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen wird momentan diskutiert, in welcher Form mit der nationalen Brandprüfung gemäß DIN 4102-20 [32] eine ausreichende Sicherheit zur Beurteilung der Brandausbreitung in und auf Außenwandbekleidungen für das Raumbrandszenario erzielt werden kann. Zudem gibt es national sowie international eine große Unsicherheit, wie zukünftig Außenwandbekleidungen einheitlich in Europa geprüft werden sollen, um einen marktgerechten Handel innerhalb Europas zu gewährleisten. Zur Erlangung einer einheitlichen Lösung herrscht auf nationaler sowie europäischer Ebene ein reger Austausch der Interessensvertreter. Die Themen Reproduzierbarkeit des Prüffeuers, der Aufwand der technischen Umsetzung des Brandversuchs sowie die Umsetzung einer repräsentativen Naturbrandbeanspruchung spielen dabei in den Gremien, Normenausschüssen und bei den Behörden national und sowie auf europäischer Ebene eine wichtige Rolle. Da einige Brandereignisse im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen in der Bevölkerung zu einer

zunehmenden Unsicherheit geführt haben, wurde das Thema auf nationaler und auf europäischer Ebene zunehmend auch politisch fokussiert.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Brandversuch zu entwickeln, welcher es ermöglicht, die Brandausbreitung sowie das Brandverhalten in und auf brennbaren und nichtbrennbaren Außenwandbekleidungen realitätsnah darzustellen. Der so entwickelte, repräsentative Brandversuch soll sowohl das Raumbrandszenario als auch das Außenbrandszenario gemäß Sockelbrandprüfung MVV TB [107] abdecken und dabei gleichzeitig den technischen Aufwand zur Versuchsdurchführung so gering wie möglich halten. Der wesentliche Fokus liegt in diesem Zusammenhang auf der Bestimmung des Prüffeuers und der Prüfstandsgeometrie. Zum einen muss die Durchführung von Brandversuchen an unterschiedlichen Prüfstellen gleichsam reproduzierbar sein. Zum anderen muss die technologische Bereitstellung und Anwendung so einfach gehalten werden, dass das Risiko etwaiger experimenteller Unsicherheiten hinsichtlich der vom Prüffeuer ausgehenden Brandbeanspruchung auf ein tolerables Maß reduziert wird.

Unter Berücksichtigung der relevanten europäischen Prüfverfahren und der nationalen Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] soll in dieser Arbeit zusätzlich erreicht werden, dass die relevanten Aspekte aus den zuvor genannten Prüfungen bei der Entwicklung eines geeigneten Prüfverfahrens Berücksichtigung finden, sodass das Prüfverfahren europaweit Akzeptanz erlangt und die nationalen und europäischen relevanten Brandszenarien ausreichend repräsentiert werden.

Zur Erreichung dieser Ziele, werden in dieser Arbeit CFD-Simulationen als numerisches Hilfsmittel eingesetzt. Hierdurch können auf umfangreiche experimentelle Voruntersuchungen für das zu entwickelnde Prüfverfahren verzichtet und die vergleichsweise hohen Kosten der ansonsten durchzuführenden Brandversuche eingespart werden. Um eine ausreichende Sicherheit bei der Anwendung der numerischen Simulation zu erhalten, werden die Simulationsansätze an bestehenden mittel und groß skalierten Brandversuchen für die Bestimmung geeigneter numerischer Modelle für die unterschiedlichen Prüffeuer und Prüfstandsgeometrien validiert.

Abschließend ist festzuhalten, dass mit der Einführung der Energieeinsparverordnung national oder mit ähnlichen Regularien in Europa, immer komplexere Bausätze mit einem zunehmend anspruchsvolleren Brandverhalten und steigenden Dämmstoffdicken ausgeführt werden, sodass das Risiko eines intolerablen Brandschadens im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen steigt. Durch die Entwicklung eines neuen Prüfverfahrens, soll dem erhöhten Risiko eines kritischen Brandverhaltens in Form einer unkontrollierten Brandausbreitung insbesondere von brennbaren Außenwandbekleidungs-systemen, ausreichend sicher entgegengewirkt werden.

1.3 Umsetzung

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Zielstellungen dieser Arbeit wird nachfolgend die weitere Vorgehensweise im Detail erläutert.

Im Kapitel 2 werden der Stand der Technik zu den bauordnungsrechtlichen Schutzziele, den damit in Zusammenhang stehenden Regelwerken sowie die daraus abzuleitenden Anforderungen an Außenwandbekleidungen näher erläutert. Im Weiteren werden die Möglichkeiten und Grenzen eines Löschangriffes u. a. auch bei gleichzeitigen notwendigen Rettungsmaßnahmen der Feuerwehr im Brandfall dargestellt. Ein weiterer Fokus liegt auf der zusammenfassenden Darstellung der drei wesentlich auftretenden Brandszenarien im Zusammenhang mit der Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen. Zum Abschluss des Kapitels werden die weltweit unterschiedlich eingesetzten groß skalierten Brandversuche für Außenwandbekleidungen vorgestellt. Es folgt eine Selektion der relevanten groß skalierten Brandversuche für die weitergehenden experimentellen Auswertungen und numerischen Untersuchungen. Des Weiteren werden die eingesetzten Prüffeuern im groß skalierten Brandversuch hinsichtlich der relevanten Eigenschaften sowie dem aktuellen Forschungsstand vorgestellt.

Im Kapitel 3 wird im Detail auf die Brandbeanspruchung von Außenwänden eingegangen. Auf Basis von experimentellen Untersuchungen werden die kritischen Randbedingungen für die weiterführenden Untersuchungen für einen Raumbrand mit der Brandeinwirkung über eine Bauwerksöffnung auf eine Außenwand ermittelt. Wesentliche Aspekte sind dabei u. a. die Bestimmung der maßgebenden Wärmeabgabe und der Temperaturen entlang der Flammenachse oberhalb der Brandraumöffnung im Zusammenhang mit der Brandraumgeometrie sowie der Geometrie der Öffnung infolge eines Wohnraumbrandes. Weitere Merkmale wie Branddauer, Brandlastdichte und die maßgebenden Ventilationsbedingungen werden dabei erfasst.

Im Kapitel 4 werden die Grundlagen für die darauffolgenden experimentellen und numerischen Untersuchungen vorgestellt. Darüber hinaus werden die Grenzen der Anwendbarkeit von experimentellen Untersuchungen durch die numerische Simulation mit dem verwendeten CFD-Simulationsprogramm FDS in der Version 6.6.0 erläutert.

Im Kapitel 5 werden die drei Prüffeuertypen (Kompakt-Gasbrenner, Poolfeuer und Holzkrippe) bei mittel und groß skalierten Brandversuchen experimentell und numerisch untersucht. Ziel der Untersuchungen ist die Ableitung geeigneter und valider Modellierungsansätze zur Simulation von Prüffeuern im groß skalierten Brandversuch mit Hilfe von numerischen Methoden. Zusätzlich wird eine Bewertung zur Reproduzierbarkeit der

eingesetzten Prüffeuer für die weiterführende Entwicklung eines Prüfverfahrens für Außenwandbekleidungen vorgenommen.

Das Kapitel 6 befasst sich mit der Simulation von europäischen, groß skalierten Brandversuchen, welche insbesondere die Auswirkungen von Räumbränden abdecken sollen. Die Auswahl der untersuchten Brandversuche erfolgt nach der Art des Prüffeuers und den geometrischen Randbedingungen des Prüfstands. Dabei sollen die numerischen Untersuchungen eine ausreichende Validierung der Prüffeuermodelle bei variierenden Prüfstandsgeometrien erzielen. Darüber hinaus erfolgt eine quantitative Bewertung hinsichtlich der thermischen Beanspruchung auf die Prüfwand im Zusammenhang mit den untersuchten Prüfständen aus den unterschiedlichen Prüfverfahren.

Auf Grundlage der Auswertungen aus den Kapiteln 3 bis 6 wird **in Kapitel 7** ein entsprechendes Prüffeuer hinsichtlich Leistung, Prüffeuertyp und Geometrie durch Simulationsmodelle entwickelt. Dabei soll das simulierte Prüffeuer die gemäß Kapitel 2 und 3 bestimmten kritischen Raumbrandszenarien sowie die Anforderungen aus dem nationalen Sockelbrandversuch ausreichend abdecken. Die wesentlichen Ziele für das Prüfverfahren hinsichtlich der Reproduzier- und Wiederholbarkeit sowie der Begrenzung des technischen Aufwandes zur Versuchsdurchführung werden dabei berücksichtigt.

Basierend auf dem so bestimmten Prüffeuer werden die wesentlichen Einflüsse für das zu bestimmende Prüfverfahren näher untersucht. Dabei werden die geometrischen und materialspezifischen Einflüsse der Brandkammer- und der Prüfstandgeometrie, klimatische Umgebungsbedingungen sowie die Rückstrahlungseffekte der Umfassungsgeometrie der Prüfhalle im Detail betrachtet. Des Weiteren werden maßgebende Untersuchungsebenen für die Temperaturmessungen am Prüfstand festgelegt, die dazu dienen sollen, ergänzend zu den visuellen Schädigungen, zukünftig Grenzkriterien auf Basis von Temperaturen für die Bewertung im Prüfverfahren festzulegen.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Einführung

Das komplexe bauordnungsrechtliche Konzept in Deutschland ist das wesentliche Fundament auf dem die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Brandprüfung von Außenwandbekleidungen aufgebaut werden muss. Dabei ist die Betrachtung der auftretenden Brandszenarien als Brandursache entscheidend für die Definition des Prüffeuers. Das zu erwartende Eintreten von wirksamen Löscharbeiten nach Alarmierung der Feuerwehr oder die typische Branddauer in einem Brandraum kann ein möglicher Ansatz für die notwendige Prüfdauer sein.

Die Schutzziele im Zusammenhang mit Außenwandbekleidungen und deren Oberflächen nach Musterbauordnung (MBO) [105] hinsichtlich der Gewährleistung der Rettung von Menschen und Tieren der Begrenzung der Brandausbreitung sowie der Wirksamkeit von Löscharbeiten durch die Feuerwehr definieren allgemein die notwendigen brandschutztechnischen Leistungsmerkmale einer Außenwandbekleidung für die jeweilige Gebäudegröße und Nutzung insbesondere unter Betrachtung des jeweiligen Personenrisikos.

Außenwandbekleidungen und deren Oberflächen werden bauordnungsrechtlich als sogenannter Bausatz oder als Bauart bezeichnet. Allgemein kann ein Bausatz oder eine Bauart als das Zusammenfügen einzelner Baustoffkomponenten zu einem Bauteil beschrieben werden. Gemäß Bauproduktenverordnung (BauPVO) [52] Artikel 2 ist ein Bausatz wie folgt definiert:

„Ein Bausatz ist ein Bauprodukt, das von einem einzigen Hersteller als Satz von mindestens zwei getrennten Komponenten, die zusammengefügt werden müssen, um ins Bauwerk eingefügt zu werden, in Verkehr gebracht wird.“

Der Begriff Bauart lässt sich aus den Landesbauordnungen (LBO) der jeweiligen Bundesländer bzw. aus der MBO [105] entnehmen und beschreibt diese als das Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen oder Teilen von baulichen Anlagen.

Aus den Schutzzielen und den bauordnungsrechtlichen Anforderungen an Baustoffe, an Bauarten bzw. Bauprodukte und an Bausätze lassen sich im Wesentlichen die Leistungskriterien an ein Prüfverfahren im groß skalierten Brandversuch ableiten.

Dabei gilt, dass der Wohnungsbrand aufgrund des Gefährdungsrisikos von Personen und der Eintrittshäufigkeit in Deutschland als das kritischste Brandereignis zu bewerten ist. Der „*kritische Wohnungsbrand*“ als Brandereignis ist somit die wesentliche Grundlage zur

Ermittlung der vorzusehenden Brandbeanspruchung und der Prüfungszeit für einen groß skalierten Brandversuch infolge eines Raumbrandes.

Die AGBF [121] definiert das standardisierte Schadensereignis für den „kritischen Wohnungsbrand“ dabei wie folgt:

„Als dimensionierendes Schadensereignis gilt der Brand, der regelmäßig die größten Personenschäden fordert. Dies ist der Wohnungsbrand im Obergeschoß eines mehrgeschossigen Gebäudes. Neben Feuer und Rauch in der betroffenen Nutzungseinheit kommt es zu Raucheintrag in den Treppenraum. Es sind Personen aus der betroffenen Wohnung und aus angrenzenden Wohnungen über Leitern und über den Treppenraum zu retten. Außerdem muss die Brandausbreitung verhindert und der Brand gelöscht werden. Dieses Ereignis wird als kritischer Wohnungsbrand bezeichnet.“

2.2 Brandszenarien

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

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

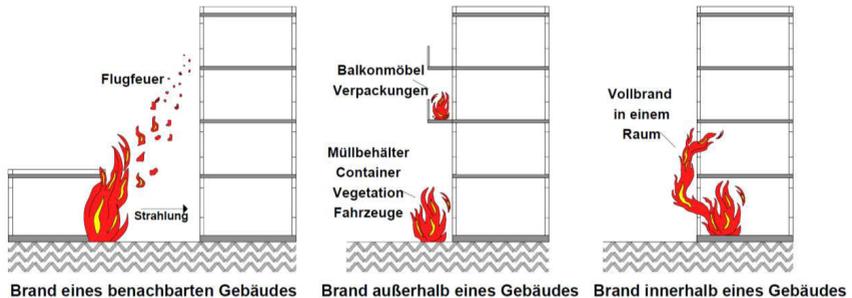


Abbildung 2-1: Mögliche Brandbeanspruchungen durch unterschiedliche Brandszenarien auf die Außenwandbekleidung

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

2.2.1 Brand in einem Gebäude

Raumbrände sind ein häufiges Brandszenario, welches jedoch nicht immer eine Brandbeanspruchung auf die Außenwand bzw. auf die Außenwandbekleidung zur Folge hat. Bei einem Raumbrand beziehungsweise einem Brand in einer Nutzungseinheit hängt die Brandentwicklung u. a. von der vorhandenen Brandlast und den Ventilationsbedingungen ab. Es muss ein ausreichendes Sauerstoffangebot vorhanden sein, damit ein kritischer Vollbrand entstehen kann. Frühzeitig eingeleitete wirksame Löscharbeiten können das Risiko der Entstehung eines Vollbrandes reduzieren. Bei einem Vollbrand können Fensterscheiben aufgrund der hohen Temperaturbeanspruchungen im Bereich der Lochfassade zerspringen und Flammen in der Folge schlagartig aus dem Gebäude austreten. Auch geöffnete Fenster oder Türen sind ein zu betrachtendes Szenario. Die Flammenhöhe hängt dabei unmittelbar von der Brandleistung aber auch von der Geometrie der Öffnung ab. Die aus der Bauwerksöffnung austretenden Flammen können in Abhängigkeit der Intensität des Brandes

im Regelfall eine Höhe bis zu ca. 4,0 m erreichen (vgl. 3.4.3). Durch die damit erreichte thermische Beanspruchung einer möglichen Öffnung im darüber liegenden Geschoss kann es zu einer geschossweisen Brandweiterleitung zwischen zwei übereinanderliegenden Nutzungseinheiten kommen. Brennbare Fensterelemente oder auch geöffnete Fenster begünstigen die Brandweiterleitung. Aber auch geschlossene Fenster können bei andauernder thermischer Beanspruchung zerbersten und eine Brandweiterleitung in das nächstgelegene Geschoss begünstigen. Des Weiteren ist die Brandausbreitung in und auf der Außenwandbekleidung durch ein sogenanntes „Lauffeuer“ über mehrere Geschosse als äußerst kritisch zu bewerten. Eine ausführliche Auswertung des Raumbrandes und deren mögliche Brandbeanspruchung auf die Außenwandbekleidung wird in Kapitel 3 vorgenommen.

2.2.2 Brand von außen, angrenzend zur Fassade

Wie unter Abschnitt 1.1 beschrieben, wurde in Deutschland seit den 2010er Jahren das Sockelbrandszenario neben dem Raumbrandszenario als weiteres kritisches Brandszenario insbesondere bei WDVS mit EPS identifiziert. Hierzu sind einschlägige Untersuchungen an brennenden Müllcontainern, welche als Brandquelle für die Brandursache dienten, durchgeführt worden, um die daraus resultierende Brandbeanspruchung in Form eines geeigneten Prüffeuers auf eine Außenwand mit einer Außenwandbekleidung zu definieren. Die Untersuchungen sind im Rahmen des Forschungsvorhabens „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“ durchgeführt worden (u. a. [94], [95], [98]).

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

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

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

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

Aufgrund der genannten Brandereignisse ist eine Brandausbreitung auf die Außenwandbekleidung oder auch in das Innere des Gebäudes möglich (vgl. Abschnitt 2.2.1). Der Sockel- oder Spritzwasserbereich (Balkone, Loggien etc.) ist aus brandschutztechnischer Sicht als konstruktive Risikostelle zu betrachten. Dies beruht z. B. bei WDVS mit EPS auf der Tatsache, dass in diesem Bereich auf Grund des Spritzwassers ein Materialwechsel auf Extrudiertes Polystyrol (XPS) notwendig ist. Dieser Materialwechsel kann aufgrund der ungünstigeren brandschutztechnischen Eigenschaften von XPS gegenüber z. B. EPS und den ggf. erforderlichen notwendigen Übergangsprofilen aus PVC das Brandverhalten des Gesamtsystems ungünstig beeinflussen.

Ein außenliegender Brand ist grundsätzlich ein brandlastgesteuerter Brand, da eine ausreichende Sauerstoffzufuhr gewährleistet ist. Somit hängt die Intensität im Wesentlichen von der Brandlast (u. a. Heizwerte, Zündtemperatur etc.) und den wirksamen Brandflächen der Brandquelle ab. Bauordnungsrechtliche Anforderungen hinsichtlich der Aufstellung oder Vermeidung der genannten Brandquellen sind bisher nicht berücksichtigt und bezüglich der organisatorischen Umsetzung nicht immer realisierbar. Für die Aufstellung von Müllcontainern und Ablagerungen von Sperrmüll oder Bauabfällen gibt es unterschiedliche Hinweisblätter mit Empfehlungen zu einzuhaltenen Abständen oder Einhausungen zur Vermeidung dieser Brandgefahr im Bereich von Außenwänden ([55], [26], [128]). Für das Brandszenario von außen in höher gelegen Geschossen, wie z. B. auf Balkonen oder Loggien, ist bei schwerentflammenden Außenwandbekleidungen die mittel skalierte Brandprüfung gemäß DIN 4102-20 [32] für den Raumbrand maßgebend.

2.2.3 Brand in einem Nachbargebäude

In Deutschland sind aufgrund der bauordnungsrechtlichen Anforderungen Mindestabstände zwischen angrenzenden Gebäuden oder zu Grundstücksgrenzen einzuhalten oder alternativ Gebäude durch Gebäudeabschlusswände (Brandwände beziehungsweise Brandersatzwände) vor einem Brandüberschlag zu schützen (vgl. MBO [105]). Wenn der Abstand zwischen benachbarten Gebäuden bzw. der Grundstücksgrenze entsprechend den bauaufsichtlichen Anforderungen ausgebildet ist, wird das Risiko eines Brandüberschlages von einem brennenden Gebäude oder Teilen davon über eine direkte Flammeneinwirkung auf die benachbarte Fassade erheblich reduziert. Die maßgebende thermische Beanspruchung resultiert bei diesem Brandszenario dann in der Regel aus der Wärmestrahlung des brennenden Gebäudes auf das Nachbargebäude. Die Intensität der auftretenden Wärmestrahlung ist wiederum abhängig vom Entwicklungsstadium des Brandes, der Größe der strahlenden Fläche, dem Abstand des Nachbargebäudes sowie der Anordnung der Gebäude untereinander. Durch ungünstige Windverhältnisse kann auch Flugfeuer eine zusätzliche Brandbeanspruchung darstellen. Wirksame Schutzmaßnahmen,

ergänzend zu den vorbeugenden baulichen Maßnahmen und den Löscharbeiten am Primärbrand, können dann ausschließlich durch die Feuerwehr mittels Abkühlen durch Löschwasser an der thermisch beanspruchten Fassade des angrenzenden Gebäudes eingeleitet werden. Die Notwendigkeit solcher Maßnahmen ist grundsätzlich als ungünstig anzusehen, da Einsatzkräfte unabhängig vom Primärbrand während eines Löscheinsatzes gebunden werden.

Die Berücksichtigung von Gebäudeabständen in einem Prüfverfahren für Außenwandbekleidungen weist sich grundsätzlich als schwierig auf, da hierbei zu dem geprüften Wandaufbau zusätzlich der Einfluss einer Nachbarbebauung berücksichtigt werden müsste. Dies würde bei einer Brandprüfung durch Ausbildung zusätzlicher Gebäudenachbildungen zu einem erhöhten technischen Aufwand führen, der aufgrund der bisher registrierten Brandereignisse in Deutschland [57] in diesem Zusammenhang nicht gerechtfertigt wäre. In der thematischen Auseinandersetzung von Kunze [82] zum Thema „Herleitung des Gebäudeabstandes unter dem Aspekt der Brandausbreitung“ wird deutlich, dass im konventionellen Wohnungsbau der notwendige Mindestabstand zur Ausführung ohne notwendige Brandschutzmaßnahmen im Bereich der Außenwände bei einem Abstand der Gebäude von ≥ 5 m als ausreichend sicher angesehen werden kann. Insbesondere das frühzeitige Einsetzen von wirksamen Löscharbeiten begünstigt den Ansatz.

Besondere Brandszenarien, wie z. B. Brände in Ladenstraßen von Verkaufsstätten mit hohen Brandlasten und großen Fensteröffnungen können zu einer kritischen Brandübertragung führen, denen jedoch bauordnungsrechtlich durch die erhöhten Anforderungen gemäß Muster-Verkaufsstättenverordnung [106] Rechnung getragen wird.

2.3 Baurechtliche Anforderungen

2.3.1 Anforderungen gemäß MBO [105] sowie Sonderbauvorschriften

In Deutschland werden die bauordnungsrechtlichen Anforderungen an Oberflächen von Außenwänden und an Außenwandbekleidungen in den jeweiligen Landesbauordnungen bzw. den eingeführten Sonderbauvorschriften geregelt. Grundlage für die in der Gesetzgebungskompetenz der Länder liegenden Landesbauordnungen und Sonderbauverordnungen bzw. Sonderbau Richtlinien stellen die durch die Bauministerkonferenz (ARGEBAU) erarbeitete MBO [105] sowie die ergänzenden Mustersonderbauverordnungen bzw. Mustersonderbau Richtlinien dar. Daraus resultieren in den einzelnen Bundesländern bundesweit weitestgehend einheitliche Vorschriften für die Anforderungen an Oberflächen von Außenwänden und Außenwandbekleidungen. Aus den Bauordnungen, Verordnungen und Richtlinien lassen sich die bauordnungsrechtlichen Anforderungen an Außenwandbekleidungen ableiten. Auf Grundlage des Brandrisikos werden in Abhängigkeit der Größe und der Nutzung des Gebäudes in der MBO [105] sowie den einzelnen Mustersonderbauverordnungen bzw. Mustersonderbau Richtlinien unterschiedliche Brandschutzanforderungen gestellt. In der MBO [105] sind die Anforderungen für Wohngebäude bzw. Büro- und Verwaltungsgebäude festgelegt. Dabei spielt die Gebäudeklasse (GKL) die wesentliche Rolle zur Feststellung der notwendigen Anforderungen. Die GKL hängt gemäß MBO [105] zum einen von der Höhe des höchstgelegenen Aufenthaltsraumes in Bezug auf die Geländeoberfläche bzw. in Bezug auf die Lage der für die Rettungsgeräte der Feuerwehr notwendigen Aufstellflächen und zum anderen von der Größe und Anzahl der Nutzungseinheiten ab.

Die allgemeinen Schutzziele für den Brandschutz von Gebäuden werden im § 14 MBO [105] definiert:

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“

Aus dem allgemeinen Schutzziele wird deutlich, dass neben der Begrenzung der Ausbreitung von Feuer und Rauch sowie der Rettung von Menschen und Tieren auch die Wirksamkeit von Löscharbeiten ein wesentlicher Aspekt für den ganzheitlich zu betrachtenden Brandschutz ist. Im § 28 (1) MBO [105] werden die genannten Schutzziele für Außenwandbekleidungen und deren Oberflächen konkretisiert, wonach es heißt:

„Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen sind so auszubilden, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist.“

Somit müssen für die Einhaltung der allgemein gehaltenen Schutzziele auch die Außenwandbekleidungen und deren Oberflächen der Außenwände so beschaffen sein, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist und somit wirksame Löscharbeiten und vor allem die Rettung von Personen möglich sind.

Gemäß MVV TB [107] Abschnitt 2.1.5 wird ergänzend gefordert, dass nach Ende der Brandeinwirkung und der Löscharbeiten ein fortschreitendes Glimmen und/oder Schwelen nicht mehr stattfinden darf.

Auf Grundlage der Schutzziele lassen sich hinsichtlich der Größenordnung der zulässigen Brandausbreitung keine unmittelbaren Kenngrößen ableiten.

In Bezug auf § 31 (4) Punkt 2 MBO [105] sind Nutzungseinheiten bis 400 m² über maximal zwei Geschosse zulässig, sofern in jedem Geschoss ein unabhängiger baulicher Rettungsweg erreicht werden kann. Somit wird aus bauordnungsrechtlicher Sicht die Brandausbreitung innerhalb einer Nutzungseinheit über zwei Geschosse toleriert, ohne dass die Schutzziele gemäß § 14 und § 28 MBO [105] grundsätzlich in Frage gestellt werden.

Im Weiteren ist die Brandausbreitung über eine Bauwerksöffnung im Bereich einer Lochfassade zu betrachten. Die Abbildung 2-2 zeigt die schematisch mögliche vertikale Brandausbreitung über die Geschosse.

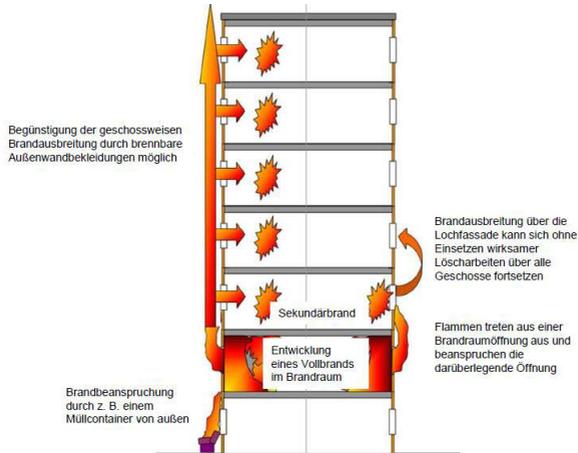


Abbildung 2-2: Darstellung der Brandausbreitungsmechanismen an einem mehrgeschossigen Gebäude über eine Lochfassade gemäß BRE 135 3rd Edition [22]

Dazu haben Untersuchungen gezeigt, dass eine vertikale Brandausbreitung über zwei Geschosse zwischen zwei Räumen bzw. zwischen zwei unterschiedlichen Nutzungseinheiten unabhängig von der Brennbarkeit der Außenwandbekleidungen im

ungünstigsten Fall innerhalb von wenigen Minuten nach Eintritt des Vollbrandes stattfinden kann [136]. In Abhängigkeit von der Brandentwicklung des Sekundärbrandes kann sich die beschriebene Brandausbreitung über die Geschosse kontinuierlich fortsetzen, sodass eine Brandausbreitung über mehr als zwei Geschosse in weniger als 20 Minuten nach Brandentstehung im Primärgeschoss erreicht werden kann. Dieser „Worst-Case“ ist grundsätzlich nicht der Regelfall, da eine Vielzahl an ungünstig wirkenden Einflussfaktoren, wie z. B. übereinanderliegende, offenstehende Fenster in jedem Geschoss zum Brandverlauf beitragen müssen. Brandversuche zum Versagenszeitpunkt energieeffizienter Fenster (teilweises oder vollständiges zerbersten der Fensterscheiben) haben gezeigt, dass ein deutlich längerer Raumabschluss gegenüber Fenstern mit Einscheibenverglasung erzielt werden kann ([9], [68], [81]). Dadurch wird die geschossweise Brandausbreitung im günstigsten Fall verlangsamt oder sogar vollständig unterbunden. Die Strahlungswirkung einer möglichen Flamme durch ein geschlossenes Fenster bleibt davon unberührt.

Auf Grundlage der bauordnungsrechtlichen Akzeptanz der Brandausbreitung innerhalb einer zweigeschossigen Nutzungseinheit, sowie der Akzeptanz einer Lochfassade und der daraus resultierenden Möglichkeit eines Feuerübersprungs in eine oder mehrere Geschosse oberhalb des Brandgeschosses vor dem Einsetzen wirksamer Löscharbeiten, lassen sich die Schutzziele der MBO [105] im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen nach Auffassung des Verfassers sowie auf Grundlage der Feststellungen aus den Abstimmungen mit den Feuerwehren ([88], [90]) wie folgt konkretisieren:

Die Brandausbreitung auf und in brennbaren Außenwandbekleidungen sowie die Brandweiterleitung ist bis zum Einsetzen wirksamer Löscharbeiten auf maximal zwei Geschosse zu begrenzen. Unter Berücksichtigung der Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehren ist dieser Zeitraum in der Regel mit 20 Minuten nach Brandentdeckung anzusetzen, um bauordnungsrechtlich eine ausreichende Sicherheit zu gewährleisten.

Auf Grundlage der beschriebenen Schutzziele können konkrete Leistungskriterien an Außenwandbekleidungen aus einem groß skalierten Brandversuch abgeleitet werden.

Zu den allgemeinen Schutzzielen werden in der MBO [105] ergänzend die Anforderungen an die Baustoffe von Oberflächen der Außenwände und Außenwandbekleidungen für die GKL 4 und 5 definiert. Diese Anforderungen lassen sich prinzipiell als zweite Anforderungssäule betrachten. Es werden somit Anforderungen an den Bausatz bzw. die Bauart und an das einzelne Bauprodukt bzw. den Baustoff gestellt. Die Anforderungen sind gemäß § 28 (3) MBO [105] wie folgt definiert:

„Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein; Unterkonstruktionen aus

normalentflammbaren Baustoffen sind zulässig, wenn die Anforderungen nach Absatz 1 erfüllt sind. Baustoffe, die schwerentflammbar sein müssen, in Bauteilen nach Satz 1 Halbsatz 1 und Satz 2 dürfen nicht brennend abfallen oder abtropfen.“

Somit sind gemäß § 28 (3) MBO [105] für Gebäude der GKL 4 und 5 mindestens schwerentflammbare Außenwandbekleidungen zulässig. Zusätzlich werden Anforderungen an den verwendeten Baustoff an sich gestellt, sodass insbesondere Dämmstoffe unabhängig von der Klassifizierung des Bausatzes in schwerentflammbar ebenfalls mindestens schwerentflammbar sein müssen. Des Weiteren dürfen die einzelnen Komponenten des Bausatzes nicht brennend abfallen oder abtropfen, wodurch ein Sekundärbrand im Sockelbereich des Gebäudes ausgeschlossen werden soll. Außerdem wird dadurch eine Gefährdung von Rettungswegen aufgrund von abtropfender, brennender Schmelze oder herabfallenden brennenden Bauteilen vermieden und der Einsatz der Feuerwehr nicht zusätzlich gefährdet. Eine gesonderte Anforderung an die Standsicherheit im Brandfall wird nicht getroffen, sodass grundsätzlich das Versagen von einzelnen Bauteilen der Außenwandbekleidung nicht einschränkt wird. Dies ist insbesondere aus einsatztaktischer Sicht der Feuerwehr bei Rettungsmaßnahmen und bei wirksamen Löscharbeiten zu berücksichtigen.

Beide genannten Anforderungen gelten nicht für Gebäude der Gebäudeklasse 1 bis 3, in denen normalentflammbare Außenwandbekleidungen zulässig sind. Somit werden bei diesen Gebäudeklassen auch keine Einschränkungen hinsichtlich des brennenden Herabfallens oder Abtropfens einzelner Baustoffe gestellt.

Weitere Anforderungen an Oberflächen von Außenwänden und der Außenwandbekleidungen werden im Bereich von Brand- und Brandersatzwänden sowie von Gebäudeabschlusswänden gemäß § 30 (7) MBO [105] gestellt.

Zusätzliche Anforderungen zur MBO [105] ergeben sich aus den Sonderbauvorschriften. Eine zusammenfassende Übersicht zu den wesentlichen Gebäudenutzungen und deren Anforderungen an Außenwandbekleidungen sind in der Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Anforderungen an Außenwandbekleidungen gemäß MBO [105] und ergänzenden Muster- Richtlinien und Verordnungen

Richtlinie/Verordnung	Gebäudeart	Anforderungen an Außenwandbekleidungen
Musterbauordnung	GKL 1 bis 3	normalentflammbar
	GKL 4 bis 5	schwerentflammbar*
Muster-Schulbaurichtlinie	Schulen	wie GKL1-GKL5 nach MBO [105]
Muster-Beherbergungsstättenverordnung	Beherbergungsstätten	wie GKL1-GKL5 nach MBO [105]
Muster-Hochhaus-Richtlinie	Hochhäuser	nichtbrennbar
Muster-Industriebaurichtlinie	Industriebauten	schwerentflammbar
Muster-Verkaufsstättenverordnung	Verkaufsstätten (ohne Sprinkleranlage)	nichtbrennbar
	Verkaufsstätten (mit Sprinkleranlage)	schwerentflammbar
	Verkaufsstätten (erdgeschossig)	schwerentflammbar
Muster-Versammlungsstättenverordnung	Versammlungsstätten	nichtbrennbare Dämmstoffe mehrgeschossig: Nichtbrennbare Außenwände
Krankenhaus- und Pflegeheimverordnung**	Krankenhäuser und Pflegeheime	nichtbrennbare Dämmstoffe mehrgeschossig: Nichtbrennbare Außenwände

* Konkretisierung der Anforderungen gemäß diesem Abschnitt

** Am Beispiel der Verordnung über bauaufsichtliche Anforderungen an Krankenhäuser und Pflegeheime im Land Brandenburg

Im Zuge der Betrachtung der einzelnen Sonderbauverordnungen bzw. Sonderbau Richtlinien wird deutlich, dass in einigen Vorschriften dem erhöhten Personenrisiko bei den Anforderungen an die Außenwandbekleidungen Rechnung getragen wird. Hinzu kommen weitere Anforderungen gegenüber der MBO [105] im Bereich des baulichen, anlagentechnischen und betrieblichen Brandschutzes, die hier aufgrund der Komplexität nicht dargestellt werden.

2.3.2 Klassifizierungen von Bauprodukten und Bauarten

Das Brandverhalten der einzelnen Baustoffe bzw. Bauprodukte von Außenwandbekleidungen wird auf Grundlage der europäischen Norm DIN EN 13501-1 [35] oder der deutschen Norm DIN 4102-1 [31] geprüft. Die europäische Norm DIN EN 13501-1 „Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten“ [35] beschreibt die Klassifizierung des Bauprodukts oder der Bauart und die dazugehörigen anzuwendenden Prüfverfahren. Daraus resultieren auf europäischer Ebene einheitliche Prüfungen zur Klassifizierung von europäisch harmonisierten Bauprodukten und Bauarten. In der MVV TB Anhang 4 [107] ist die Zuordnung der europäischen Klassifizierungen zu den bauaufsichtlichen Anforderungen erläutert.

Sofern Bauprodukte und Bauarten nicht europäisch harmonisiert sind, besteht weiterhin die Möglichkeit, diese nach den nationalen Prüfverfahren zu prüfen und bauordnungsrechtlich über einen nationalen Verwendbarkeitsnachweis zu regeln.

In der MVV TB [107] sind die europäischen Klassifizierungen und deren Leistungsanforderungen und Parameter für Bauprodukte und Bauarten gegenübergestellt sowie in Tabelle 2-2 zusammenfassend dargestellt. Es wird deutlich, dass für schwerentflammbare Bauprodukte und Bauarten maximal ein begrenzter Beitrag und für nichtbrennbare Bauprodukte und Bauarten kein Beitrag zum Brand zulässig ist.

Tabelle 2-2: Leistungsanforderungen und Parameter hinsichtlich des Brandverhaltens an die einzelnen Euroklassen

Euroklasse	Leistungsanforderungen und Parameter
A	kein Beitrag zum Brand
B	sehr begrenzter Beitrag zum Brand
C	begrenzter Beitrag zum Brand
D	hinnehmbarer Beitrag zum Brand
E	hinnehmbares Brandverhalten
F	keine Leistung festgestellt

Zusätzlich zur Euroklasse werden auf europäischer Ebene gemäß DIN EN 13501-1 [35] die sogenannten Brandparallelererscheinungen berücksichtigt. Hierbei werden jeweils 3 Klassen für die Rauchentwicklung (smoke: s1, s2, s3) und das brennende Abtropfen/Abfallen (droplets: d0, d1, d2) von Baustoffen definiert. Dabei bedeuten die aufsteigenden Ziffern

jeweils eine Verschlechterung der brandtechnischen Eigenschaften. Die Brandparallelererscheinungen werden bei den Bezeichnungen gemäß DIN 4102-1 [31] nicht ausgewiesen, jedoch in den Prüfverfahren berücksichtigt.

Die Prüfungen für Bauprodukte bzw. Baustoffe erfolgen in der Regel ausschließlich in Laborversuchen im skalierten Maßstab mit sogenannten klein skalierten Brandversuchen. Die Tabelle 2-3 stellt die nationalen und europäischen Prüfungen für die einzelnen Klassen gegenüber.

Bauarten bzw. Bausätze können zusätzlich unter der Zusammenführung der einzelnen Bauprodukte bzw. Baustoffe geprüft werden. Die Prüfungen werden beispielsweise für eine europäische Klassifizierung im „Single Burning Items“ Test oder für eine nationale Klassifizierung im Brandschacht umgesetzt. Für Außenwandbekleidungen sind diese klein skalierten Brandversuche nicht ausreichend, da die Brandbeanspruchung und der begrenzte Prüfaufbau wesentlich von einer realen Einbausituation und einer kritischen Naturbrandbeanspruchung abweichen. Des Weiteren lässt sich beim SBI durch den skalierten Prüfaufbau mit einer maximalen möglichen Aufbaudicke des Prüfkörpers von 20 cm und insbesondere durch die Höhe von maximal 1,5 m das wesentliche Schutzziel bei Außenwandbekleidungen zur Vermeidung einer Brandausbreitung über zwei Brandgeschosse nicht beobachten.

Tabelle 2-3: Bauordnungsrechtliche Benennung von Baustoffen bzw. Bauprodukten und deren Zuweisung zu nationalen und europäischen Prüfverfahren

Bezeichnung in der Bauordnung	Bisherige deutsche Klassifizierung gemäß DIN 4102 und Prüfverfahren		Europäische Klassifizierung gemäß DIN EN 13501-1 und Prüfverfahren	
nichtbrennbar	A1	Ofenprüfung Heizwertprüfung Rauchentwicklung (Brandschacht für Glimmverhalten)	A1	Ofenprüfung und Heizwert
	A2	Ofenprüfung Heizwertprüfung Rauchentwicklung und Brandschacht	A2 s1 d0	Ofenprüfung oder Heizwert und SBI
schwerentflammbar	B1	Brandschacht und Kleinbrenner	B bis D	SBI und Kleinbrenner
normalentflammbar	B2	Kleinbrenner		
leichtentflammbar	B3	keine Prüfung erforderlich	F	keine Prüfung erforderlich

Eine interessante Problematik zwischen der nationalen und europäischen Klassifizierung zeigt die Tabelle 2-4 auf. Während sich entsprechend den nationalen Baustoffprüfungen

EPS und PUR/PIR in schwerentflammbar einstufen lassen, erreichen diese Dämmstoffe nach europäischer Klassifizierung lediglich die Anforderung normalentflammbar. Sofern WDVS europäisch harmonisiert werden, kann dies zukünftig zu einer Problematik durch die Einzelanforderung an den Dämmstoff bei GKL 4 und 5 gemäß MBO [105] bzw. gemäß den Landesbauordnungen führen. Mit Einführung einer europäischen harmonisierten Norm für WDVS wird die nationale abZ mit einer Übergangsfrist keine Relevanz mehr haben. Bei gültigen europäischen Anwendungsdokumenten dürfen nationale Baustoffprüfungen für europäisch harmonisierte Bauprodukte nicht mehr angesetzt werden, sodass formal z. B. WDVS mit EPS mit der Anforderung schwerentflammbar aufgrund der Klassifizierung des Dämmstoffes gemäß DIN EN 13501-1 [35] zukünftig nicht mehr verwendet werden dürften.

Tabelle 2-4: Nationale und europäische Klassifizierung von typisch eingesetzten Dämmstoffen in WDVS und deren mögliche Einstufung als Bauart bzw. Bausatz

Verwendeter Dämmstoff im WDVS	Baustoffklasse des Dämmstoffs (DIN 4102-1 [31])	Klasse des Dämmstoffs (DIN EN 13501-1 [35])	Einstufung des Brandverhaltens des WDVS nach MBO als Bausatz
Mineralwolle nach EN 13162	-	A1	nichtbrennbar
Mineralschaum nach Verwendbarkeitsnachweis	-	A1	
expandierter Polystyrolschaum* nach EN 13163	B1	E	schwerentflammbar
Polyurethan** nach EN 13165	B2	E	
Phenolhartschaum nach EN 13166	B2	B-s1, d0	
Holzweichfaser nach EN 13171	B2	E	normalentflammbar
Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	B2	E	

*) Schwerentflammbar mit zulassungsgemäßen Brandschutzmaßnahmen

***) Schwerentflammbar im geprüften Bausatz in Abhängigkeit der verwendeten Putzarten und ggf. der Dicke (zulassungsabhängig)

Außenwandbekleidungen mit der Anforderung schwerentflammbar müssen national, ergänzend zu den einzelnen Baustoffprüfungen, zusätzlich im mittel skalierten Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] als zusammengefügtter Bausatz geprüft werden. Sofern ein WDVS mit EPS von den technischen Vorschriften aus der MVV TB Anhang 11 [107] für schwerentflammbare Systeme abweicht, ist ergänzend sogar eine zusätzliche Prüfung im sogenannten „Sockelbrandversuch“ gemäß MVV TB [107] durchzuführen.

2.3.3 Nachweis der Verwendbarkeit in Deutschland

In Deutschland kommen als Außenwandbekleidungs-systeme unterschiedliche Bauarten bzw. Bausätze zur Verwendung. Häufig verwendete Systeme sind u. a. vorgehängte hinterlüftete Fassaden (VHF) und insbesondere WDVS.

VHF sind grundsätzlich in der MVV TB [107] geregelt. Sofern von diesen technischen Vorschriften durch Verwendung von z. B. brennbaren Dämmstoffen wesentlich abgewichen wird und eine schwerentflammbare Klassifizierung erzielt werden soll, ist eine Brandprüfung gemäß DIN 4102-20 [32] durchzuführen sowie eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) zu beantragen.

Nachfolgend wird das komplexe bauordnungsrechtliche Nachweiskonzept von Außenwandbekleidungen am Beispiel von WDVS dargestellt.

Ein WDVS stellt im bauaufsichtlichen Sinne gemäß MBO [105] eine nicht geregelte Bauart dar. Eine Bauart setzt sich demnach aus mehreren Bauprodukten zusammen. Nach aktuellem Stand sind WDVS nicht durch eine europäische harmonisierte Norm geregelt und können somit nach wie vor national klassifiziert werden.

Nach jetzigem Stand (Dezember 2018) sind für WDVS als Verwendbarkeitsnachweise eine Europäische Technische Bewertung (ETA) mit zusätzlichem nationalem Anwendungsdokument, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) bzw. eine allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) oder eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) zulässig.

Zur Erlangung einer abZ/aBG oder einer ETA für ein WDVS ist die Berücksichtigung der Zulassungsleitlinie ETAG 004 [50] notwendig. Die Anwendung in Deutschland ist aufgrund der Anforderungen auf Bauwerksebene nach der Zulassungsleitlinie ETAG 004 nur unter zusätzlicher Beachtung der Anwendungsregelungen gemäß MVV TB [107] möglich. Es werden neben den Anforderungen an die Standsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit, den Wärmeschutz und den Schallschutz auch Anforderungen an den Brandschutz gestellt.

Für das im Bausatz zu prüfende schwerentflammbare WDVS steht gemäß ETAG 004 lediglich der Single Burning Item Prüfung (SBI-Prüfung) zur Verfügung. In der ETAG 004 wird darauf hingewiesen, dass zusätzliche Anforderungen auf nationaler Ebene in den einzelnen Nationalstaaten, insbesondere bezüglich der Notwendigkeit der Prüfung des WDVS im groß skalierten Brandversuch, gestellt werden können. Da eine einheitliche Prüfnorm für groß skalierte Brandversuche von Fassaden innerhalb Europas momentan noch in Abstimmung ist ([18], [126]), werden groß skalierte Brandversuche weiterhin auf nationaler Ebene geregelt. In den nachfolgenden Abschnitten werden die nationalen anzuwendenden Prüfverfahren für schwerentflammbare WDVS genauer vorgestellt.

2.3.3.1 Mittel skaliertes Brandversuch zur Prüfung von Außenwandbekleidungen - Brand von innen gemäß DIN 4102-20 [32]

Zur Erlangung einer abZ/aBG oder ETA mit zusätzlichem nationalem Anwendungsdokument für schwerentflammbare nicht geregelter Außenwandbekleidungen ist die Durchführung eines mittel skalierten Brandversuches gemäß DIN 4102-20 [32] notwendig. Dieser Brandversuch wird von Materialprüfanstalten durchgeführt und über einen Prüfbericht dokumentiert. Der Prüfansatz ist Bestandteil der Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) und prüft modellhaft (skaliert) die Beanspruchung der Außenwandbekleidung durch Flammen, die aus einer Wandöffnung schlagen bzw. austreten. Eine rückseitige Brandbeanspruchung („Durchbrennen“ der raumabschließenden Wand) wird ausgeschlossen.

Versuchsbedingungen

Die Außenwandbekleidungen werden an einer Prüfwand angebracht und durch einen Propangasbrenner (7,4 g/s; mittlere Wärmefreisetzung während der Vollbrandphase von ca. 0,34 MW) oder durch eine ca. 30 kg Holzkippe (mittlere Wärmefreisetzung während der Vollbrandphase von ca. 0,40 bis 0,45 MW) als Prüffeuer über eine Brandraumöffnung beflammt. Die Beanspruchungszeit für die Prüfung von schwerentflammbaren Außenwandbekleidungen beträgt 20 Minuten. Die zusätzliche Beobachtungszeit beträgt mindestens 40 Minuten nach Abschalten des Brenners bzw. nach Löschen der Holzkippen.

Die Prüfwand hat eine abgewinkelte Breite von mindestens 4,0 m (Rückwand 2,5 m und Eckwand 1,5 m) bei einer Höhe von mindestens 5,5 m. In der Rückwand des Versuchsstandes befindet sich im Eckbereich eine zurückgesetzte Brandkammer mit einer Breite und Höhe von 1 m und einer Länge bzw. Tiefe von 0,8 m. In der Brandkammer wird entweder der Gasbrenner oder die Holzkippe platziert. Der Prüfstand gemäß DIN 4102-20 [32] ist in Abbildung 2-3 mit einem beispielhaften Prüfaufbau mit WDVS dargestellt.

Die Prüfungen sind in einer Versuchshalle witterungsunabhängig durchzuführen. Dabei muss die Versuchshalle eine hinreichende Größe aufweisen, sodass die Geometrie dieser keinen Einfluss auf die Prüfung hat. Es müssen ausreichend dimensionierte Zu- und Abluftöffnungen zur Gewährleistung natürlicher Lüftungsbedingungen vorgesehen werden oder eine maschinell betriebene Abluft, welche die Strömungsgeschwindigkeiten vor dem Prüfstand nicht negativ beeinflusst. Zudem ist sicherzustellen, dass vor Prüfbeginn im Mittel eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s (kurzzeitig maximal 1 m/s) mittig in 1 m Höhe über der Brandkammeröffnung und in 100 mm Abstand zur Fassade nicht überschritten wird.

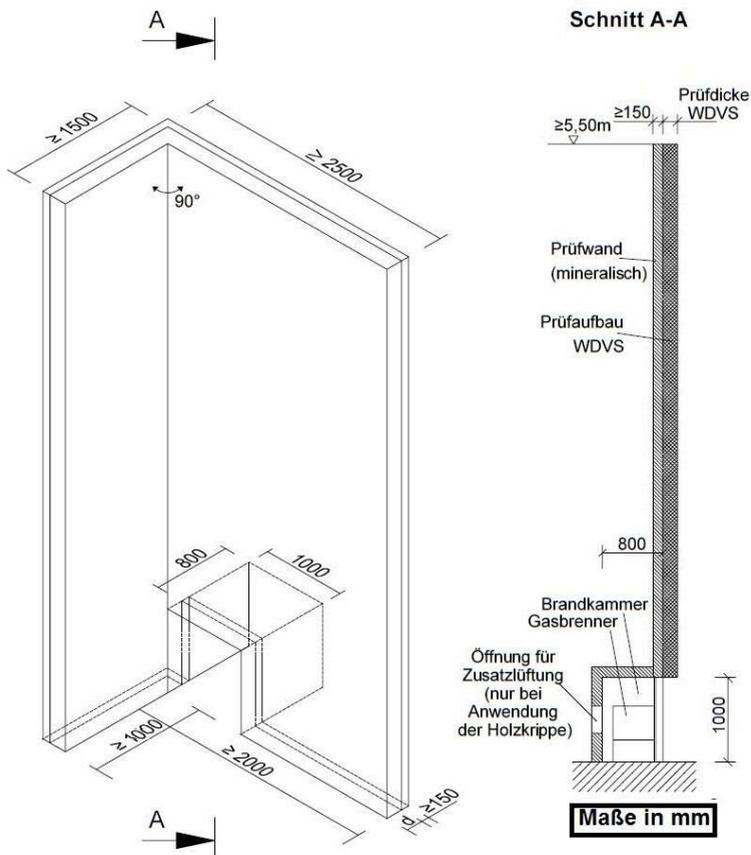


Abbildung 2-3: Beispielhafter Prüfaufbau für ein WDVS im Prüfverfahren gemäß DIN 4102-20 [32]

2.3.3.2 Groß skaliertes Brandversuch zur Prüfung von schwerentflammbaren WDVS mit EPS - Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107]

Sofern bei der Ausführung von den technischen Regeln gemäß MVV TB [105] Anhang 11 für WDVS mit EPS und der Anforderung schwerentflammbar abgewichen wird, ist zusätzlich eine Brandprüfung im Sockelbrandversuch notwendig. Die Sockelbrandprüfung deckt modellhaft im Vollbrand befindliche Brandquellen vor der Fassade wie kleinere Lagerungen bei Umzügen, Müllbereitstellungen in üblichen Größenordnungen, mehrere Mülltonnen oder maximal ein Müllsammelcontainer, kleinere Sperrmüllbereitstellungen sowie maximal ein einzelnes Kleinkraftfahrzeug ab.

Versuchsbedingungen

Die Prüfwand hat eine abgewinkelte Breite von ca. 6,0 m (Rückwand 4,0 m und Eckwand 2,0 m) bei einer Höhe von min. 9,8 m. Der Prüfstand repräsentiert einen Spritzwasserbereich mit einer Höhe von ca. 1,0 m und drei Vollgeschosse von jeweils ca. 3 m Höhe (vgl. Abbildung 2-4). Die Prüfzeit beträgt mindestens 25 Minuten (eine direkte Brandbeaufschlagung des WDVS ≥ 20 Minuten ist einzuhalten). Nach Ablauf der Prüfzeit ist die Holzkrippe so abzulöschen, dass der Prüfkörper nicht beeinträchtigt wird. Daran schließt sich eine Beobachtungszeit an, die frühestens 60 Minuten nach Versuchsbeginn beendet werden darf.

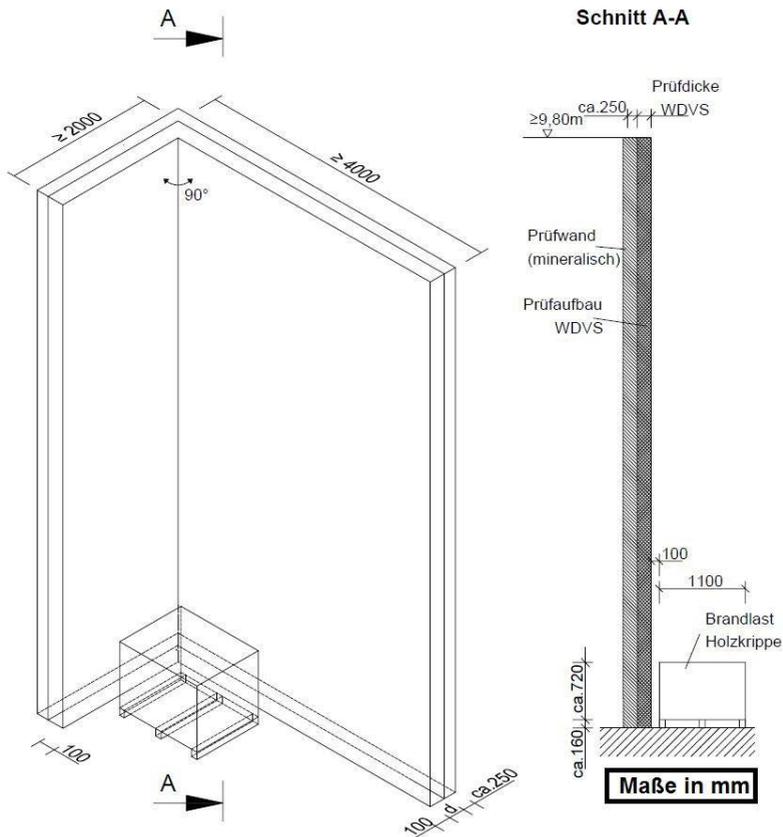


Abbildung 2-4: Beispielhafter Prüfaufbau für ein WDVS im Prüfverfahren im Sockelbrandversuch nach MVV-TB [107]

Die Außenwandbekleidungen werden im Brandversuch analog zum realen Einbauzustand an die Prüfwand appliziert. Die Brandbeanspruchung erfolgt durch eine ca. 200 kg Holzkrippe aus Fichtenholz mit einer Grundfläche von ca. 1,1 m x 1,1 m und einer Höhe von ca. 0,72 m. Die Holzkrippe wird durch eingeschobene mit Isopropanol gefüllte Stahlblechwannen entzündet. Die maximale Wärmefreisetzungsrate nach Entzündung der Holzkrippe beträgt ca. 3,0 bis 3,5 MW. Die durchschnittliche Wärmefreisetzungsrate während der Vollbrandphase beträgt ca. 2,0 bis 2,5 MW.

Auch hier muss der Prüfstand in einer ausreichend witterungsgeschützten Versuchshalle positioniert sein. Der Versuch soll unter freiventiliierten Lüftungsbedingungen erfolgen. Eine Beeinflussung des Versuchsablaufes durch Luftströmungen (Wind oder maschinelle Entrauchung) ist zu vermeiden bzw. auf ein vertretbares Minimum zu reduzieren. Dies gilt als eingehalten, wenn unmittelbar vor Versuchsbeginn im Mittel eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s – kurzzeitig maximal 1 m/s – mittig in 1 m Höhe über der Oberkante der Holzkrippe und in 100 mm Abstand zur Oberfläche des WDVS nicht überschritten wird.

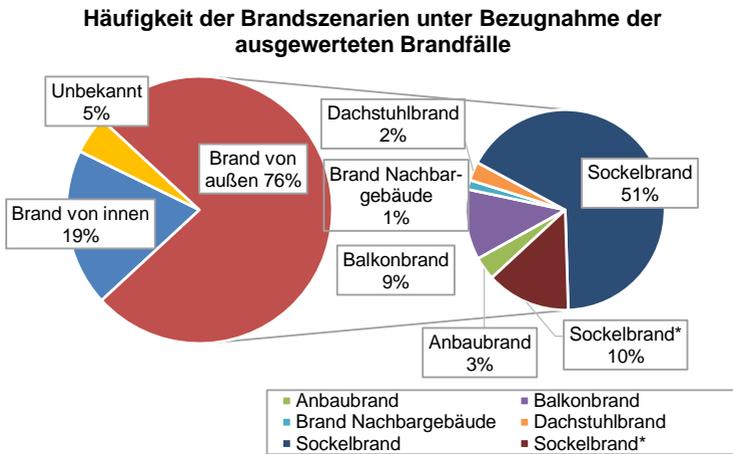
2.3.4 Auswertung von Brandschadenereignissen

Ausführliche Brandschadenstatistiken in Deutschland befinden sich momentan in der Entwicklung ([56], [130]). Ob mit Hilfe dieser dann auch das Brandrisiko von brennbaren Außenwandbekleidungen bewertet werden kann, ist aus den ersten Veröffentlichungen nicht erkennbar.

Die Feuerwehr Frankfurt am Main hat, in Folge von kritischen Brandereignissen im Jahr 2012, damit begonnen zentral bundesweite Brandschadenereignisse im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen zu sammeln und online zur Verfügung zu stellen [57]. Die insgesamt 107 gesammelten Brandfälle aus den Jahren 2001 bis 2018 repräsentieren keine vollumfängliche Brandschadensstatik, da die Sammlung auf freiwilliger Basis der bundesweiten Feuerwehren beruht und zu einigen Jahren (insbesondere vor 2012) nur sehr wenige oder keine Brandfälle gelistet sind. Das verfolgte Ziel der Brandereignisliste ist es, grundsätzlich mögliche kritische Brandverläufe mit brennbaren Außenwandbekleidungen zu erfassen und daraus ggf. erhöhte Risiken zu identifizieren.

Auf Basis der benannten Gründe wird nachfolgend eine qualitative Auswertung der Brandfälle vorgenommen, um eine Aussage zum Ort der Brandentstehung und der Überschreitung der allgemeinen definierten Schutzziele für Außenwandbekleidungen im Zusammenhang mit den Brandszenarien „Brand von innen“ und „Brand von außen“ treffen zu können. Die insgesamt 107 aufgelisteten Brandereignisse werden durch weitere 65 recherchierte und nicht gemeldete Brandereignisse ab dem Jahr 2008 im Zusammenhang mit Außenwandbekleidungen ergänzt.

Die Abbildung 2-5 schlüsselt die untersuchten 172 Brandereignisse in die beiden Brandszenarien „Brand von innen“ und „Brand von außen“ auf. Zusätzlich wird der Brand von außen in einzelne Kategorien für die Brandursache analog Abschnitt 2.2 unterteilt. Daraus wird deutlich, dass wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, das Brandszenario eines Nachbargebäudes keine wesentliche Rolle spielt und die bauordnungsrechtlichen Anforderungen in diesem Zusammenhang als ausreichend sicher zu betrachten sind.



* Sockelbrände bei denen das Brandszenario größer war als beim Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] geprüft wird

Abbildung 2-5: Prozentuale Anteil der Brandszenarien bezogen auf die 172 untersuchten Brandfälle im Zusammenhang mit Außenwandbekleidungen

Das Brandszenario „Brand von außen“ tritt insgesamt am häufigsten auf. Aber auch die Raumbrände spielen eine signifikante Rolle. Deutlicher wird dies, wenn die 15 Balkonbrände zu den 33 Raumbränden, aufgrund der Brandbeanspruchung in höher gelegenen Geschossen, hinzugerechnet werden. Daraus ergibt sich ein Anteil zu 48 von 172 Bränden.

Die Abbildung 2-6 zeigt die Auswertung zur geschossweisen Brandausbreitung für die 172 Brandfälle. Davon ist bei 54 Brandfällen ein kritisches Brandereignis mit einer Brandausbreitung über mindestens drei Geschosse aufgetreten. Hinzu kommt, dass bei einem Großteil der 27 Brandereignisse ohne Angabe zur Brandausbreitung – ausweislich der z. T. vorhandenen Fotodokumentationen – die zulässige Grenze der Brandausbreitung auf max. zwei Geschosse deutlich überschritten wurde.

Bei den 172 Brandereignissen mit insgesamt 203 Verletzten und 8 Toten kann, aufgrund der zum großen Teil lückenhaften Angaben zu den Brandfällen und im Zusammenhang mit den

nicht vorhandenen Angaben zu vorgelegenen brandschutztechnischen Mängeln, im Allgemeinen kein verwertbarer Zusammenhang zwischen brennbaren Außenwandbekleidungen und dem Auftreten von Verletzungs- und Todesereignissen hergestellt werden.

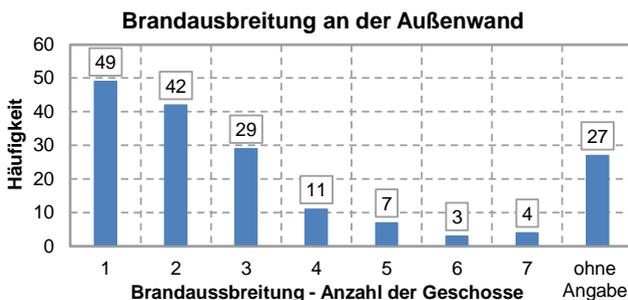


Abbildung 2-6: Betrachtung der prozentualen Häufigkeit der maximalen Brandausbreitungen unter Bezugnahme der 172 untersuchten Brandfälle

Die Auswertung der 172 Brandfälle zeigt, dass bei ca. 32 % der Brandereignisse im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen die bauordnungsrechtlichen Schutzziele nicht eingehalten wurden.

Die deutlichen Schwankungen bei der Anzahl der Brandereignisse in den einzelnen registrierten Jahren weisen darauf hin, dass die gemeldeten Brandereignisse bei weitem nicht alle kritischen Brandfälle in Deutschland erfassen. Die vom Verfasser ergänzten 65 online recherchierten und dokumentierten Brandfälle bestätigen dies und lassen die Vermutung einer deutlich höheren Anzahl kritischer Brandereignisse in den 2010er Jahren in Deutschland zu.

Internationale Auswertungen von Brandschadensereignissen im Zusammenhang mit Außenwandbekleidungen konnten nur in einem sehr beschränkten Umfang recherchiert werden. Dabei handelt es sich in der Regel um keine vollständigen Brandschadensstatistiken, sondern hauptsächlich um die qualitative Auswertung zu Brandfällen, in denen die Feststellung des eintretenden Brandszenarios im Fokus stand. Erkenntnisse über die vorliegenden qualitativen Auswertungen hinaus, können daraus nicht gewonnen werden. Genauere Angaben dazu können White et. al. [131] entnommen werden.

2.3.5 Abwehrender Brandschutz – Einsatzgrenzen der Feuerwehr

Eine weitere wesentliche Rolle bei der Betrachtung der Brandausbreitung auf und in Außenwandbekleidungen ist dem abwehrenden Brandschutz zuzuordnen. Der Zeitraum zwischen Brandausbruch und dem Einsetzen wirksamer Löscharbeiten zur Begrenzung der

Brandausbreitung ist für die Ermittlung der notwendigen Prüfzeit einer brennbaren Außenwandbekleidung im groß skalierten Brandversuch maßgebend. Zu dieser Thematik wurde ein allgemeiner Fragenkatalog vom Verfasser entwickelt, der mit den Berufsfeuerwehren Hannover, Frankfurt am Main und München in einer Diskussionsrunde besprochen und in Form eines Diskussionspapiers verschriftlicht worden ist ([88], [89], [90]). Ziel der Diskussionsrunde war es, die Feuerwehren unmittelbar in die Entwicklung des Prüfverfahrens einzubinden, um so signifikante Merkmale im Zusammenhang mit den Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehren bei brennbaren Außenwandbekleidungen zu identifizieren.

2.3.5.1 Hilfsfrist

Die Abbildung 2-7 zeigt die grundsätzlichen Abläufe bei einem Brandereignis im Zusammenhang mit dem Einsatz der Feuerwehr. Dabei stellen die Hilfsfristen 1 und 2, die Erkundungs- und Entwicklungszeit sowie der Beginn wirksamer Löscharbeiten eine durch die Feuerwehr zu steuernde zeitliche Größe dar.

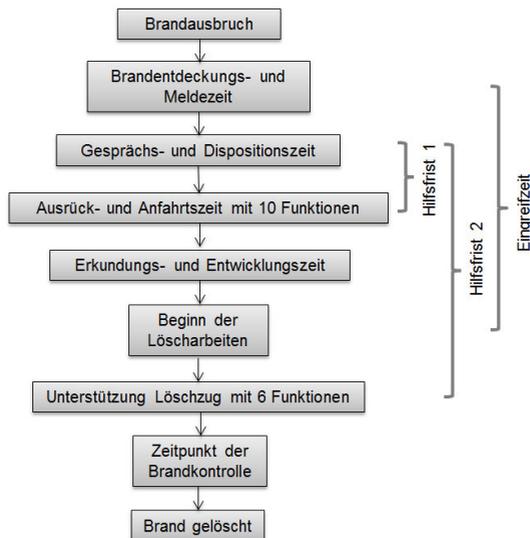


Abbildung 2-7: Ablaufdiagramm eines Einsatzes der Feuerwehr auf Grundlage der Hilfsfristen gemäß AGBF [121]

Die Hilfsfrist wird im Weiteren auch durch die Bedarfsplanung der jeweiligen zuständigen Stadt oder Gemeinde und, falls vorhanden, durch die Gesetzgebung der einzelnen Bundesländer beeinflusst. Die Hilfsfrist wird in der DIN 14011 [27] definiert als die Zeitdauer vom Beginn der Notrufabfrage bis zum Eintreffen der ersten Einsatzkräfte am Einsatzort.

Sie setzt sich zusammen aus der Gesprächs- und Dispositionszeit, der Alarmierung sowie der Ausrück- und Anfahrtzeit der Einsatzkräfte zum Brandort.

Die Eingreifzeit setzt sich entsprechend DIN 14011 [27] als Zeitspanne aus der Brandentdeckungs- und Meldezeit, der Gesprächs- und Dispositionszeit, der Alarmierungszeit, der Ausrück- und Anfahrtszeit und der Erkundungs- und Entwicklungszeit bis zum Beginn wirksamer Löscharbeiten zusammen.

Der Zeitpunkt zwischen Brandausbruch und Brandentdeckung lässt sich grundsätzlich nicht durch die Feuerwehren beeinflussen und zeitlich auch nicht erfassen. Die Brandentdeckung hängt von vielen Faktoren, wie z. B. der örtlichen Lage des Gebäudes, der Wahrnehmung der Hausbewohner, dem Zeitpunkt des Brandausbruchs (über Tag oder Nacht) und der Frequentierung des Fahrzeugs- und Personenverkehrs in unmittelbarer Umgebung des Gebäudes ab, sodass hier keine generelle zeitliche Aussage getroffen werden kann. Anlagentechnische Komponenten zur Brandfrüherkennung wie z. B. Rauchmelder gemäß DIN 14676 [28] oder Brandmeldeanlagen aber auch die Brandschutzaufklärung der Nutzer können den Zeitpunkt der Brandentdeckung wesentlich verkürzen. Die Abbildung 2-8 hinterlegt das Ablaufdiagramm nach Abbildung 2-7 mit den nach den Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung der Feuerwehren in Städten [121] zu berücksichtigenden Zeiten beim kritischen Wohnungsbrand.

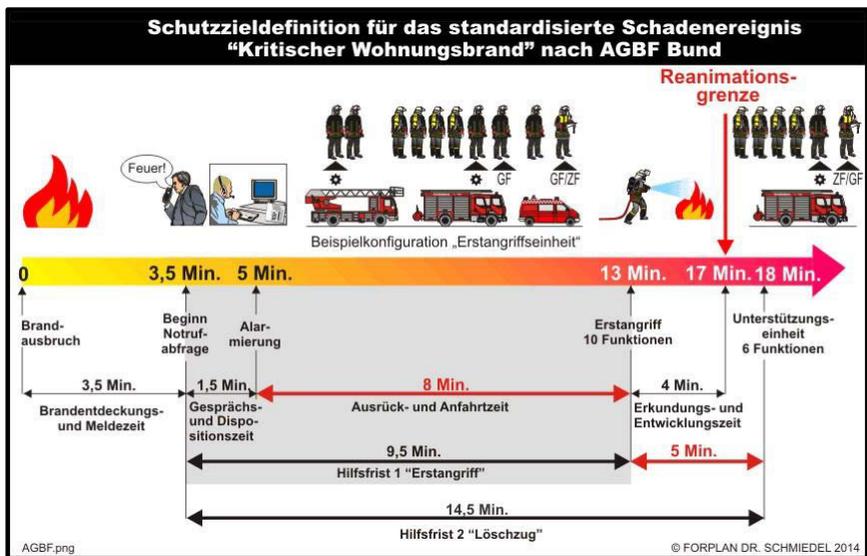


Abbildung 2-8: Schutzzieldefinition für das standardisierte Schadenereignis des "kritischen Wohnungsbrandes" gemäß AGBF unter Bezugnahme der Hilfsfristen [61]

Dabei werden auch Empfehlungen zur Funktionsstärke für die Hilfsfrist 1 (10 Funktionen) und 2 (6 Funktionen) gegeben. Dabei entspricht eine Funktion einer Einsatzkraft, die entsprechend eine Aufgabe (Erkundung, Rettung etc.) am Brandort ausüben kann. Der Erreichungsgrad beschreibt den prozentualen Anteil der Einsätze, bei dem die Zielgröße Hilfsfrist 1 und 2 und die Funktionsstärke eingehalten werden. Dieser Wert wird mit 90 % empfohlen [121].

2.3.5.2 Notwendige Prüfzeiten im Brandversuch aus Sicht der Feuerwehr

Im Rahmen der Entwicklung des skalierten Prüfstandes gemäß DIN 4102-20 [32] wurde auf Grundlage der empfohlenen Hilfsfrist nach [121] für das standardisierte Schadensereignis des „kritischen Wohnungsbrandes“ nach AGBF Bund eine Prüfdauer für den Raumbrand bei schwerentflammbaren Außenwandbekleidungen von 20 Minuten festgelegt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass mit Beginn der Brandentdeckungs- und Meldezeit in der Regel nach 20 Minuten erste wirksame Löscharbeiten im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen möglich sind ([88], [90]). Einen gleichwertigen Ansatz verfolgt die Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107], die eine Prüfzeit von 25 Minuten, unter Berücksichtigung der Brandentwicklung der Holzkrippe bis zum Vollbrand von ca. 5 Minuten, vorsieht.

Die angesetzten 20 Minuten sind auf Grundlage des Bauordnungsrechts als ausreichend sicher zu betrachten [88]. Eine maximale Sicherheit wird durch diese Annahme nicht abgedeckt. Durch Einflussfaktoren, wie z. B. Stauzeiten, Extremwetterbedingungen, geschlossenen Bebauungen mit schwer zugänglichen Gebäuderückseiten, durch zusätzliche Anfahrtswege zur Feuerwache (freiwillige Feuerwehr) sowie lange Anfahrtswege von der Feuerwache zum Brandort, können verlängerte Hilfsfristen auftreten, die begründen, dass die Prüfzeit von 20 Minuten nicht die maximale Sicherheit abdeckt [88]. Auch der Zeitpunkt der Brandentdeckung und die erreichte Brandphase zu diesem Zeitpunkt spielen eine wesentliche Rolle, lassen sich aber, wie bereits beschrieben, zeitlich nicht erfassen.

2.3.5.3 Mögliche kritische Einsatzgrenzen der Feuerwehr

Nach aktuellen bauordnungsrechtlichen Grundsätzen ist eine Brandausbreitung auf maximal zwei Geschosse zu begrenzen (vgl. 2.3.1). Die Einsatzgrenzen eines äußeren Löschangriffes werden grundsätzlich über die Anforderungen in der Muster-Hochhausrichtlinie reglementiert. Auf Grundlage der Richtlinie sind für Gebäude ab dieser Höhe brennbare Außenwände und Außenwandbekleidungen nicht zulässig, sodass eindeutig geregelt ist, dass diese Bauteile bzw. Bauarten keinen Beitrag zum Brand leisten dürfen.

Wirksame Löscharbeiten können die Funktionen der Feuerwehr binden. Da insbesondere im Rahmen der 1. Hilfsfrist die Einsatzkräfte mit der Erkundung und ggf. der Rettung von

Personen gebunden sind, sind wirksame Löscharbeiten im Gebäude und gleichzeitig außerhalb des Gebäudes in diesem Zusammenhang nicht realisierbar. Bei ausgedehnten Gebäuden ist es für die Feuerwehr besonders zeit- und personalintensiv Personenrettungen durchzuführen, insbesondere dann, wenn diese gleichzeitig beidseitig eines Gebäudes notwendig sind.

Sofern eine Brandausbreitung auf zwei Geschosse auftritt, ist dies für die Feuerwehr nur noch schwer beherrschbar und ist im Zuge gleichzeitiger ggf. notwendiger Rettungsmaßnahmen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten als grenzwertig zu betrachten. Bei einer Brandausbreitung über zwei Geschosse hinaus sind wirksame Löscharbeiten zur Begrenzung der Brandausbreitung innerhalb eines Brandabschnittes kaum noch durchführbar. Dies kann im ungünstigsten Fall zur Folge haben, dass die Feuerwehr das Gebäude kontrolliert abbrennen lassen muss und sich im Wesentlichen auf die Vermeidung der Brandausbreitung auf andere Brandabschnitte oder auf Nachbargebäude fokussiert bzw. Rettungsmaßnahmen abschließt [90].

Ergänzend zur Diskussion mit den Feuerwehren lassen sich über die Angaben aus dem vfdb-Leitfaden [67] beherrschbare Brandflächen feststellen. Die Angaben sind unter Betrachtung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen kritisch zu betrachten, da z. B. Nutzungseinheiten bis 400 m² (Büro und Verwaltung) ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen (notwendiger Flur) zulässig sind, jedoch für freiwillige Feuerwehren maximal eine Brandfläche von 100 m² als beherrschbar angegeben wird.

Tabelle 2-5: Angabe zu maximal beherrschbaren Brandflächen durch unterschiedliche Brandbekämpfungsmaßnahmen gemäß vfdb-Leitfaden [67]

Brandbekämpfungsmaßnahme	maximal beherrschbare Brandfläche $A_{F,max}$ [m ²]
Freiwillige Feuerwehr	100
Freiwillige Feuerwehr mit hauptamtlichen Kräften	200
Berufsfeuerwehr	300
Werkfeuerwehr	400
Sprinkleranlage	350

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die z. T. kritische Löschwasserversorgung in Stadtgebieten sowie im ländlichen Raum. Durch die zunehmende Brandintensität von Bränden innerhalb von Nutzungseinheiten [12] und der daraus resultieren schnelleren Brandausbreitung kann der Löschwasserbedarf steigen. Hinzu kommen die zusätzlichen Brandlasten an

Außenwänden durch brennbare Außenwandbekleidungen, die den Bedarf ebenfalls erhöhen. Die Fassade kann auch auf einer für die Feuerwehr und für die Drehleiter nicht erreichbaren Gebäudeseite liegen (Hinterhof), was einen äußeren Löschangriff deutlich erschwert.

Die Brandausbreitung über mehr als zwei Geschosse ist grundsätzlich auch bei Gebäuden der Gebäudeklasse 3 möglich. Entsprechend der Gesetzgebung werden für diese GKL bei Wohnungs- und kleinen Büro- und Gewerbenutzungen lediglich normalentflammbare Außenwandbekleidungen gefordert. Dem liegt die bessere Möglichkeit der Rettung über Steckleitern der Feuerwehr zugrunde, weshalb entsprechend der Gesetzgebung die Anforderung als ausreichend sicher betrachtet wird. Im Zuge der Feststellungen zu Brandereignissen zeigt sich jedoch, dass auch bei dieser GKL kritische Brandereignisse auftreten können und insbesondere unter Betrachtung der definierten Schutzziele im Abschnitt 2.3.1, diese ggf. nicht eingehalten werden können. Entsprechend dem Diskussionsergebnis aus ([88], [90]) sollten beispielsweise auch bei Wohngebäuden der GKL 3 WDVS mit EPS in schwerentflammbarer Ausführung (mit Brandriegeln) eingebaut werden.

2.3.5.4 Brandrisiko bei Gebäuden besonderer Art und Nutzung

Der kritische Wohnungsbrand wird durch die Feuerwehren gegenüber einem Brand in einem Gebäude besonderer Art und Nutzung wie z. B. in Krankenhäusern, Beherbergungsstätten oder Versammlungsstätten im Zusammenhang mit der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen mit einem höheren Risiko bewertet ([88], [89], [90]). Dies setzt voraus, dass die betrachteten Gebäudetypen im Vergleich formell und/oder materiell konform nach den jeweiligen bauordnungsrechtlichen Anforderungen ausgeführt worden sind. Dies begründet sich mit den deutlich höheren vorbeugenden, brandschutztechnischen Maßnahmen bei Sonderbauten wie z. B. der Erfordernis von zwei baulichen Rettungswegen, höhere Anforderungen im anlagentechnischen Brandschutz, Ausbildung von notwendigen Fluren oder der brandschutztechnischen Abschottungen von Schlafräumen. Des Weiteren werden in vielen Sonderbauvorschriften grundsätzlich nicht brennbare Außenwandbekleidungen gefordert (vgl. Abschnitt 2.3.1), sodass die Wohnungsnutzung von Gebäuden bis GKL 5 für die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen als maßgebend betrachtet werden kann.

2.4 Groß skaliertes Brandversuch für Außenwandbekleidungen

Weltweit werden zur Prüfung von brennbaren Außenwandbekleidungen groß skalierte Brandversuche (Full-Scale Facade Test Methods) und mittel skalierte Brandversuche (Intermediate-Scale Facade Test Methods) herangezogen. Als groß skalierte Brandversuche lassen sich als solche definieren, die hinsichtlich der Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen in Abhängigkeit des Brandszenarios einer wirklichkeitsnahen Brandbeanspruchung und der Prüfstandgeometrie einem geometrisch realen Außenwandwandaufbau eines Gebäudes mit mehreren Geschossen entsprechen. Bei einem groß skalierten Brandversuch ist grundsätzlich nicht ausschlaggebend, ob sich das Prüffeuere in einer Brandkammer, in einem Brandraum oder vor dem Prüfstand befindet. Wesentlich ist die einwirkende thermische Beanspruchung auf ein mögliches zu prüfendes Außenwandbekleidungssystem. Durch Verkleinerung der Umfassungsgeometrie des Brandraums (Ausbildung einer Brandkammer) ist es möglich, die notwendige Wärmefreisetzung des Prüffeuers gegenüber Raumbränden zu reduzieren und trotzdem gleichwertige thermische Beanspruchungen oberhalb der Brandkammeröffnung zu gewährleisten. Bei einem Prüffeuere vor dem Prüfstand können Wärmeverluste durch Umfassungsbauteile vollständig vermieden werden. Gleichzeitig können dabei, durch eine nicht unmittelbar auf die Prüfwand anliegende Flamme, Wärmeverluste entstehen, die zu einer Reduzierung der thermischen Beanspruchung der Außenwandbekleidung gegenüber einer aus der Brandkammer schlagenden Flamme gleicher Leistung führen.

Die Brandbeanspruchung von Außenbekleidungen wird bei groß skalierten Brandversuchen durch unterschiedliche Prüffeuere gewährleistet. Die Prüffeuere lassen dabei in drei Kategorien unterteilen:

- Gasbrenner,
- Holzkrippe/Holzstapel und
- Poolfeuer.

Die Tabelle 2-6 stellt die weltweit bedeutenden groß skalierten Brandversuche zusammen. Wesentliche Unterschiede, ergänzend zum Prüffeuere, sind die Anforderungen zur Ausbildung der Prüfwand als Gerade- oder Eckwand, die Ausbildung der Brandkammer oder des Brandraums, das abzubildende Brandszenario und die Prüfdauer. Aber auch zusätzliche Öffnungen, repräsentativ einer Fensteröffnung, oberhalb des Prüffeuers finden bei den Prüfständen gemäß SP FIRE 105 [120], LEPiR 2 [115] oder GOST 31251 [62] Berücksichtigung.

Interessant bei der Gegenüberstellung der Brandversuche ist die z. T. deutlich unterschiedliche Prüfdauer. Der Brandversuch gemäß SP FIRE 105 [120] berücksichtigt eine Prüfdauer von mindestens 12 Minuten. Dem gegenüber ist beim Brandversuch gemäß

MSZ 14800 [103] eine Prüfdauer von 45 Minuten vorgesehen. Die unterschiedlichen Prüfdauern verdeutlichen, dass für die Bereitstellung eines Prüfverfahrens in Europa mehrstufige Beanspruchungszeiten (z. B. für schwer- und nichtbrennbare Außenwandbekleidungen) ein notwendiger Ansatz sein muss, um ggf. die vorhandenen nationalen Anforderungen der einzelnen Mitgliedsstaaten, wie z. B. die Gewährleistung von wirksamen Löscharbeiten, einhalten zu können.

Aus Tabelle 2-6 kann auch entnommen werden, dass durch größere Umfassungsgeometrien im Brandraum die eingesetzten Brennstoffmassen für das Prüffeuerelement im groß skalierten Brandversuch ansteigen. Das Brandszenario, was im jeweiligen groß skalierten Brandversuch simuliert werden soll, bleibt jedoch grundsätzlich das Gleiche. Hier stellt sich die Frage, wieso bei den Brandversuchen z. T. ein so hoher technologischer Aufwand zur Bereitstellung des Prüffeuerelements betrieben werden muss, um schlussendlich eine ähnliche thermische Beanspruchung für die Außenwandbekleidung zu erreichen.

Die groß skalierten Brandversuche gemäß MVV TB [107] und ANSI FM 4880 [4] repräsentieren eine Brandbeanspruchung der Außenwandbekleidung infolge einer Brandquelle vor dem Gebäude. Die groß skalierten Brandversuchen BS 8414-1 [19] und ISO 13785-2 [71] berücksichtigen gemäß Norm die Brandbeanspruchung infolge eines Raumbrandes und eines undefinierten Brandszenarios vor einem Gebäude. Die weiteren groß skalierten Brandversuche berücksichtigen entsprechend den normativen Angaben nur den Raumbrand.

Tabelle 2-6: Zusammenstellung von weltweit durchgeführten groß skalierten Brandversuchen zur Prüfung von Außenwandbekleidungen

Norm	Land	Brand-szenario	Brandraum/ -kammer B x L x H [m]	Prüf-dauer** [min]	Prüffeuer	Prüfstands- geometrie B x H [m]
Sockelbrand-szenario MVV-TB [107]	D	SB	ohne	25	200 kg Holzkrippe	Eckwand 4,0 x 9,8 2,0 x 9,8
BS 8414-1 [19][20]	UK, AUS, CH, UAE	RB + SB	BK 2,0 x 1,0 x 2,0	30	300 - 478 kg Holzkrippe	Eckwand 2,5 x 8,0 1,5 x 8,0
SP FIRE 105 [120]	S, DK	RB	BK 3,24 x 1,6 x 1,3	15	60 L Heptan	gerade Wand 4,0 x 6,7
LEPIR 2 [115]	F	RB	BR 4,85 x 2,65 x 2,35	30	2 x 300 kg Holzkrippe	gerade Wand 5,0 x 6,6
ISO 13785-2 [71]	AUS, CZ, SK, KR	RB + SB	BR 20 m ³ - 100 m ³	23-27	120 g/s Propangas- brenner	Eckwand 3,0 x 5,7 1,2 x 5,7
CAN/ULC- S134-13 [21]	CAN	RB	BR keine Angabe	25	min 120 g/s Propangas- brenner	gerade Wand 6,0 x 9,8
MSZ 14800 [103]	H	RB	BR 4,4 x 7,5 x 2,65	45	600 kg Holzkrippe	gerade Wand 6,0 x 7,0
ANSI FM 4880 Part C* [4]	USA	SB	ohne	keine Angaben	350 kg Holzstapel	Eckwand 15,1 x 7,6 11,5 x 7,6
ANSI FM 4880 Part D* [4]	USA	SB	ohne	keine Angaben	350 kg Holzpaletten	Eckwand 6,0 x 15,2 6,0 x 15,2
NFPA 285 [108]	USA	RB	BR 3,05 x 3,05 x 2,13	30	Propangas- brenner innen und außen	gerade Wand 4,1 x 5,3
GOST 31251 [62]	AZ, AM, KG, KZ, MD, RU, TJ, ZU, UA	RB	BR keine Angaben	35	750 MJ/m ² Nadelholz	gerade Wand 3,0 x 5,1

Begriffe: RB = Raumbrand; SB = Sockelbrand; BK = Brandkammer; BR = Brandraum

* Bauordnungsrechtlich nicht als groß skaliertes Brandversuch für Außenwandbekleidungen eingeführt [131]

** Die Prüfdauer berücksichtigt nur die Zeit der Brandbeanspruchung durch das Prüffeuer und ist als circa Angabe ausgewiesen. Zusätzliche Beobachtungszeiten sowie einzuhaltende Temperaturstartbedingungen sind nicht berücksichtigt.

Welche groß skalierte Brandversuche unabhängig der normativen Beschreibungen schlussendlich beide Brandszenarien abdecken können, lässt sich aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren nur durch umfangreiche experimentelle und/oder numerische Untersuchungen beantworten. Dabei spielt im Wesentlichen der Grenzwert der abzudeckenden Brandbeanspruchung für den Sockelbrand die wesentliche Rolle. In Deutschland wurde sich aufgrund der Häufigkeit auf das Brandszenario eines brennenden

Müllmischcontainers verständigt. Brandquellen mit z. T. sehr viel höheren Wärmefreisetzungsraten wie z. B. von modernen Fahrzeugbränden finden keine Berücksichtigung, da Schadensereignisse dieser Art bisher äußerst selten aufgetreten sind und somit kein Regelszenario darstellen.

Für die weitere Bearbeitung werden nachfolgend durch eine Vergleichsbetrachtung die groß skalierten Brandversuche, die für die Beantwortung der Forschungsfrage relevant sind, selektiert. Dabei liegt der Fokus insbesondere auf den nationalen und europäischen Brandversuchen. Insgesamt zeigt der Vergleich der groß skalierten Brandversuche bei einigen Brandversuchen sehr ähnliche Ansätze, sodass hier eine Dopplung der Untersuchungen vermieden werden soll.

Aufgrund der ähnlichen Prüfstandgeometrie und der gleichzeitigen größeren Brennstoffmasse der Prüfstände ANSI FM 4880 Part C und D [4] gegenüber dem Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] werden die beiden amerikanischen groß skalierten Brandversuche für die weitere Untersuchung ausgeschlossen. Außerdem haben die beiden groß skalierten Brandversuche in Amerika keine bauordnungsrechtliche Relevanz [131]. Der amerikanische Prüfstand gemäß NFPA 285 [108] ist hinsichtlich des Prüffeuers für einen repräsentierenden Raumbrand skaliert angesetzt. Unabhängig von der skalierten Raumgröße und der Auskleidung des Brandraums mit wärmedämmenden Baustoffen erreicht die Wärmeabgabe an der Brandraumöffnung nach den durchgeführten numerischen Voruntersuchungen des Verfassers circa 1 MW, was gegenüber typischen Raumbränden mit Wärmefreisetzungsraten von 1,5 MW bis 2,5 MW als nicht ausreichend zu betrachten ist. Agarwal [1] hat in seinen Untersuchungen festgestellt, dass für einige Außenwandbekleidungssysteme die Brandbeanspruchung durch die Prüfung nach NFPA 285 [108] nicht ausreicht, um ein kritisches Brandszenario im Vergleich zu anderen Fassadenprüfungen zu erzeugen. Aus den genannten Gründen wird der Brandversuch von den folgenden Untersuchungen ausgeschlossen.

Bei der Betrachtung der europäischen groß skalierten Brandversuche zeigen der MSZ 14800 [103] gegenüber dem LEPIR 2 [115] hinsichtlich der eingesetzten Brennstoffmasse und der Brandraum- und Prüfstandgeometrie sehr hohe Übereinstimmungen auf. Aufgrund der höheren Relevanz des LEPIR 2 [115] innerhalb Europas wird die ungarische Brandprüfung gemäß MSZ 14800 [103] im Folgenden nicht weiter untersucht. Der Brandversuch nach GOST 31251 [62] hat insbesondere in den ehemaligen Ländern der Sowjetunion eine große Bedeutung. Numerische Voruntersuchungen des Verfassers zu dieser Arbeit zum quantitativen Vergleich der Prüfstände untereinander haben aufgezeigt, dass die Brandbeanspruchung infolge eines kritischen Raumbrandes auf ein

Außenwandbekleidungssystem durch diesen Brandversuch und gegenüber den nachfolgend ausgewählten Brandversuchen unterschätzt wird.

Für die numerischen Untersuchungen der groß skalierten Brandversuche werden aufgrund der genannten Erläuterungen in Kapitel 6 die nachfolgenden Prüfstände genauer untersucht:

- BS 8414-1 [19],
- LEPIR 2 [115],
- SP FIRE 105 [120] und
- ISO 13785-2 [71].

Zur Quantifizierung der Brandbeanspruchung infolge eines Sockelbrandes auf eine Prüfwand, repräsentativ für z. B. einen brennenden Müllmischcontainer, werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen zum Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] aus Kapitel 5 für die Vergleichsbetrachtungen herangezogen.

2.5 Prüffeufer von groß skalierten Brandversuchen

2.5.1 Anforderungen

Das Prüffeufer im groß skalierten Brandversuch hat, neben der Ausbildung der Prüfwand, den größten Einfluss zur Gewährleistung eines realitätsnahen Prüfverfahrens. Die Abbildung 2-9 stellt die vier „Säulen“ für die Anforderungsmerkmale eines Prüffeuers von groß skalierten Brandversuchen dar.

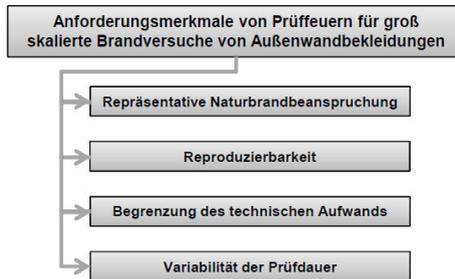


Abbildung 2-9: Zusammenstellung der Anforderungsmerkmale für Prüffeufer im groß skalierten Brandversuch von Außenwandbekleidungen

Dabei muss das Prüffeufer so ausgelegt werden, dass dieses eine kritische und vor allem realitätsnahe Naturbrandbeanspruchung infolge eines Raumbrandes auf eine Außenwandbekleidung abgedeckt. Maßgebend dabei ist nicht die Wärmefreisetzungsrate, die im Brandraum oder in einer Brandkammer freigesetzt wird, sondern die einwirkende thermische Beanspruchung auf die Prüfwand.

Eine gute Reproduzierbarkeit des Prüffeuers gewährleistet vergleichbare Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Prüfstellen, was für einen fairen Wettbewerb der Hersteller untereinander zwingend erforderlich ist. Der technische Aufwand zur Erzeugung des Prüffeuers kann sich aufgrund des höheren Risikos von Versuchsfehlern auf die Reproduzierbarkeit und auf die Kosten im Prüfverfahren auswirken.

Als letztes Kriterium ist zur Anwendung von Prüffeuern in groß skalierten Brandversuchen die Variabilität der Prüfdauer zu benennen. Durch eine variable Prüffeuerdauer können unterschiedliche Klassifizierungen wie z. B. die Anforderung schwerentflammbar oder nichtbrennbar berücksichtigt werden, wie diese beim Versuch gemäß DIN 4102-20 [32] vorgesehen sind. Des Weiteren können auch zeitliche Leistungsstufen eingeführt werden, die insbesondere die Hilfsfristen bzw. den Zeitpunkt wirksamer Löscharbeiten der Feuerwehren nach Brandmeldung in den einzelnen Ländern innerhalb Europas oder sogar weltweit berücksichtigen.

2.5.2 Brandtechnische Parameter

Die entscheidende messtechnische Größe zur Prüfung einer guten Repräsentierbarkeit eines Prüffeuers ist die Wärmefreisetzungsrate. Die Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate kann auf Grundlage experimentell bestimmter, messtechnischer Größen gemäß folgenden Methoden ermittelt werden:

- Massenverlustmethode,
- Enthalpiemethode,
- Sauerstoffverbrauchskalorimetrie,
- Energieverteilungsfunktion.

Die Massenverlustmethode ist dabei, insbesondere bei der Ermittlung von Wärmefreisetzungsraten von einzelnen Prüffeuern im Fassadenprüfstand, eine häufig verwendete Methode und damit auch maßgebend für die folgenden Untersuchungen.

Bei der Massenverlustrate wird die Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} über das Produkt der zeitabhängigen Masseverlustrate \dot{m}_{ab} , die mit der Abbrandwaage gemessen wird, und dem effektiven Heizwert des Brennstoffs $\Delta H_{c,\text{eff}}$ ermittelt.

Nach [11] bestimmt sich die Wärmefreisetzungsrate mit der Massenverlustmethode über die Gl. (2-1) wie folgt:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{ab}} \cdot \Delta H_{c,\text{eff}} \quad \text{Gl. (2-1)}$$

Dabei ist

\dot{Q}	die Wärmefreisetzungsrate	[kW]
\dot{m}_{ab}	die Massenabnahme pro Zeiteinheit, gemessen auf der Abbrandwaage	[kg/s]
$\Delta H_{c,\text{eff}}$	die effektive Verbrennungswärme	[MJ/kg]

Die effektive Verbrennungswärme $\Delta H_{c,\text{eff}}$ kann entsprechend Gl. (2-2) mittels des Ansatzes der Netto-Verbrennungswärme ΔH_c aus den Messergebnissen aus dem Bombenkalorimeter und der Verbrennungseffektivität χ bestimmt werden.

$$\chi = \frac{\Delta H_{c,\text{eff}}}{\Delta H_c} \quad \text{Gl. (2-2)}$$

Dabei ist

χ	die Verbrennungseffektivität	[-]
ΔH_c	die Verbrennungswärme	[MJ/kg]

Die Verbrennungswärme ΔH_c wird in der amerikanischen Literatur als Brennwert bezeichnet und im sogenannten Bombenkalorimeter gemessen. Dieser entspricht dem oberen Heizwert H_o . Der Unterschied zum unteren Heizwert H_u ist der zusätzliche berücksichtigte Enthalpieanteil des Wasserdampfes (H_2O liegt als Produkt in Form von Wasser oder Gas vor). [118]

Im Weiteren hängt die Verbrennungseffektivität χ von verschiedenen Einflussfaktoren wie dem Feuchtegehalt des Brennstoffes, der Geometrie und Anordnung der Probe, der thermischen Beanspruchung aus dem Prüffeuere (SBI oder Cone Calorimeter) und weiteren Aspekten ab ([64], [74]). Eine verlässliche Bestimmung der Verbrennungseffektivität für verschiedene Brennstoffe bei Prüffeuern im groß skalierten Brandversuch ist somit nur außerordentlich schwierig zu bestimmen und führt ggf. zu Unsicherheit in der Bestimmung der Wärmefreisetzung.

Experimentelle Untersuchungen am Beispiel von Kiefernholz [10] haben gezeigt, dass die effektive Verbrennungswärme auch von der Branddauer abhängig ist. Dies verdeutlicht die Abbildung 2-10, bei der eine Probe aus Kiefernholz im Calorimeter unter einer ausreichenden Sauerstoffzufuhr bei einer Wärmestromdichte von 65 kW/m^2 beansprucht und die effektive Verbrennungswärme ermittelt worden ist. Die experimentell ermittelten Werte liegen zwischen 12 MJ/kg und 37 MJ/kg und nehmen insbesondere mit der Branddauer zu.

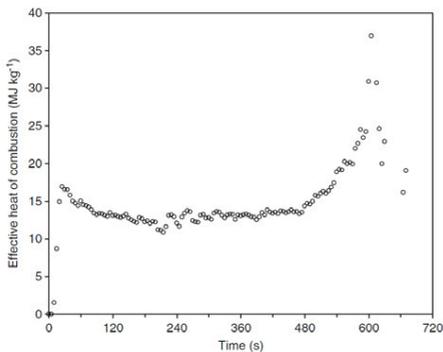


Abbildung 2-10: Effektive Verbrennungsenergie einer Kiefernholzprobe (Kiefernholz) gemäß [69]

Der Grund dafür ist das komplexe Abbrandverhalten von Holz. Die Zersetzung von Holz im Verbrennungsprozess erfolgt in verschiedenen Temperaturstufen. Zu Brandbeginn überwiegt der Anteil der freigesetzten Pyrolysegase. Mit zunehmender Branddauer nimmt die Brandintensität durch die vermehrte Bildung von Holzkohle zu, was sich durch den erhöhten Brennwert von Holzkohle (z. B. Buche $34,3 \text{ MJ/kg}$) herleiten lässt. Neben der Pyrolyse haben

auch die Rissbildung der Oberflächenezone sowie der Feuchtetransport aus dem Holz einen großen Einfluss und machen eine exakte numerische Simulation nahezu unmöglich. [118]

Wilk et al. [134] haben in ihren umfangreichen Auswertungen zu durchgeführten Brandversuchen an der MFPA Leipzig festgestellt, dass sich zwischen der Sauerstoffverbrauchsmethode und der Enthalpiemethode einerseits (ohne Berücksichtigung des Heizwertes) und der Massenverlustmethode sowie der Energieverteilungsfunktion mit Berücksichtigung des Heizwertes andererseits, keine maßgeblichen Unterschiede ergeben, die eine Anpassung des unteren Heizwertes durch eine angesetzte Verbrennungseffektivität < 1 rechtfertigt. Bei der Anwendung von Brandsimulationen wird gemäß Schneider [118] bei fehlenden Werten für die Verbrennungseffektivität grundsätzlich der untere Heizwert unter der Berücksichtigung einer Verbrennungseffektivität von 1 empfohlen.

In Tabelle 2-7 sind die wesentlichen brandtechnischen Parameter von eingesetzten Brennstoffen von Prüffeuern bei Brandversuchen zusammengefasst.

Tabelle 2-7: Spezifische Stoffeigenschaften der verwendeten Brennstoffe von Prüffeuern

Material	Propan	Kiefer	Fichte	Heptan	Isopropanol
Chemische Formel	C_3H_8 [118]	$C_{0,95}H_{2,4}O$ [118]	$CH_{3,584}O_{1,55}$ [118]	C_7H_{16} [118]	C_3H_7OH [118]
Soot-Yield [g/g] (brandlastgesteuert)	0,024 [118]	0,015 [67][118]	0,015 [67][118]	0,037 [118]	0,003 [69]
CO-Yield [g/g] (brandlastgesteuert)	0,005 [118]	0,004 [67] bis 0,005 [118]	0,004 [67] bis 0,005 [118]	0,01 [118]	0,015 [69]
Unterer Heizwert H_u [kJ/kg]	46.360 [69]	17.800 [69]	17.280 [30] bis 20.400 [69]	44.560 [69]	27.000 [30] bis 31.300 [69]
Brennwert ΔH_c [kJ/kg]	50.350 [37]	19.200 [69]	21.800 [69]	48.070 [69]	33.380 [69]
Strahlungsanteil bei der Verbrennung χ_r [-]	0,3 [83] bis 0,31 [113]	0,16 [116] bis 0,25 [66] beim Abbrand von Holzkippen		0,33 [69] bis 0,4 [83]	0,29 [69] bis 0,3 [83]

2.5.3 Gasbrenner

Der Gasbrenner wird in groß skalierten Brandversuchen beim ISO 13785-2 [71], CAN/ULC-S134-13 [21] und beim NFPA 285 [108] verwendet. In Deutschland wird beim mittel skalierten Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] in der Regel ebenfalls der Gasbrenner eingesetzt. Gasbrenner können in unterschiedlicher geometrischer und leistungsspezifischer Art in Brandversuchen zum Einsatz kommen.

Dabei wird zwischen

- Rohrleitungs-Gasbrenner (ISO 13785-2 [71], CAN/ULC-S134-13 [21] und NFPA 285 [108])
- und Kompakt-Gasbrenner (DIN 4102-20 [32])

unterschieden.

Gemäß Riese [117] sind für Gasbrenner Leistungen über 10 MW möglich, jedoch schränken Wilk et al. [140] die Leistung von Kompakt-Gasbrenner ab ca. 3 MW teilweise ein, da darüber liegende Leistungen technologisch nur sehr schwierig zu gewährleisten sind.

Die einzelnen Gasbrennertypen funktionieren prinzipiell auf ähnlicher Weise. Die Zuführung des Gases kann aus der Gasphase (z. B. Erdgas) oder der Flüssigphase (z. B. Propangas) erfolgen. Die erforderliche Wärmefreisetzungsrate wird durch die Größe und Anzahl der Auslässe im Leitungssystem und der Steuerung des Massenstroms erreicht. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Propangaszufuhr über eine definierte Prüfzeit sind für groß skalierte Brandversuche in der Regel Flüssiggastanks erforderlich.

In der Prüfnorm gemäß ISO 13785-2 [71] wird ein Gaszufluss in der Vollbrandphase von 120 g/s über 15 Minuten gefordert (vgl. Abbildung 2-11). Einschließlich der linearen Anstiegs- und Abfallrate über jeweils 5 Minuten entspricht dies einer vorzuhaltenden Brennstoffmasse von 144 kg Propangas pro Brandversuch. Dies entspricht bei einer Dichte von ca. 0,51 kg/l einem notwendigen Volumen eines Flüssiggastanks von mindestens 282 Liter pro Brandversuch. Hinzu kommen aufwändige Technik zur Regulierung und Messung des Massenstroms sowie sicherheitstechnische Vorrichtungen. Des Weiteren sind bei niedrigen Temperaturen auch notwendige Vorkehrungen gegen „Vereisung“ des Tank- und Rohrleitungssystems vorzusehen, da „Vereisungen“ grundsätzlich auch über dem Gefrierpunkt auftreten können.

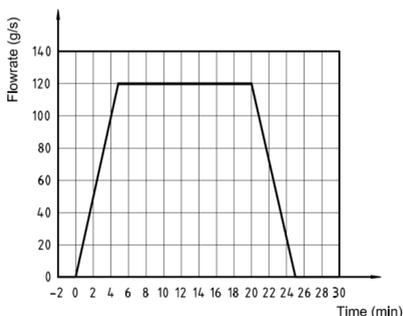


Abbildung 2-11: Notwendiger Gasdurchsatz für den Gasbrenner im groß skalierten Brandversuch gemäß ISO 13785-2 [71]

Die vorzuhaltenden Gasmengen reduzieren sich grundsätzlich bei geringeren, notwendigen Wärmefreisetzungen. Unabhängig davon bleiben bei groß skalierten Brandversuchen die erforderlichen Wärmefreisetzungsraten auf einem Level, welche die Vorhaltung eines Gastanks notwendig machen, weshalb groß skalierte Brandversuche mit einem Gasbrenner als technologisch sehr aufwändig zu betrachten sind.

Die Abbildung 2-12 zeigt die Ausführung als Kompakt-Gasbrenner mit einem zusätzlichen Kiesbett oberhalb des Gas- und Luftleitungssystems. Dabei strömt das Propangas von unten in eine rechteckige, mit Kies gefüllte Wanne und wird durch ein Prallblech und die Kiesschüttung gleichmäßig verteilt.



Abbildung 2-12: Darstellung des Gasbrenners mit einem oberhalb abschließenden Kiesbett zur Verteilung der Flamme auf die Grundfläche im skalierten Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32]

Zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate kann die Gleichung Gl. (2-1) zu Grunde gelegt werden. Dabei ist lediglich die Massenabnahme durch den Massenstrom zu ersetzen. Wiederholte Kalibrierungsversuche [92] an der MFPA Leipzig beim Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] haben gezeigt, dass ein konstanter Gasdurchsatz bei mittel skalierten Brandversuchen erzielbar ist und somit eine konstante reproduzierbare Wärmefreisetzungsrate gewährleistet werden kann.

2.5.4 Holzkrippe

Holzkrippen haben im Brandschutzingenieurwesen eine lange Historie. Grund dafür ist u. a. eine gute Reproduzierbarkeit von Raumbränden. Dies spiegelt sich in einer Vielzahl an durchgeführten Raumbrandversuchen mit Holzkrippen und deren Vergleich von

Raumbrandversuchen mit wohntypischen Möblierungen ([76], [140]). Die Reproduzierbarkeit im Zusammenhang mit dem Abbrand im Fassadenprüfstand ist jedoch zum Teil kritischer zu betrachten ([3], [46], [132]), da insbesondere das Stabilitätsversagen und die inkonstanten Wärmefreisetzungsraten in der Vollbrandphase der einzelnen Holzkrippe signifikanten Einfluss auf die thermische Beanspruchung der Außenwandbekleidungen nehmen kann.

Für die Untersuchung von Brandbeanspruchungen von Außenwandbekleidungen im groß skalierten Brandversuch werden Holzrippen mit einer eingesetzten Masse von 30 kg bis 650 kg vorgesehen. Die Holzrippen werden entweder als einzelne Holzrippen mit einer eingesetzten Masse von 200 kg (MVV TB [107]), 300 kg (LEPIR 2 [115]), 300 - 478 kg (BS 8141-1/-2 ([19], [20])) und 650 kg (MSZ 14800-6 [103]) oder als Verbund in der ISO 13785-2 [71] Prüfung mit 9 x 30 kg verwendet.

Holzrippen werden aus quadratischen oder rechteckigen Holzstäben zusammengesetzt. Diese sind aufgrund Ihres Stab-Luft-Verhältnisses als gut ventiliert zu betrachten und bilden beim Abbrand in den Hohlräumen eine Art „Kamineffekt“ aus. Durch die offene Stabkonstruktion kann Verbrennungsluft von unten und den Seiten eintreten und erzeugt dadurch ein intensives Brennen im Inneren der Holzkrippe. In Abbildung 2-13 sind die wesentlichen geometrischen Merkmale einer Holzkrippe, die insbesondere Berücksichtigung bei empirisch ermittelten Gleichungen zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate Verwendung finden, dargestellt.

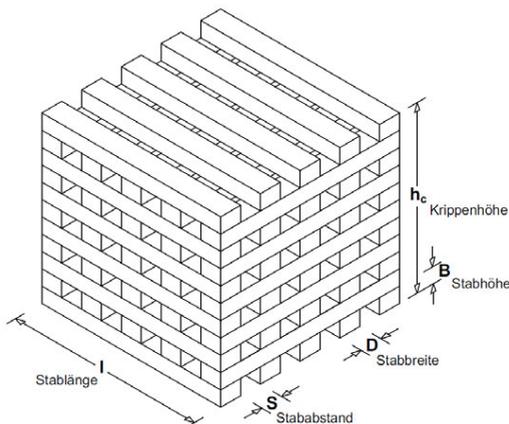


Abbildung 2-13: Geometrische Anordnung der Holzkrippe

Neben den geometrischen Randbedingungen sind als weitere Einflussfaktoren beim Abbrand und daraus resultierend bei der Energiefreisetzung die wirksame, brennbare Holzoberfläche, der Heizwert bzw. die effektive Verbrennungswärme in Abhängigkeit des

verwendeten Holzes, die Ventilation und die Masse zu benennen. Witterungseinflüsse durch z. B. Wind oder die Holzfeuchtigkeit beeinflussen den Abbrand und können die Reproduzierbarkeit beeinflussen.

Zur Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate von Holzkruppen werden in dieser Arbeit drei empirisch hergeleitete Ansätze herangezogen:

- Verfahren gemäß Brand in Räumen (BiR) ([132], [133]),
- Verfahren gemäß Hagen [63] und
- Verfahren gemäß SFPE Handbook (SFPE) [10].

Die Berechnungsverfahren für die Ermittlungen der Wärmefreisetzungsrate der drei benannten Verfahren sind in Anlage B dargestellt. Bei den Verfahren wird, wie in Abbildung 2-14 dargestellt, zwischen der Brandentwicklungs-, der Vollbrand- und der Abklingphase unterschieden. Für die Brandentwicklungsphase kann für Holzkruppen gemäß BiR [133] in guter Näherung der t^2 -Ansatz gemäß Gl. (10-1) mit $t_0 = 250$ s aus dem vfdb-Leitfaden [67] angesetzt werden. Die Abklingphase für Holzkruppen lässt sich über die Gl. (10-3) beschreiben. Der Anteil der abnehmenden Brandentwicklung pro Zeitschritt kann für Holzkruppen in guter Näherung mit 0,04 angesetzt werden.

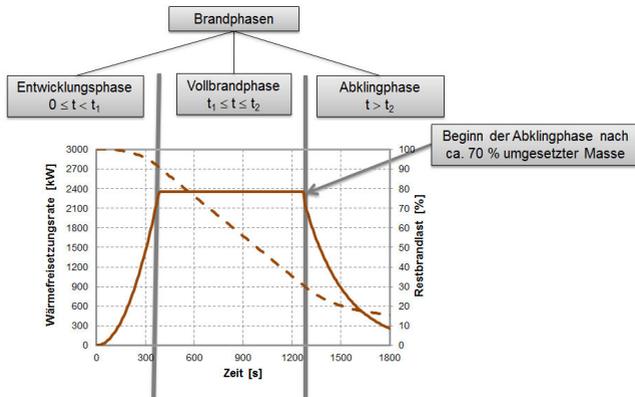


Abbildung 2-14: Darstellung der drei Brandphasen am Beispiel einer Holzkruppe mit einer Gesamtmasse von 200 kg gemäß Berechnungsverfahren aus BiR [133]

Die empirischen Ansätze der Brandentwicklungs- und der Abklingphase gemäß BiR [133] zeigen im Vergleich zu den experimentell untersuchten Holzkruppen im Brandversuch nach Tabelle 2-8 die größten Übereinstimmungen und werden für die Bestimmung der Verlaufskurven für alle drei betrachteten Verfahren angewendet.

Tabelle 2-8: Zusammenstellung der wesentlichen Parameter der untersuchten Holzkippen mit einer Masse von 200 kg und 400 kg

Bezeichnung und Quelle	Maße Krippe [m] b x l x h _c	Maße Stab [m] D x B	Masse [kg]	Stab / Luft	H _u [MJ/kg]	Zündinitial	Lage
BiR_1 [132]	1,0 x 1,0 x 1,0	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	mittig vor Prüfstand
BiR_2 [132]	1,0 x 1,0 x 1,0	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	mittig vor Prüfstand
BiR_3 [132]	1,0 x 1,0 x 1,0	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Prüfstandsecke
BiR_4 [132]	1,0 x 1,0 x 1,0	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Prüfstandsecke
BS_1 [110]	1,0 x 1,0 x 1,0	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	3 x Stahlwanne á 200 ml Methanol	mittig vor Prüfstand
Kali1 [94]	1,1 x 1,1 x 0,72	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Prüfstandsecke
Kali2 [95]	1,1 x 1,1 x 0,72	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Prüfstandsecke
KaliA [100]	1,1 x 1,1 x 0,72	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Prüfstandsecke
KaliB [101]	1,1 x 1,1 x 0,72	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Prüfstandsecke
KaliC [102]	1,1 x 1,1 x 0,72	0,04 x 0,04	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Prüfstandsecke
BS_KOT [78]	1,5 x 1,0 x 1,1	0,05 x 0,05	400 kg	1/1	17,28	6 x Stahlwanne á 200 ml Isopropanol	in Brandkammer
BS_CRO [3]	1,5 x 1,0 x 1,0	0,05 x 0,05	395 kg	1/1	17,28	ohne Angabe	in Brandkammer

In Abbildung 2-15 sind insgesamt zehn Wärmefreisetzungsdaten von Holzkippen mit einer Masse von 200 kg und in Abbildung 2-16 zwei Holzkippen mit einer Masse von 400 kg aus experimentellen Versuchen von einzelnen Holzkippen zusammenfassend dargestellt. Auf Grundlage der Verlaufskurven der Wärmefreisetzungsrate ist für die Verwendung bei groß skalierten Brandversuchen für die Prüfung von Außenwandbekleidungen keine ausreichende Reproduzierbarkeit der Holzkippenbrände hinsichtlich der Wärmefreisetzungsrate für die

Vollbrandphase festzustellen. Die Brandentwicklungs- und Abklingphase zeigen unabhängig davon insgesamt eine gute Übereinstimmung bzw. Reproduzierbarkeit der Brandversuche.

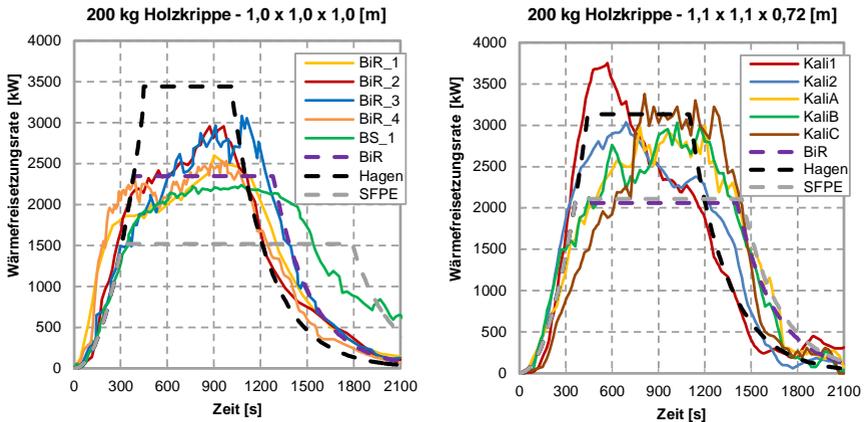


Abbildung 2-15: Wärmefreisetzungsrate für Holzkrippen aus Fichtenholz im Fassadenprüfstand mit einer Masse von 200 kg sowie Gegenüberstellung der empirischen Ansätze nach Brand in Räumen (BiR), Hagen, SFPE-Handbuch [10]

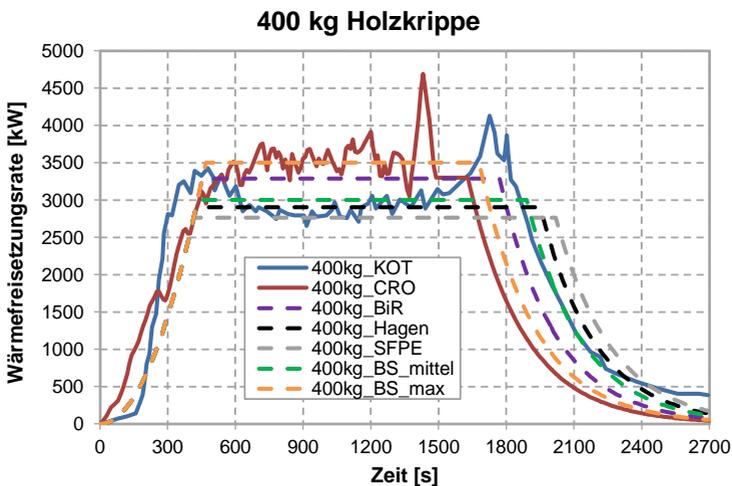


Abbildung 2-16: Wärmefreisetzungsrate für Holzkrippen aus Nadelholz (Fichte und Kiefer) sowie ergänzend die Kurven der empirischen Ansätze nach Brand in Räumen (BiR), Hagen, SFPE-Handbuch, und die mittlere und max. zu erwartende Wärmefreisetzungsrate gemäß BS 8414-1/-2 ([19], [20])

Der Holzkrippenversuch am IBMB Braunschweig (BS_1) gemäß [110] zeigt auf, dass ein niedrigeres Zündinitial Einfluss auf den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate nehmen kann und ggf. die Abbrandrate pro Zeiteinheit in der Vollbrandphase reduziert. Die Abbildung 2-15 zeigt den Einfluss einer geänderten Krippengeometrie bei gleicher Gesamtmasse auf den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate. Dabei erzielen die flacheren Holzkrippen mit einer größeren Grundfläche bei gleicher Masse eine höhere Wärmefreisetzungsrate in der Vollbrandphase, als die höheren Holzkrippen mit einer geringeren Grundfläche.

Die Gegenüberstellung der empirischen Gleichungsansätze für die Vollbrandphase gemäß BiR ([132], [133]), Hagen [63] und SFPE [10] mit den experimentellen Ergebnissen in Abbildung 2-15 zeigen deutlich, dass der Ansatz nach BiR ([132], [133]) für die 200 kg Holzkrippe mit den Außenabmessungen 1 m x 1 m x 1 m und für die 400 kg Holzkrippe mit den Außenabmessungen 1,5 m x 1,0 m x 1,1 m die größte Übereinstimmung aufweist. Bei der 200 kg Holzkrippe mit den Außenabmessungen 1,1 m x 1,1 m x 0,72 m zeigt lediglich der Ansatz gemäß Hagen [63] ein plausibles Ergebnis auf.

Für den Abbrand der untersuchten Holzkrippen mit einem Stab-Luft-Verhältnis von 1:1 lassen sich folgende wesentliche Einflussfaktoren zusammenfassen:

- Holzfeuchte,
- Zündinitial,
- Geometrie,
- Ventilationsbedingungen,
- Rissbildung des Holzes,
- eff. Heizwert des Holzes,
- Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und Wärmespeicherkapazität des Holzes sowie
- Standsicherheit (Nagelung, Auflagerung, Aussteifung).

Die genannten Faktoren zeigen den komplexen Zusammenhang des Brandverhaltens von einzelnen Holzkrippen und verdeutlichen damit, die Problematik einer direkten Verbrennungsmodellierung bei Brandsimulationen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wird in den nachfolgenden Simulationen im Kapitel 5, 6 und 7 der Ansatz der direkten Vorgabe der Wärmefreisetzungsrate für die Brandversuche, auf Basis der im Experiment gemessenen Wärmefreisetzungsrate oder auf Grundlage der empirischen Gleichungen zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate für die Holzkrippen, verfolgt.

Gemäß BiR [133] wird bei der Anwendung von Bemessungsverfahren empfohlen, die Wärmefreisetzungsrate für einzelne brennende Gegenstände entweder über die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate q_{aG} oder die spezifische Wärmefreisetzungsrate q_{aA} anzusetzen. Der Unterschied liegt entsprechend Abbildung 2-17 darin, dass die Brandleistung in der Projizierung der brennbar wirksamen Fläche idealisiert, auf die

Grundfläche q_{aG} in kW/m^2 oder auf die seitlichen und die obere Außenfläche einer Holzkrippe durch q_{aA} in kW/m^2 , abgebildet wird.

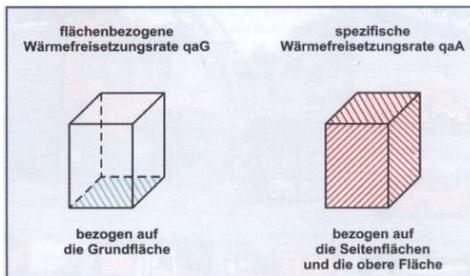


Abbildung 2-17: Flächenbezüge zur Bestimmung von Wärmefreisetzungsraten in kW/m^2 [133]

Aufgrund der aufwärtsgerichteten Durchströmung der Holzkrippe wird ca. 30 % mehr Energie des wirksamen konvektiven Heißgasstroms auf der oberen Fläche als über die Seitenflächen freigesetzt [132]. Die Abbildung 2-18 zeigt die Temperaturverteilung aus einer Datenaufnahme einer Wärmebildkamera einer Holzkrippe zum Ende der Vollbrandphase aus der die anteilige Wärmeabgabe u. a. abgeleitet wurde. Zur Simulation von quadratisch oder rechteckigen Holzkrippen wird aufgrund der zu konstruierenden Flammene Ausbildung eine Aufteilung der spezifischen Wärmefreisetzungsrate q_{aA} von 130 % oben und 70 % auf die Seitenflächen empfohlen [132]. Aufgrund der Reduzierung der insgesamt wirkenden Wärmefreisetzungsrate kann es theoretisch zu einer geringfügigen Unterschätzung der Strahlungswirkung im Bereich der Holzkrippen kommen, welche jedoch durch die Frischlufteinmischung und den daraus resultierenden Energieverlusten innerhalb der Holzkrippe ausgeglichen wird.

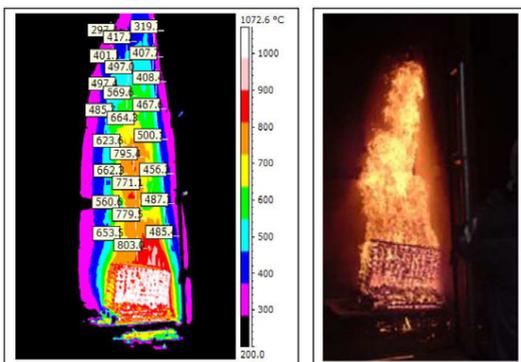


Abbildung 2-18: Gegenüberstellung der Aufnahme aus der Wärmebildkamera und der visuellen Aufnahme des Holzkruppenversuch in der Vollbrandphase nach BiR_3 [134]

2.5.5 Poolfeuer

Ein Poolfeuer ist ein Brand von verflüssigten Gasen oder brennbaren Flüssigkeiten in einem offenen Behälter, der eine turbulente Diffusionsflamme aufweist. Als Behälter werden in der Regel Stahlwannen verwendet. Die Verbrennungsreaktion findet ausschließlich an der Oberfläche statt, da sich der Brennstoff dort erst mit Sauerstoff vermischt. In Prüfeinrichtungen werden als Brennstoff z. B. Methanol, Isopropanol oder Heptan verwendet. Aufgrund der unterschiedlichen Heizwerte, Verbrennungswärme und Strahlungswirkung unterscheiden sich die benannten Brennstoffe bei gleicher Füllmenge insbesondere in Ihrer Abbrandrate und ihrer Intensität erheblich.

Die Abbrandrate hängt zudem vom Durchmesser D der Brandfläche, dem Untergrund, der Geometrie, den Materialeigenschaften der Umfassungsbauteile und den Lüftungsverhältnissen ab. Weitere Einflussfaktoren zur Bestimmung der Abbrandrate lassen sich Kapitel 4 entnehmen.

Die Brennzeit lässt sich in Abhängigkeit der Abbrandrate vom Füllstand regulieren. Poolfeuer in einzelnen Wannen ergeben grundsätzlich eine höhere Abbrandrate als der Abbrand gleicher Fläche in mehreren kleineren Wannen [140]. Die Abbildung 2-19 zeigt die Wärmefreisetzungsrate von Poolfeuern mit dem Brennstoff Methanol und Isopropanol. Besonders deutlich wird dabei die deutlich höhere Brandintensität von Isopropanol gegenüber Methanol.

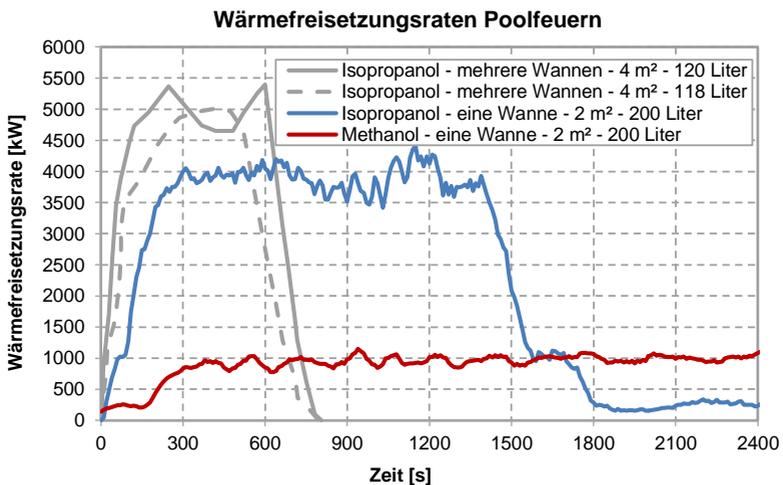


Abbildung 2-19: Wärmefreisetzungsraten von Poolfeuern bei unterschiedlichen Anzahl und Größe der Stahlwannen

Die Brandausbreitung auf der Oberfläche eines Poolfeuers erfolgt innerhalb weniger Sekunden über die gesamte Fläche [63]. Die Anstiegsrate der Wärmefreisetzungsrate bis zum Erreichen der Vollbrandphase liegt über der „sehr schnellen Brandausbreitung“ gemäß DIN EN 1992-1-2/NA [38], weshalb t_g bei kleiner 75 s liegt [140]. Aus diesem Grund ist für die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate die Vollbrandphase wesentlich.

Unter Betrachtung gleichwertiger experimenteller Randbedingungen weist das Poolfeuer eine gute Reproduzierbarkeit auf. Insbesondere Isopropanol zeichnet sich durch seine Leistungseffektivität aufgrund des hohen Heizwertes sowie der hohen Strahlungsintensität bei gleichzeitiger guter Reproduzierbarkeit aus.

2.6 Zusammenfassung

Die Prüfung von Außenwandbekleidungen für ein Raumbrandszenario erfolgt national im mittel skalierten Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32]. Durch die Skalierung des Prüffeuers kann die Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen gegenüber einer repräsentativen Naturbrandbeanspruchung für das Raumbrandszenario aufgrund des veränderten Brandverhaltens von Außenwandbekleidung gegenüber groß skalierten Brandversuchen unterschätzt werden.

Auf Grundlage der empfohlenen Hilfsfristen gemäß AGBF kann im Regelfall innerhalb von 20 Minuten nach Brandentdeckung und Brandmeldung mit dem Beginn wirksamer Löscharbeiten gerechnet werden. Das Stadium der Brandphase zum Zeitpunkt der Brandentdeckung kann dabei nicht eingegrenzt werden. Die aktuellen nationalen Brandprüfungen von Außenwandbekleidungen für das Raumbrand- und das Sockelbrandszenario gemäß DIN 4102-20 [32] und MVV TB [107] berücksichtigen eine Prüfdauer von ca. 20 Minuten in der Vollbrandphase, was hinsichtlich der Prüfdauer aus bauordnungsrechtlicher Sicht als ausreichend sicher zu betrachten ist ([88], [90]).

Europa- und weltweit werden Prüfungen von Außenwandbekleidungen entweder nur in klein skalierten Brandversuchen (Laborversuch) oder zusätzlich im mittel oder groß skalierten Brandversuch durchgeführt. Wesentliche Merkmale zur Differenzierung der Prüfstände im groß skalierten Brandversuch sind das Prüffeuer, die Ausbildung der Brandkammer oder des Brandraums, die Prüfstandgeometrie und die Prüfdauer. Diese Merkmale werden im Weiteren auf Ihre Einflussnahme bei ausgewählten Prüfständen im groß skalierten Brandversuch untersucht, um Lösungsansätze für ein zu entwickelndes Prüfverfahren zu erarbeiten.

Die drei wesentlichen betrachteten Prüffeuer im Rahmen dieser Arbeit sind der Gasbrenner, die Holzkrippe und das Poolfeuer. Das Poolfeuer und der Gasbrenner können eine gute Reproduzierbarkeit gewährleisten, wobei das Poolfeuer technologisch einen geringeren Aufwand bei der Bereitstellung und Umsetzung im Brandversuch aufweist. Die Reproduzierbarkeit einer einzelnen Holzkrippe wird aufgrund der inkonstanten Wärmefreisetzungsraten in der Vollbrandphase und der Krippenstabilität im Brandversuch als kritisch betrachtet. Hierzu sind weitere Auswertungen aus experimentellen Brandversuchen zu betrachten, um die Eignung für ein Prüfverfahren am Fassadenprüfstand schlussendlich beurteilen zu können.

3 Bestimmung der maßgebenden Brandbeanspruchung für Außenwandbekleidungen – Raumbrandszenario

3.1 Einführung

Aus Sicht des abwehrenden Brandschutzes ist der „kritische Wohnungsbrand“ das maßgebende Brandszenario zur Bestimmung der Hilfsfristen und daraus resultierend für die Feuerwehrbedarfsplanungen [121]. Auch aus bauordnungsrechtlicher Sicht ist dieses Brandszenario für die Bestimmung der Brandbeanspruchung einer Außenwandbekleidung infolge eines Raumbrandes bei der Entwicklung eines Prüfstandes als maßgebend zu bewerten (vgl. Abschnitt 2.3.5.4).

In den nachfolgenden Untersuchungen wird die Brandbeanspruchung auf eine Außenwand durch eine von Brandbeginn oder in Folge der thermischen Einwirkung offenstehende Brandraumöffnung infolge eines Raumbrandes bestimmt. Das schlussendliche Ziel der Untersuchung ist die Ableitung einer kritischen und maßgebenden thermischen Beanspruchung infolge eines Raumbrandes auf die Außenwand auf Grundlage von analytischen Berechnungsverfahren, sodass mit Hilfe dieser ein repräsentatives Prüfffeuer für einen zu entwickelnden Prüfstand bestimmt werden kann. Aus diesem Grund werden im Weiteren die Untersuchungen und Versuchsergebnisse, die einen Beitrag zum Lösungsansatz dieser Fragestellung bringen, vorgestellt und angewendet.

3.2 Grundlagen

Grundsätzlich können bei einem Raumbrand Heißgasströme über die Brandraumöffnung austreten. Der Heißgasstrom wird bei entsprechenden Energiegehalt und Temperaturen durch das Erscheinungsbild der Flamme begleitet. Die Temperaturen an der Flammenspitze wurden gemäß [76] mit ca. 500 °C und gemäß [138] zwischen 510 °C und 540 °C bestimmt. Die Emissivität der Flamme vor der Außenwand wurde experimentell zwischen 0,7 und 0,9 und die der Heißgase oberhalb der Flamme bei Temperaturen zwischen 300 °C und 550 °C mit ca. 0,25 ermittelt [138]. Die visuell wahrzunehmende Flamme oberhalb der Brandraumöffnung ist somit als strahlender Flammenkörper aufgrund seines Emissionsgrades und seiner Temperaturen als maßgebender Bereich für die thermische Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen zu betrachten. Die Strahlungswirkung durch die Flamme ist dabei für die Brandbeanspruchung der Außenwand maßgebend [138].

Das Regelszenario für die thermische Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen bezieht sich auf einen Brand einer Flamme an einer Brandraumöffnung, die von Beginn an offen ist.

Wesentliche Erkenntnisse zur Bestimmung der Brandbeanspruchung von Außenwänden sind aus der Artikelreihe „Brand in Räumen“ (BiR) Teil 4 bis 7 und 9 aus den Jahren 2014 bis 2017 zu entnehmen ([136] bis [141]). Für die Untersuchung der Flammenwirkung an der Bauwerksöffnung infolge eines Raumbrands sind in BiR [138] insgesamt 70 Raumbrandversuche, durchgeführt an der MFPA Leipzig, zu Grunde gelegt worden. Die Raumgrößen der Brandversuche lagen bei 5 m², 12 m², 18 m² bis 20 m² und 40 m² bei gleichzeitigen Raumhöhen von 2,8 m bis 3,2 m. Insgesamt wurden die Brandversuche an 49 möblierten sowie an 21 mit Holzkrippen ausgestatteten Brandräumen durchgeführt. Für die Betrachtung der Flammenwirkung vor der Außenwand konnte eine gute Überstimmung zwischen Brandräumen mit Möbelbrandlasten und Holzkrippen aufgezeigt werden, sodass die vollständige Versuchsreihe in die Auswertungen mit einbezogen werden konnte. Ergänzend werden die Ergebnisse aus Raum- und Wohnungsbrandversuchen an zwei leerstehenden Wohngebäuden in Bad Salzungen und Merkers herangezogen. Weitere bedeutsame Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen sind den Lehrter Brandversuchen [76] mit insgesamt 13 Raumbrandversuchen, den Untersuchungen durch Kotthoff [91] mit insgesamt 11 Raumbrandversuchen sowie den Auswertungen von Oleszkiewicz [112] zu 19 Raumbrandversuchen an einem dreigeschossigen Fassadenprüfstand zu entnehmen.

Die thermische Beanspruchung einer Außenwandbekleidung infolge eines Raumbrandes durch einen Heißgasstrom oberhalb einer Brandraumöffnung wird durch eine Vielzahl von brandtechnischen und geometrischen Faktoren sowie von den vorherrschenden

Witterungsbedingungen beeinflusst. Thiel [127] hat die Zusammenhänge im Zuge seiner Auswertungen entsprechend der Abbildung 3-1 dargestellt.

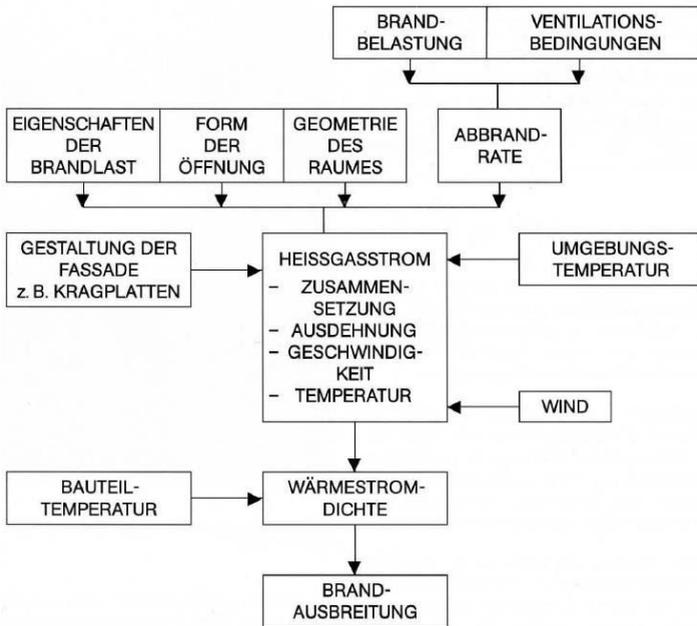


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Einflüsse auf die thermische Beanspruchung von Fassaden infolge eines Raumbrandes gemäß [127]

Die Brandwirkung auf eine Außenwand durch einen räumlich und brandtechnisch abgetrennten Raumbrand ist grundsätzlich als maßgebend zu betrachten, da bei geschlossenen Raumtüren in der Vollbrandphase die größte thermische Beanspruchung an der Außenwand über eine offenstehende oder im Zuge des Brandverlaufs versagende Brandraumöffnung zu erwarten ist. Durch weitere offenstehende oder versagende innenliegende Wohnraumtüren oder Brandraumöffnungen an einer Außenwand kann sich das Strömungsbild im Brandraum und die Wärmeabgabe an den einzelnen Brandraumöffnungen wesentlich verändern [80].

Gemäß BiR [139] wurde bei Brandversuchen an Wohngebäuden mit mehreren Brandraumöffnungen festgestellt, dass sich die Wärmefreisetzungsrates unabhängig von der Öffnungsgröße näherungsweise gleichmäßig auf die einzelnen Öffnungen verteilt.

3.3 Brandtechnische Parameter

3.3.1 Bemessung der Brandlastdichte

Die Brandlastdichte kann entsprechend dem EC 1-1-2/NA [38] für Gebäude mit Wohnnutzung bei einem 90 %-Quantil mit einer Brandlastdichte von 1085 MJ/m² angesetzt werden und findet entsprechend den Berechnungsansätzen der Eurocodes Berücksichtigung bei der Branddauer und dem Verlauf der Brandraumtemperatur. In BiR wurde auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen festgestellt, dass bei typischen möblierten Wohnräumen eine moderate Brandlastdichte von 425 bis 700 MJ/m² vorherrschend ist [138]. Der Ansatz gemäß den Eurocodes liegt somit auf der sicheren Seite und ist als konservativ zu betrachten.

Die Untersuchungen in BiR [141] bestätigen auch, dass es keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Brandlastdichte und der maximalen Wärmefreisetzung gibt. Dies wurde bei Raumbränden mit typischer Möbelausstattung aber auch mit Holzkrippen festgestellt.

Entsprechend den Untersuchungen von Bechtold [13] konnte bei Untersuchungen von Raumbränden mit Mischbrandlasten im Verhältnis Holz zu Kunststoff mit 80 % zu 20 % gegenüber reinen Holzbrandlasten mit einer gleichen Brandlastdichte festgestellt werden, dass der Kunststoffanteil bei der Verbrennung Einfluss auf die gemessenen Temperaturen an Thermoelementen und auf Bauteiloberflächen im Brandraum hatte. Die Ergebnisse zeigten eine Temperaturerhöhung am Bauteil bei den Brandversuchen mit Mischbrandlasten gegenüber den Brandversuchen mit reinen Holzbrandlasten von bis zu $\Delta\theta = 160\text{ °C}$, was hauptsächlich auf den höheren Wärmeübergang vom Heißgasstrom auf das Bauteil infolge Strahlung zurückzuführen ist. Ähnliche Erkenntnisse zur Temperaturentwicklung von Mischbrandlasten ergeben sich aus dem Untersuchungsbericht gemäß [7] am Beispiel von Holzkrippen im Vergleich mit Krippen aus Holz- und Kunststoffstäben. Die höhere Strahlungswirkung durch Kunststoffe wird geprägt durch den höheren Rußanteil sowohl bei brandlast- als auch ventilationsgesteuerten Bränden sowie durch die chemische Zusammensetzung von Kunststoffen mit einem höheren Anteil an freigesetzten CO und CO₂ bei der Verbrennung (vgl. z. B. vfdB-Leitfaden Kapitel 8 [67]). Auch eine schnellere Brandausbreitung ist durch eine moderne Ausstattung mit erhöhtem Kunststoffanteil möglich [12].

3.3.2 Wärmefreisetzungsrate im Brandraum

Der Brand in einem Raum verläuft in der Brandentstehungsphase zuerst unabhängig von der Raumgröße und der Größe der Ventilationsöffnungen. Mit zunehmender Branddauer nimmt der Einfluss der Ventilationsbedingungen zu. Die Vollbrandphase bei einem typischen

Wohnungsbrand wird hinsichtlich Größe und Dauer neben der Grundfläche im Wesentlichen von den Ventilationsbedingungen und der Abbrandrate der Brandlast bestimmt.

Zur Bestimmung der vorherrschenden Wärmefreisetzungsrate in einem Brandraum ist gemäß vfdb-Leitfaden [67] bzw. EC 1-1-2/NA [38] die minimale Wärmefreisetzungsrate unter Betrachtung eines ventilations- oder brandlaststeuerten Bemessungsbrandes maßgebend.

3.3.3 Wärmeabgabe über die Brandraumöffnung

Die Wärmefreisetzungsrate im Brandraum bestimmt im Zusammenhang mit der Raum- und Öffnungsgeometrie maßgebend die Brandbeanspruchung der Außenwandbekleidung durch eine Brandraumöffnung [13]. Bei der Auswertung von insgesamt 48 Brandversuchen nach [141] konnte der Anteil der Wärmeabgabe an der Brandraumöffnung in den Grenzen zwischen 24 % bis 36 % der insgesamt im Brandraum vorherrschenden Wärmefreisetzungsrate bestimmt werden. Ausgenommen davon sind Versuche mit einer zusätzlichen brennbaren Wand- und Deckenbekleidung, bei denen ca. 46 % der gesamten Wärmefreisetzungsrate an der Brandraumöffnung bei Raumbrandversuchen auftraten [140]. Für den Regelbrandfall mit Wand und Deckenflächen aus mineralischen, nichtbrennbaren Baustoffen lässt sich in guter Näherung festlegen, dass ca. 1/3 der maximalen Wärmefreisetzungsrate im Brandraum an der Brandraumöffnung austreten. Die übrige Wärmeenergie wird zur Erwärmung der einströmenden Außenluft in den Brandraum und der Umfassungsbauteile aufgewendet. Ein geringer Anteil geht über die Strahlungsverluste durch die Brandraumöffnungen verloren.

3.3.4 Branddauer

Entsprechend den Bemessungsregeln für Naturbrände gemäß EC 1-1-2/NA Anhang A-A [38] bestimmt im Wesentlichen die Masse an Brandlast und somit die Brandlastdichte die Branddauer. Dies kann auch auf Grundlage der Untersuchungen gemäß [141] bestätigt werden. Die Flamme an der Brandraumöffnung bei Raumgrößen bis zu 40 m² konnte auf Grundlage von 61 Brandversuchen entsprechend Abbildung 3-2 mit einem Zeitraum bis zu ca. 30 Minuten beobachtet werden. Unter Berücksichtigung des Bemessungswertes der Brandlastdichte bei Wohnnutzung gemäß EC 1-1-2/NA [38] sind bei Räumen bis zu 40 m² rechnerisch Branddauern über 40 Minuten möglich.

Anhand Abbildung 3-2 wird aber auch deutlich, dass bei ca. 3/4 der untersuchten Brände mit moderaten Brandlastdichten die Flammeneerscheinungen an der Brandraumöffnung bei einer Zeitdauer von maximal 20 Minuten liegen.

Gemäß BiR [138] wurden Flammen vor der Fassade nach Auswertung von 46 Möbelbrandversuchen erst nach Eintritt eines möglichen Flashovers oder teilweise erst mit Eintritt der

Vollbrandphase beobachtet. Die Endzeit der Flammen vor der Fassade tritt in der Regel kurz nach Beginn der Abklingphase und nach Umsetzung von ca. 70 % der Brandlast auf.

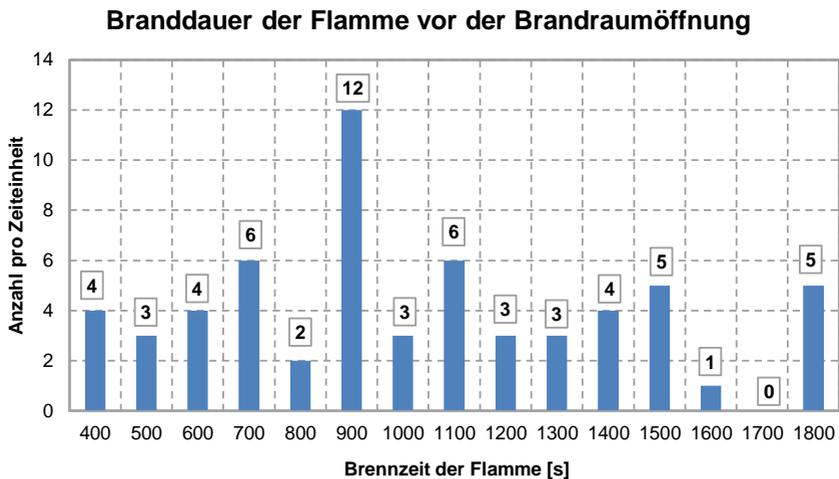


Abbildung 3-2: Brennzeit der Flamme an der Brandraumöffnung von insgesamt 61 Baumbrandversuchen [138]

3.4 Einfluss geometrischer Randbedingungen des Brandraums

3.4.1 Form der Öffnungen und resultierender Heißgasstrom

Gemäß Bechtold [13] hat die Geometrie der Öffnungsfläche Einfluss auf die Ausbildung der Flamme oberhalb der Brandraumöffnung. Unter Betrachtung einer gleichbleibenden geometrischen Raumfläche legt sich der Heißgasstrom bei breiteren Öffnungen gegenüber schmalen und hohen Öffnungen näher an die Außenwand an. Die Aussage deckt sich mit den Annahmen aus den Bemessungsvorschriften gemäß EC 1-1-2 Anhang B [37]. Entsprechend EC 1-1-2 Bild B.2 [37] legt sich die Flamme erst bei einem Verhältnis der Öffnung Höhe $\leq 1,25$ x Breite an die Außenwand an.

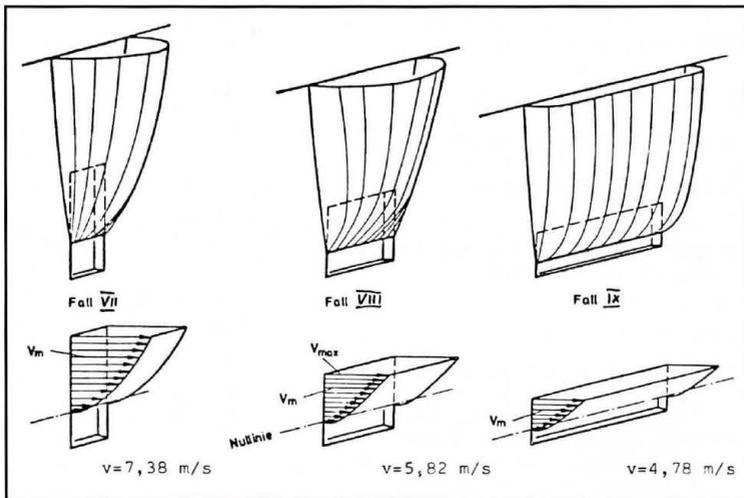


Abbildung 3-3: Möglicher Verlauf des Heißgasstroms und dem daraus resultierenden Flammenbild nach [13]

Zur Auswirkung der Fenstergeometrie auf die thermische Beanspruchung hat Oleszkiewicz [112] fundamentale Erkenntnisse geliefert. An einem dreigeschossigen Prüfstand mit einer geraden Außenwand ohne ECKEINFLUSS wurden insgesamt 11 Brandversuche durchgeführt. Die Abmessung des Brandraums waren $B \times L \times H = 5,95 \text{ m} \times 4,4 \text{ m} \times 2,75 \text{ m}$. Die Wand und Deckenbekleidungen wurden mit einer nichtbrennbaren Keramikfaserisolierung bekleidet, sodass die Wärmeverluste im Brandraum auf die Innenflächen wesentlich reduziert und eine höhere thermische Brandbeanspruchung an der Außenwand gegenüber massiv, mineralisch ausgeführten Umfassungsflächen im Brandraum erreicht werden konnte.

Die Wärmefreisetzungsrate wurde durch vier Rohrleitungs-Gasbrenner erzeugt und die Geometrie der Brandraumöffnung variiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-1 dargestellt.

Bei der Betrachtung der thermischen Beanspruchung auf die Außenwand wird deutlich, dass bei gleicher Wärmefreisetzungsrate breite Fenster mit einer geringeren Höhe eine größere thermische Beanspruchung auf die Außenwand erzeugen, als schmale Fenster mit einer großen Öffnungshöhe.

Auf Grundlage der Erkenntnisse zum Verlauf des Heißgasstroms und dem daraus resultierenden Flammenbild bei unterschiedlichen Öffnungsgeometrien wird deutlich, dass die Flamme bei breiten Fenstern aufgrund des Anlegens der Flammenachse unmittelbar auf die Außenwand und der breiteren Beanspruchungsfläche für die Brandbeanspruchung einer Außenwandbekleidung maßgebend werden kann.

Tabelle 3-1: Darstellung der Wärmestromdichte an einem dreigeschossigen Prüfstand unter Variation der Geometrie der Brandraumöffnung und der Wärmefreisetzungsrate im Brandraum nach [112]

Öffnungsmaße Fenster B x H [m]	Höhe über Fenster [m]	Einwirkende Wärmestromdichte [kW/m ²] bezogen auf die Wärmefreisetzungsrate:			
		5,5 MW	6,9 MW	8,6 MW	10,3 MW
0,94 x 2,00	0,5	43,9	58,6	75,5	-
	1,5	12,4	17,7	25,9	-
	2,5	7,7	9,9	15,9	-
	3,5	3,9	5,1	8,1	-
0,94 x 2,70	0,5	19,2	34,8	53,2	68,3
	1,5	6,3	10,4	15,9	23,2
	2,5	3,5	6,0	9,8	13,7
	3,5	1,7	3,0	4,8	6,7
2,60 x 1,37	0,5	24,5	53,2	104,3	208,7
	1,5	22,9	33,1	58,6	122,4
	2,5	13,2	17,2	51,2	103,9
	3,5	11,5	15,6	28,3	56,5
2,60 x 2,00	0,5	10,5	17,4	29,5	43,4
	1,5	5,2	9,4	14,8	20,8
	2,5	4,5	7,4	12,6	16,3
	3,5	2,9	5,4	8,2	9,6
2,60 x 2,70	0,5	6,5	11,4	17,4	29,1
	1,5	2,9	5,3	8,1	12,8
	2,5	2,0	4,2	5,7	9,1
	3,5	1,4	2,9	3,6	5,6

Duny [49] hat in seiner Dissertation Untersuchungen zur Auswirkungen der thermischen Beanspruchung durch einen Brandraum auf eine Außenwand von zwei nebeneinander liegenden Brandraumöffnungen $B \times H = 1,3 \text{ m} \times 1,4 \text{ m}$ im Abstand von 20 cm, 40 cm und 60 cm gegenüber einer einzelnen Brandraumöffnung $B \times H = 2,6 \text{ m} \times 1,4 \text{ m}$ mit gleicher Höhe und Öffnungsfläche durchgeführt.

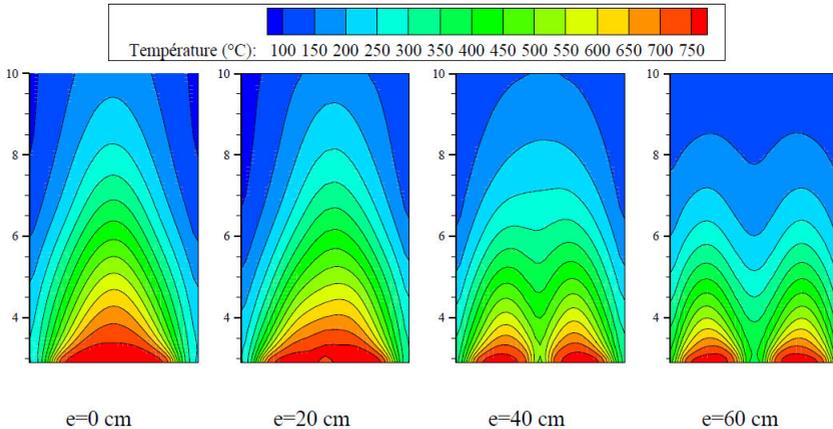


Abbildung 3-4: Isothermen Darstellung von unterschiedlichen Öffnungsabständen von zwei nebeneinanderliegenden Brandraumöffnungen gegenüber einer Öffnungsfläche mit gleicher Höhe und Öffnungsfläche [49]

Die Abbildung 3-4 verdeutlicht, dass mit zunehmendem Abstand e der Fensteröffnungen untereinander die Umgebungslufteinmischung in den Heißgasstrom zunimmt und die thermische Einwirkung über die Höhe reduziert wird. Die thermische Beanspruchung der Außenwand nimmt bei gleicher Wärmefreisetzung im Brandraum bei Vorhandensein zweier Brandöffnungen mit der gleichen Öffnungsfläche und Höhe gegenüber einer einzelnen Brandraumöffnung ab.

3.4.2 Einfluss der Brandraumgeometrie

Die Abbildung 3-5 auf Grundlage der Lehrter Brandversuche [76] und der Brandversuche in Metz [5] zeigen die Auswirkung der Brandraumhöhe auf die Flammenlänge an der Außenwand. Es wird deutlich, dass mit Reduzierung der Brandraumhöhe, die Höhe der Flamme vor der Brandraumöffnung zunimmt.

Der Grund dafür ist im Wesentlichen, dass der mittlere Weg der Heißgase von der Brandlast zur Ventilationsöffnung kürzer ist [13]. Im kleineren Umfang spielt dabei die reduzierte Fläche

der Umfassungsbauteile und die daraus geringe Wärmeabgabe an die Bauteile gegenüber einem höheren Raum eine Rolle.

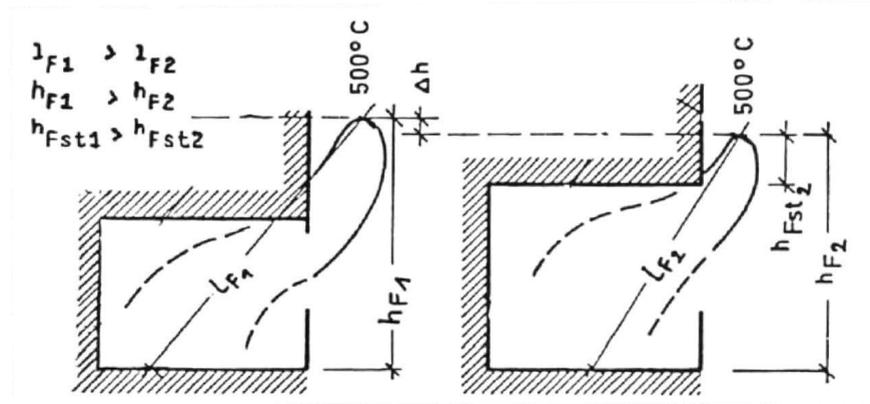


Abbildung 3-5: Vergleich der Flammenhöhen mit Auswirkung auf die Außenwand in verschiedenen Raumhöhen [76]

Die Veränderung des Längen- und Breitenverhältnisses unter Berücksichtigung der gleichen Grundfläche bei typischen Raumgrößen im konventionellen Wohnungsbau bis 40 m^2 hat entsprechend dem vereinfachten Naturbrandmodell gemäß EC 1-1-2/NA Anhang AA [38] nur einen sehr geringen und zu vernachlässigen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Brandraum. Der Einfluss wird über die Fläche der Umfassungsbauteile und deren Wärmespeichervermögen berücksichtigt und liegt im ungünstigsten Fall im sehr niedrigen zweistelligen Temperaturbereich.

3.4.3 Flammenhöhen an der Brandraumöffnung

Die Flammenhöhe L_L über dem Sturz der Brandraumöffnung gemäß EC 1-1-2 [37] lässt sich als die Strecke definieren, die vom Sturz der Brandraumöffnung bis zur Flammenspitze wirkt. Die Länge der Flamme L_F entlang der Flammenachse, gemessen ab dem Austrittspunkt an der Bauwerksöffnung, lässt sich in Abhängigkeit der zu erwartenden Flammenform über EC 1-1-2 Anhang B [37] ermitteln. Die beobachtete Flammenhöhe wird gemäß BiR [138] ab dem oberen Drittel der Brandraumöffnung bis zur Flammenspitze benannt. Auf Grundlage der Auswertungen von insgesamt 65 Brandversuchen aus BiR ergaben sich entsprechend die unterschiedlichen Flammenhöhen gemäß Abbildung 3-6 [139]. Dabei wurde die durchschnittliche Flammenhöhe mit $3,1\text{ m}$ ermittelt. Die mittlere quadratische Abweichung beträgt dabei $0,7$.

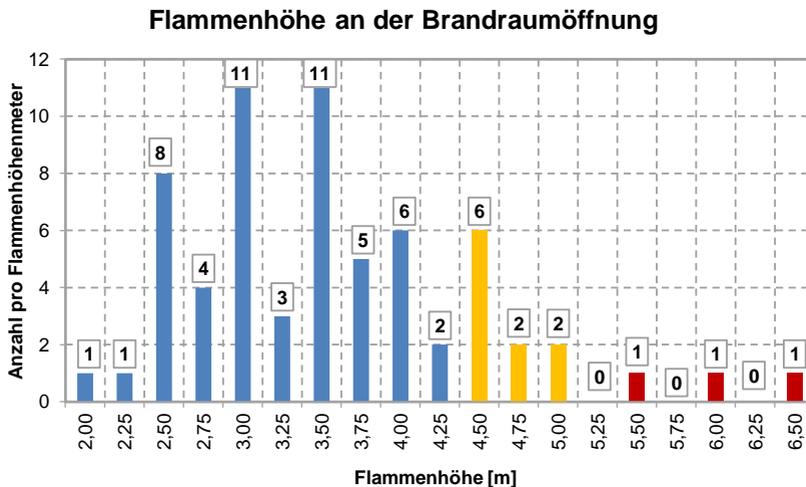


Abbildung 3-6: Flammenhöhe beobachtet und gemessen ab circa dem oberen Drittel der Öffnungen von Räumen mit einer Grundfläche von 5 m², 6 m², 12 m², 18 m², 20 m² und 40 m² nach Brand in Räumen [138]

3.5 Bestimmung der Brandbeanspruchung auf eine Außenwand

3.5.1 Allgemeines Vorgehen

Zur Bestimmung der maßgebenden Brandbeanspruchung von Außenwänden wurde in BiR [139] ein Leitfaden zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung von Außenwänden auf Grundlage der Gleichungen der Eurocodes erstellt. Ergänzt wird der Ansatz durch empirisch, hergeleitete Gleichungen aus BiR. Der Lösungsansatz wurde in großen Teilen anhand der durchgeführten und hier benannten Brandversuche an der MFPA Leipzig verifiziert und hinsichtlich der getroffenen Annahmen geringfügig modifiziert. Folgende Rechenschritte sind zur Bestimmung der Flammenhöhe und der Länge entlang der Flammenachse sowie dem Temperaturverlauf in der Flammenachse durchzuführen:

	Arbeitsschritte	Verfahren
1.	Bestimmung der maßgebenden Wärmefreisetzungsrates $Q_{max,k}$	EC 1-1-2/NA Anhang BB [38]+ vfdb-Leitfaden [67]
2.	Bestimmung der mittleren Brandraumtemperatur für die ersten 20 Minuten in Vollbrandphase	EC 1-1-2/NA Anhang AA [38]
3.	Bestimmung der Flammenhöhe nach B7 und B12	EC 1-1-2 Anhang B [37]
4.	Bestimmung der Temperatur am Fenstersturz	Brand in Räumen [139]
5.	Temperaturen entlang der Flammenachse	Brand in Räumen [139]

Eine ausführliche Darstellung des verwendeten Rechenansatzes ist der Anlage C zu entnehmen.

3.5.2 Randbedingungen

Zur Bestimmung einer maßgebenden Brandbeanspruchung für Außenwandbekleidungen wurden Raumgrößen mit einer Grundfläche von 5 m² bis 40 m² mit einem Raumgrößenintervall von 5 m² untersucht. Ergänzend wurde eine Brandraumgröße von 18 m² berücksichtigt, da eine Vielzahl der Brandversuche am Versuchsstand C der MFPA Leipzig auf Grundlage dieser Raumgröße durchgeführt wurden.

Die durchschnittliche Wohnfläche pro Wohneinheit (WE) beträgt gemäß dem dena-Gebäudereport 2016 [24] in Deutschland bei Wohngebäuden mit ≥ 7 WE durchschnittlich ca. 66 m² Wohnfläche. Wohngebäude mit ≥ 7 WE lassen sich in guter Näherung zu einem großen Anteil der GKL 4 und 5 zuordnen und sind für die Bestimmung der Brandbeanspruchung maßgebend. Auf Grundlage der durchschnittlichen Wohnfläche und der maximal angesetzten Brandraumgröße von 40 m² kann der Ansatz als ausreichend sicher für

die Bestimmung einer Brandbeanspruchung der Außenwand angesehen werden. In diesem Zusammenhang wird eine Unterteilung der untersuchten Raumgrößen in klein (5 m² bis 15 m²), mittel (18 m² bis 25 m²) und groß (30 m² bis 40 m²) vorgenommen.

Als lichtetes Öffnungsmaß wurden auf Grundlage der Vorgabe aus der MBO [105] für Aufenthaltsräume die Ventilationsöffnungen zu 1/8 der Grundfläche angesetzt. Im Zuge der Parameterstudie zeigte sich, dass das vorgegebene Mindestmaß unter der Betrachtung der untersuchten Brandraumgrößen für die Ermittlung der maßgebenden wirksamen Flammhöhe in der Regel als kritischster Brandfall zu betrachten ist. Mit zunehmender Öffnungsgröße bzw. unter Betrachtung mehrerer Brandraumöffnungen nimmt die lokal betrachtete thermische Beanspruchung auf die Außenwand ab. Für große Raumgrößen ist der Ansatz der begrenzten Ventilationsöffnungen von 1/8 der Grundfläche unter Betrachtung einer ausreichenden Belichtung typischer Mischnutzungen (Wohn-, Ess- und ggf. Küchenbereich) als konservativ zu betrachten.

Die maximale Wärmefreisetzungsrate wird grundsätzlich nach dem Stand der Technik mit 250 kW/m² gemäß EC 1-1-2/NA [38] begrenzt. Die Untersuchungen in BiR [138] haben für Raumgrößen bis 20 m² gezeigt, dass durchaus höhere max. Wärmefreisetzungsraten im Brandraum auftreten können. Auf Grundlage der aktuellen Forschungsergebnisse wird für kleine und mittlere Raumgrößen der vorgeschlagene Ansatz der Autoren gemäß BiR aus dem vfdB-Leitfaden [67] mit der maximalen Wärmefreisetzungsrate von 310 kW/m² angesetzt.

Tabelle 3-2: Randbedingungen zur Bestimmung der maximalen thermischen Beanspruchung von Außenwänden infolge von Raumbänden

Randbedingungen			
Raumhöhen [m]	2,4 bis 3,2		
Grundfläche [m ²]	klein	mittel	groß
	5, 10 und 15	18, 20 und 25	30, 35 und 40
Fensteröffnungen [m ²]	Mindestmaß nach MBO 1/8 der Grundfläche Rohbaumaß nach DIN 18050 in Stufen von 0,125 m		
max. Wärmefreisetzungsrate [kW/m ²]	310		250

Die Raumhöhe wird ebenfalls über die MBO [105] geregelt. Entsprechend der Vorgabe für Aufenthaltsräume sind Raumhöhen von mindestens 2,4 m erforderlich. Im konventionellen Wohnungsneubau liegen Raumhöhen in der Regel im Bereich von ca. 2,5 m bis 2,6 m. Auf

Grundlage des Berechnungsverfahrens entsprechend EC 1-1-2/NA Anhang AA [38] hat die lichte Raumhöhe in der Größenordnung zwischen 2,4 m bis 2,6 m auf die Brandraumtemperatur keinen signifikanten Einfluss. Am Beispiel eines Brandraums mit der Grundfläche von 25 m² und einer Brandraumöffnung $B \times H = 2,0 \text{ m} \times 1,625 \text{ m}$ bei einer lichten Höhe von 2,4 m bis 2,6 m beträgt $\Delta\theta$ auf Grundlage des Berechnungsverfahrens gemäß EC 1-1-2/NA Anhang AA [38] $< 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Ergebnisse für die Ermittlungen der Brandraum- und Sturztemperaturen nach Anlage C beziehen sich auf eine lichte Höhe von 2,5 m und nehmen so Bezug auf die Berücksichtigung der Geschosshöhe eines zu entwickelnden Prüfstands mit zwei Geschossen von jeweils 2,9 m. Bei der so bestimmten Geschosshöhe ist eine typische Deckenhöhe einschließlich Fußbodenaufbau mit einer Gesamthöhe von ca. 0,4 m berücksichtigt. Der vorgeschlagene Ansatz für die Geschosshöhe wird in ähnlicher Größenordnung bei der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] (3,0 m Geschosshöhe) angesetzt.

3.5.3 Maßgebende Brandbeanspruchung der Außenwand oberhalb der Brandraumöffnung

Als maßgebendes Raumbrandszenario wird eine Brandraumgröße mit einer Grundfläche von 25 m² und einer Brandraumöffnung $B \times H = 2,0 \text{ m} \times 1,625 \text{ m}$ angesetzt. Die Flammenhöhe über Sturz wurde mit $L_L = 3,06 \text{ m}$ und die Flammenlänge L_F entlang der Wegstrecke in der Flammenachse mit 3,86 m ermittelt. Das Brandszenario wird als maßgebend betrachtet, da durch das Öffnungsverhältnis $w_i/h_w < 1$ die Flammenachse sehr nahe an die Außenwand rückt und somit eine höhere Brandbeanspruchung infolge Konvektion und Strahlung auf die Außenwand vorherrscht. Des Weiteren deckt dieses Flammenbild nahezu alle experimentell beobachteten Flammenhöhen an untersuchten geraden Außenwänden in guter Näherung ab (vgl. Abbildung 3-6). Für Raumgrößen bis 40 m² sind die ermittelten Flammenhöhen unter Berücksichtigung einer maximalen Wärmefreisetzungsrate gemäß EC 1-1-2/NA [38] durch den beschriebenen maßgebenden Ansatz abgedeckt.

Die resultierende Temperaturverteilung entlang der Höhe auf der Z-Achse über der Brandraumöffnung ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Ergänzt wird die Temperaturverteilung parallel zur Öffnungsbreite auf der x-Achse.

An der Brandraumöffnung wird die Temperatur auf Grundlage der ermittelten, mittleren Raumbrandtemperatur für die ersten 20 Minuten in der Vollbrandphase nach EC 1-1-2/NA Anhang AA [38] bestimmt. Die Temperatur t_w in der maßgebenden Flammenachse an der Brandraumöffnung kann gemäß BiR mit 85 % der mittleren Brandraumtemperatur entsprechend Gl. (10-16) aus Anlage C bestimmt werden. Die Verteilung der Temperatur

über die Breite auf der x-Achse wird auf Grundlage der Untersuchungen gemäß Dorn et. al [45], im Zulässigkeitsbereich bis zu einer Öffnungsbreite von 2,0 m, auf der x-Achse an Position A und E mit 0,53 % und auf der x-Achse Position B und D mit 0,85 % von t_w angesetzt werden. Über die Höhe wurde für alle fünf Achsen die Temperaturverteilung nach Gl. (10-17) der Anlage C bestimmt.

x-Achse	A	B	C	D	E	Höhe über Sturz z [m]
Breite	1,0 m	0,5 m	0,0 m	0,5 m	1,0 m	
Temperaturen entlang der Flammenachse	273	469	551	469	273	3,5
	299	508	597	508	299	3,0
	327	550	647	550	327	2,5
	358	597	702	597	358	2,0
	392	647	760	647	392	1,5
	428	701	824	701	428	1,0
	469	759	893	759	469	0,5
	513	823	968	823	513	0,0

Fensteröffnung B x H = 2,0 x 1,625 [m]

Abbildung 3-7: Temperaturverteilung über der Brandraumöffnung für das maßgebende kritische Raumbrandszenario für einen Brandraum mit der Grundfläche von 25 m² und einer Brandraumöffnung B x H = 2,0 m x 1,625 m

Das zu erwartende Flammenbild über der Brandraumöffnung bildet sich entsprechend Abbildung 3-7 glockenförmig aus. Im Randbereich nimmt die Temperatur aufgrund der größeren Umgebungsluftfeinmischung stark ab. Die hier abgebildete Temperaturverteilung ist für den in Kapitel 7 zu bestimmenden Brandversuch maßgebend.

3.6 Sonderszenarien - Raumbrände

3.6.1 Ausführung der Umfassungsbauteile aus sichtbarem Holz oder mit Holzbekleidungen

Die Bemessungsverfahren für Naturbrandmodelle der Eurocodes oder dem vfdb-Leitfaden [67] berücksichtigen nicht die Auswirkung von Wand- und Deckenbekleidungen aus Holz oder die Ausführung aus sichtbarem Holz bei der Bestimmung der max. Wärmefreisetzungsrate. Bei beiden Ausführungsvarianten ist grundsätzlich mit der Entstehung eines hochenergetischen Brandes zu rechnen. Die extreme Auswirkung solcher hochenergetischen Brände auf die thermische Beanspruchung der Außenwand wird nachfolgend an drei durchgeführten Brandversuchen mit gleicher Raum- und Öffnungsgeometrie und unterschiedlichen Wand- und Deckenbekleidungen an der MFPA Leipzig vorgestellt. Die Auswertung dazu erfolgt auf Grundlage der bereitgestellten Ergebnisse gemäß BiR [140]. Die Grundfläche des Brandraumes beträgt 18 m². Die Fläche der Brandraumöffnung wurde mit $B \times H = 2,4 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} = 2,88 \text{ m}^2$ angegeben.

Versuch 1: 475 kg Holz mit Holzkrippen und 90 Liter Isopropanol+ Umfassungswände nicht brennbar/mineralisch; Brandlastdichte: 520 MJ/m²

Versuch 2: 475 kg Holz mit Holzkrippen und 90 Liter Isopropanol + Umfassungswände mit 20 mm dicken Fichtenholz bekleidet und als Abschluss GKF-Platten 12,5 mm; Brandlastdichte: 1150 MJ/m²

Versuch 3: 475 kg Holz mit Holzkrippen und 90 Liter Isopropanol + Umfassungswände mit 20 mm dicken Fichtenholz bekleidet; Brandlastdichte: 1150 MJ/m²

Bei den drei Versuchen wurden im Rahmen der Untersuchungen folgende Flammenhöhen ermittelt:

- Versuch 1: 3,0 m bis 4,0 m (max. 4,5 m)
- Versuch 2: 4,0 m bis 5,0 m (max. 7,0 m)
- Versuch 3: 5,0 m bis 5,5 m (max. 7,5 m)

Auf Grundlage der Vergleichsversuche zeigt sich für die Betrachtung der thermischen Beanspruchung von Außenwandbekleidungen, dass durch die zusätzlichen Wand- und Deckenbekleidungen die Wärmefreisetzungsrate im Brandraum sowie die Wärmeabgabe über die Brandraumöffnung wesentlich steigen, was zu einer signifikanten Erhöhung der thermischen Beanspruchung einer Außenwand führt. Flammenhöhen von 5,0 bis 5,5 m mit Spitzenwerten von bis zu 7,5 m können unabhängig einer brennbaren Außenwandbekleidung in kürzester Zeit zu einem Feuerüberschlag in die zwei über dem Brandgeschoss liegende Geschosse führen. Dieses Worst-Case-Brandszenario kann nicht repräsentativ für

gängige Prüfverfahren von Außenwandbekleidungen sein, da das grundsätzliche Schutzziel unabhängig der Außenwandbekleidung nicht eingehalten werden kann. Die thermische Beanspruchung der Außenwand wird dabei durch die Isothermendarstellung in Abbildung 3-8 deutlich.

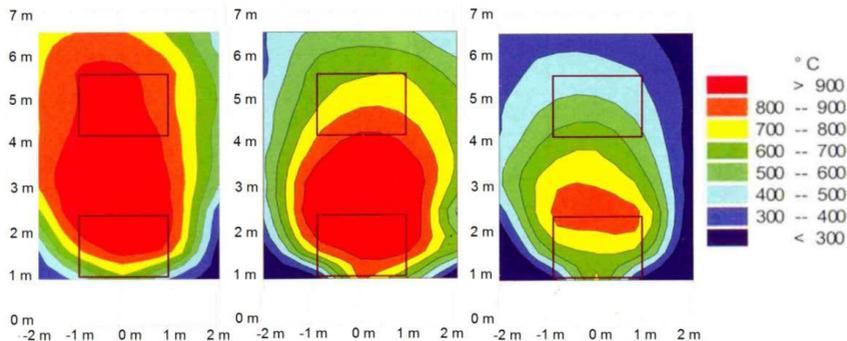


Abbildung 3-8: Darstellung der Isothermen für die Temperatur infolge der Versuche 1 bis 3 von rechts nach links [140]

Kampmeier [73] hat in seiner Dissertation zu risikogerechten ganzheitlichen Brandschutzlösungen Maßnahmen zur Einhaltung der brandschutztechnischen Schutzziele beschrieben, um dem Risiko der Brandentstehung sowie insbesondere der Brandausbreitung und somit der Entstehung von hochenergetischen Bränden bei der Ausführung von sichtbarem Holz entgegen zu wirken. Diese Maßnahmen beinhalten u. a. die Begrenzung der Größe von Nutzungseinheiten sowie zusätzliche anlagentechnische Komponenten für den Brandschutz. Auch die AGBF sieht die Einschränkung sichtbarer Holzflächen als notwendig an [2]. Somit ist zur Einhaltung der Schutzziele ein umfangreiches bauordnungsrechtliches Grundkonzept bei der Verwendung von sichtbarem Holz bei GKL 4 und 5 notwendig.

3.6.2 Einfluss der Querbelüftung infolge von Windbeanspruchungen

Die Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidung über eine Brandraumöffnung kann bei ungünstigen Windverhältnissen signifikant zunehmen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich im Brandraum eine Querlüftung einstellt. Gao et al. [60] zeigten in ihren Untersuchungen auf, dass die Unterdruckverhältnisse bei zwei gegenüberliegenden Brandraumöffnungen einseitig soweit beeinflusst werden können, dass die neutrale Ebene auf der windabgewandten Seite unter die Unterkante der Ventilationsöffnung sinkt. Die Abbildung 3-9 zeigt den Einfluss der Querbelüftung unter Berücksichtigung gegenüberliegender Brandraumöffnungen.

Des Weiteren ist zu beachten, dass durch den Querlüftungseffekt mehr Frischluft in den Brandraum einströmen kann. Dies führt zu einer höheren Abbrandrate und somit unmittelbar zu einer Erhöhung der Wärmefreisetzungsrate.

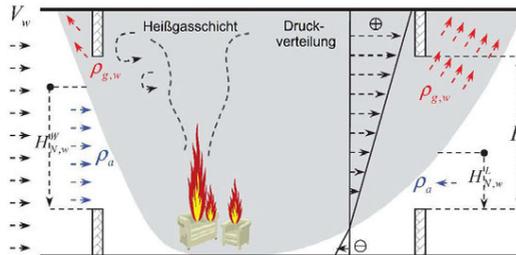


Abbildung 3-9: Betrachtung eines Brandraums mit gegenüberliegenden Ventilationsöffnungen und zusätzlicher Windbeanspruchung bzw. Querbelüftung [60]

Die Zusammenwirkung einer erhöhten Abbrandrate und der Veränderung der Druckverhältnisse an gegenüberliegenden Brandraumöffnungen kann zu einer signifikanten Erhöhung der Wärmefreisetzungsrate an der Brandraumöffnung führen. Die Abbildung 3-10 stellt die Auswirkung der Wärmefreisetzungsrate in Form der Temperaturisothermen an einer Brandraumöffnung für drei unterschiedliche Windlastfälle gegenüber. Dabei wird deutlich, dass sich schon bei Windbelastungen von ca. 4 m/s und einer sich einstellenden Querlüftung im Brandraum die 500 °C-Isotherme hinsichtlich ihrer Auftrittshöhe oberhalb der Brandraumöffnung nahezu verdreifachen kann.

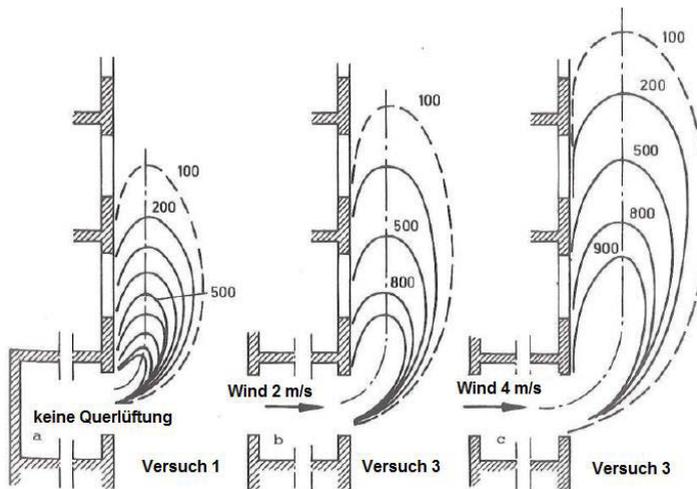


Abbildung 3-10: Temperaturisothermen vor der Fassade bei unterschiedlichen Windeinflüssen [76]

3.6.3 Einfluss der Sonneneinstrahlung und der Umgebungstemperatur

Bechtold [13] hat den Einfluss von Sonneneinstrahlung und der Umgebungslufttemperatur hinsichtlich der thermischen Beanspruchung einer Außenwand im Rahmen seiner Dissertation untersucht. Als Extremfall definiert er eine in Südwestrichtung orientierte Außenwand im Sommer bei 35 °C Außenlufttemperatur, welche durch die kurzwellige Sonneneinstrahlung aus Südrichtung mit einer Wärmestromdichte von ca. 0,43 kW/m² und aus Westrichtung von ca. 0,61 kW/m² thermisch beansprucht wird. In Abhängigkeit des Emissionsgrads kann die Wand dabei bis zu ca. 80 °C erwärmt werden. Der Heißgasstrom wird unter Betrachtung zwischen einem Winter- und Sommerszenario im Sommer durch die erhöhte Temperatur an der Außenwandfläche und den höheren Umgebungstemperaturen durch die Umgebungsluft beeinflusst. Die Abbildung 3-11 stellt den Isothermenverlauf eines sehr warmen Sommertags mit einer Umgebungstemperatur von 35 °C und einer Wandoberflächentemperatur von 65 °C und eines sehr kalten Wintertags mit einer Umgebungstemperatur von -20 °C und einer Wandoberflächentemperatur von 0 °C gegenüber. Dabei ist zu beachten, dass der Emissionsgrad von typischen Wandaufbauten bei kurzwelliger Sonneneinstrahlung deutlich geringer gegenüber langwellig einwirkenden Strahlungen ist [59], weshalb der Ansatz gemäß Bechtold [13] als konservativ zu betrachten ist.

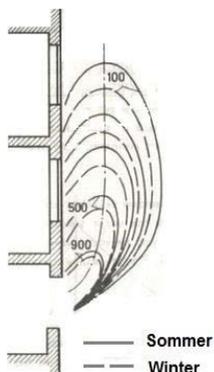


Abbildung 3-11: Isothermen Darstellung des Temperaturfeldes bei extrem niedrigen bzw. extrem hohen Umgebungstemperaturen nach Bechtold [13]

Grundsätzlich ist festzustellen, dass extreme Sommerbedingungen durch den Einfluss der Sonneneinstrahlung und der erhöhten Umgebungstemperaturen zu Brandbeginn die Oberflächentemperatur einer Außenwandbekleidung bestimmen und während des Flammenaustritts über eine Brandraumöffnung das Temperaturfeld des Heißgasstroms beeinflussen können.

3.7 Fassadengeometrie

3.7.1 Einfluss von Kragplatten

Mit der Sperrwirkung von Kragplatten in Form von Balkonplatten bei einem Flammenaustritt aus einer Brandraumöffnung haben sich u. a. Wilk [136] und Oleszwicz [112] in Form von Brandversuchen und Nilsson [109] in Form von CFD-Modellierungen beschäftigt.

Grundsätzlich wurde in BiR [136] zu insgesamt 10 Brandversuchen festgestellt, dass an der Vorderkante der Kragplatte die Flamme mit einer Höhe brennt, die sich um die Breite der Kragplatte reduziert. Die Kragplatten waren als Betonauskragungen ausgebildet. Ähnliche Feststellung zur Ausbildung der Flammenlänge konnten auch Oleszwicz [112] und Nilsson [109] aufzeigen. Somit wirken sich geschlossene, nichtbrennbare Kragplatten hinsichtlich der thermischen Beanspruchung einer Außenwandbekleidung günstig aus. Für die Bestimmung einer repräsentativen Brandbeanspruchung über eine Bauwerksöffnung infolge eines im Vollbrand befindlichen Raumes wurden aus diesem Grund Kragplatten aus nicht brennbaren Baustoffen im Rahmen der Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

3.7.2 Einfluss von Eckwänden- und U-förmigen Wänden

Bei den Untersuchungen gemäß BiR [141] wurden 29 Versuche in einem Brandraum mit einer Grundfläche von 20 m² durchgeführt, an denen die Auswirkungen einer angrenzenden rechtwinklig zur Brandraumöffnung stehenden geraden Wand untersucht wurden. Es wurde festgestellt, dass der Einfluss einer angrenzenden Eckwand ab einem Abstand von 0,5 m signifikant abnimmt. Ab einem Abstand der Seitenwand von 1 m zur Brandraumöffnung konnte bei der Untersuchung von Raumbränden kein Einfluss mehr hinsichtlich der Verlängerung der Flamme beobachtet werden [139]. Grundsätzlich gilt, dass je höher der Energiegehalt und das Volumen der Flamme sind, desto größer wird der Einfluss der angrenzenden Eckwand auf die Ausbildung der Flamme. Gleichzeitig ist zu beachten, dass ein wesentlicher Teil der Energie aus der Flamme in Form von Strahlung in die Umgebung abgegeben wird. Durch die Anordnung einer rechtwinklig zur Brandkammeröffnung stehenden Eckwand, ist bei gleicher Wärmefreisetzungsrate an der Öffnung, eine höhere thermische Beanspruchung der Eckwand gegenüber einer geraden Wand mit gleicher Länge zu erwarten. Die Strahlungsenergie an der Brandraumöffnung infolge der Flamme kann so intensiv werden, dass auch bei Abständen > 0,5 m eine Entzündung von brennbaren Außenwandbekleidungen möglich ist. Der Einfluss der Strahlung im Zusammenhang mit der Flammenausbildung im Eckwandbereich sowie für U-förmige Wände werden im Zuge der numerischen Untersuchungen zur Entwicklung eines Prüfverfahrens im Kapitel 7 genauer betrachtet.

3.8 Zusammenfassung

Kapitel 3 dient der Ermittlung einer maßgebenden kritischen thermischen Einwirkung durch eine aus einer Brandraumöffnung schlagende Flamme auf eine Außenwand. Hierzu wurden als Grundlage verifizierte empirische Berechnungsansätze herangezogen, welche im Wesentlichen auf die Berechnungsverfahren der brandschutztechnischen Bemessungsteile der Eurocodes basieren, die in Deutschland über die technischen Baubestimmungen der Bundesländer bauordnungsrechtlich eingeführt sind. Die Berechnungsansätze wurden durch die Forschungsarbeit von Wilk durch empirisch hergeleitete Gleichungen, welche in BiR ([138], [139]) publiziert wurden, ergänzt.

Auf Grundlage der erarbeiteten Ergebnisse aus den Raumbrandszenarien gemäß Anlage C wird ersichtlich, dass die mögliche Branddauer eines Naturbrandes länger anzusetzen ist, als der in der Regel zu erwartende Beginn wirksamer Löscharbeiten durch die Feuerwehr. Die Brandbeanspruchungszeit in der Vollbrandphase für den skalierten Raumbrandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] und dem Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] wurde darauf aufbauend mit 20 Minuten begrenzt. Der zugrundeliegende Ansatz für die Prüfzeit ist auch für die Bestimmung der Beanspruchungszeit für ein neu zu entwickelndes Prüfverfahren weiterhin als maßgebend anzusetzen. Hinsichtlich der Größe einer Brandraumöffnung sind niedrige und breite Öffnungen, aufgrund der näher an der Außenwand anliegenden Flammenachse, als kritischer gegenüber hohen und schmalen Öffnungen zu betrachten. Des Weiteren ist der Ansatz einer einzelnen Brandraumöffnung gegenüber mehreren in der Gesamtläche gleich großen Öffnungen für die Bestimmung einer kritischen Beanspruchung der Außenwand maßgebend.

Das maßgebende Brandszenario für eine kritische Außenwandbeanspruchung wurde für einen 2,5 m hohen Brandraum mit einer Grundfläche von 25 m² bestimmt. Die Abmessungen der Brandraumöffnung betragen $B \times H = 2,6 \text{ m} \times 1,625 \text{ m}$. Dabei wurde eine Flammenhöhe von 3,06 m bestimmt. Auf Grundlage des ermittelten Temperaturverlaufs kann sich sogar eine Flammenhöhe von mindestens ca. 3,5 m ergeben.

Sonder- bzw. Worst-Case-Szenarien, wie z. B. hochenergetische Brände mit zusätzlichen Wand- und Deckenbekleidungen aus brennbaren Materialien oder der Ansatz von sichtbarem Holz im Brandraum, werden als Grundlage für die Bestimmung einer Brandbeanspruchung nicht herangezogen. Gleiches gilt für Querlüftungen im Brandraum durch Windeinflüsse. Diese Worst-Case-Szenarien bewirken im ungünstigsten Fall eine Flammenbeanspruchung über der Brandraumöffnung von mindestens zwei zusätzlichen Geschossen zum eigentlichen Brandgeschoss, wodurch unabhängig einer brennbaren Außenwandbekleidung die bauordnungsrechtlichen Schutzziele einer Begrenzung der Brandausbreitung \leq zwei Geschosse überschritten werden.

4 Grundlagen zu den numerischen und experimentellen Untersuchungen

4.1 Einführung

Für die Durchführung der numerischen Simulationen in dieser Arbeit wird die CFD-Brandsimulationssoftware FDS (Fire Dynamic Simulator) in der Version 6.6.0 verwendet. FDS ist eine Open-Source Software, die im Februar 2000 durch das National Institute of Standards and Technology (NIST) aus den USA veröffentlicht wurde. FDS gehört zu den sogenannten Feldmodellen, welche wiederum zu den mathematischen deterministischen Modellen der Brandsimulationen gehören. Mittels FDS lassen sich langsam thermisch bedingte laminare und turbulente Strömungsvorgänge, Wärme- und Stoffübertragungen sowie chemische Reaktionen numerisch lösen.

Durch die freie Zugänglichkeit des Quellcodes und die kostenlose Bereitstellung der Software hat der Entwicklungsprozess von FDS dazu geführt, dass die Software bei der Durchführung von Brandsimulationen zu einem der meist genutzten CFD-Programme weltweit gehört. Die Anzahl an erfolgreich durchgeführten Validierungen anhand von Experimenten im Zusammenhang mit der Fragestellung der thermischen Beanspruchung von Außenwänden an Gebäuden oder an Prüfständen für Außenwandbekleidungen macht die Software zu einem idealen Werkzeug zur Bearbeitung der Forschungsfrage in dieser Arbeit. Zur Software werden umfangreiche Grundlagen- und Anwendungshandbücher ([83], [84], [85], [86]) als Leitfaden zur Verfügung gestellt, die zu einem hohen Maß zum Verständnis der thermodynamischen, physikalischen und chemischen Grundlagen und zur praktischen Anwendungen der verwendeten Software beitragen.

FDS ermöglicht dem Anwender die Rechendauer, durch unterschiedliche Ansätze von Berechnungsmethoden, zeitlich zu steuern. Dabei sind für den Anwender folgende Berechnungsmodifikationen anwendbar [83]:

- Single Prozessor Version,
- OpenMP Version,
- MPI Version,
- Open-MPI Version.

Bei der Single Prozessor Version wird dem Simulationsmodell ein Berechnungsgitter zugewiesen, der mittels einem einzelnen Prozessor (CPU - Central Processing Unit) die erforderlichen Rechenschritte seriell bearbeitet. Bei der Berechnung komplexer Simulationsmodelle können bei dieser Methodik die Rechenzeiten sehr groß werden, weshalb der Ansatz nur bei kleinen Berechnungen sinnvoll anzuwenden ist. [83]

Die OpenMP Version (Open Multi Processing) ist für Rechensysteme mit mehreren CPUs und einem Hauptspeicher ausgelegt. Hierzu wird das Rechengebiet, wie bei der Single Prozessor Version in nur ein Berechnungsgitter aufgeteilt. Der Programmcode wird auf der Ebene von Schleifen parallelisiert und die Berechnungen werden mit den zugewiesenen CPUs gelöst. Durch die Lösung des Programmcodes in nur einem Berechnungsgitter können Fehler bei der Informationsübergabe an den Netzübergängen nicht auftreten. Die OpenMP Version wurde zum größten Teil für die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen zur Berechnung am Cluster der Leibniz Universität Hannover verwendet. Nach McGrattan [83] kann sich die Rechendauer unter Berücksichtigung von mindestens vier CPUs gegenüber der Single Prozessor Version halbieren. Mit zunehmender Berücksichtigung von CPUs stagniert die Beschleunigung der Berechnungsdauer deutlich. [83]

Die MPI Version (Message-Passing-Interface) ermöglicht die Berechnung an mehreren Knoten mit jeweils einem CPU und einem eigenen Hauptspeicher. Bei der Anwendung muss das Rechengebiet in mehrere miteinander verbundene Berechnungsgitter unterteilt werden. Die Berechnung in FDS erfolgt hierbei in einem Zeitschritt für jedes Berechnungsgitter unabhängig. Der Austausch der Berechnungsergebnisse erfolgt nach jedem erfolgten Berechnungsschritt an der Schnittstelle der angrenzenden Berechnungsgitter mit den benachbarten Gitterzellen. Durch diesen Ansatz kann das Simulationsmodell in eine Vielzahl von Berechnungsgittern mit jeweils einem eigenen CPU und Hauptspeicher unterteilt werden, wobei zu beachten ist, dass Berechnungsfehler beim Datentransfer auftreten können. [83]

Grundsätzlich ist es schwierig, bei aufwändigen Parameterstudien ausreichend Knoten eines Clustersystems zur Verfügung gestellt zu bekommen, sodass die Wartezeit bis zum Beginn der Berechnungen die Einsparung bei der Dauer der Simulationen aufwiegen kann.

Die Open-MPI Version stellt die Verknüpfung aus MPI und OpenMP dar und ist bei der Anwendung von sehr komplexen Gebäudestrukturen mit sehr langen Berechnungsdauern sinnvoll. [83]

4.2 Berechnungsmethodik FDS

4.2.1 Hydrodynamisches Modell

4.2.1.1 Grundgleichungen

Grundlage für die räumlich-numerische Approximation in FDS ist die Finite-Differenzen-Methode. Dabei wird eine Unterteilung des Rechengebiets in eine dreidimensionale orthogonale Gitterstruktur mit kartesischen Koordinaten durchgeführt. Die numerische Lösung in FDS basiert auf Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen, die als nichtlineare partielle Differenzialgleichungen zweiter Ordnung in Differenzialgleichungen überführt werden und für jede einzelne Gitterzelle sowie für endliche Zeitintervalle numerisch gelöst werden. Dabei werden für den geometrischen Mittelpunkt jeder Gitterzelle die Bilanzgleichungen für die thermodynamischen Zustandsgrößen, wie Druck, Temperatur und Massenanteile der Stoffkomponenten berechnet. Vektorielle Größen, wie die Geschwindigkeit werden für die einzelnen Zelloberflächen ergänzend bestimmt. Die hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen werden wie in FDS wie folgt numerisch gelöst [86]:

Massenbilanzgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \quad \text{Gl. (4-1)}$$

Dabei ist

ρ	die Dichte
t	die Zeit
∇	der Nabla-Operator
\mathbf{u}	der Geschwindigkeitsvektor
\dot{m}_b'''	der Volumenmassenstrom

Transportgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho Z_a) + \nabla \cdot (\rho Z_a \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_a \nabla Z_a) + \dot{m}_a''' + \dot{m}_{b,a}''' \quad \text{Gl. (4-2)}$$

Dabei ist

Z_a	der Massenanteil der Luft
D_a	die Diffusivität der Stoffkomponente

Energiebilanzgleichung

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad \text{Gl. (4-3)}$$

Dabei ist

h_s	die Enthalpie
\bar{p}	der Umgebungsdruck
\dot{q}'''	die Wärmequelle
\dot{q}_b'''	die Wärmequelle durch Partikel und Wassertropfen
\dot{q}''	der Wärmestrom bezogen auf die Oberfläche des Kontrollvolumens

Impulsgleichung

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) + \nabla p = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad \text{Gl. (4-4)}$$

Dabei ist

f_b	die Reibungskräfte der Partikel und Wassertropfen
τ_{ij}	der Spannungstensor

4.2.1.2 Turbulenzen

Turbulente Strömungen werden bei den verwendeten Gitterzellengrößen (Zentimeterbereich) in dieser Arbeit in FDS über die Large-Eddy-Simulation (LES) behandelt. Durch die Approximation der turbulenten Strömungen werden kleinere Wirbel über das Turbulenzmodell modelliert und nur größere Wirbel numerisch direkt gelöst. [86]

In der LES-Berechnung wird die turbulente Viskosität μ_{LES} gemäß Deardorff bestimmt und wie folgt berechnet [86]:

$$\mu_{LES} = \rho \cdot C_v \cdot \Delta \cdot \sqrt{\frac{1}{2}((\bar{u} - \hat{u})^2 + (\bar{v} - \hat{v})^2 + (\bar{w} - \hat{w})^2)} \quad \text{Gl. (4-5)}$$

Dabei ist

$\bar{u}; \bar{v}; \bar{w}$	der Mittelwert Strömungsgeschwindigkeit in Zellmitte
$\hat{u}; \hat{v}; \hat{w}$	das gewichtete Mittel über die angrenzenden Zellen (2 Δ)
C_v	die empirische Konstante (0,1 bei default)
Δ	die Längenskala der Gitterweite

In der LES-Modellierung ist die turbulente Viskosität μ_{LES} mit der Wärmeleitfähigkeit k_{LES} und Diffusionsleitfähigkeit $(\rho D)_{i,LES}$ wie folgt gekoppelt [86]:

$$k_{LES} = \frac{\mu_{LES} \cdot c_p}{Pr_t} ; (\rho D)_{i,LES} = \frac{\mu_{LES}}{Sc_t} \quad \text{Gl. (4-6)}$$

Dabei ist

Pr_t die Prandtl-Zahl (0,5 bei „default“)

Sc_t die Schmidt-Zahl (0,5 bei „default“)

Bei einer sehr feinen Gitterzellengröße (mm) besteht alternativ zur LES-Modellierung die Möglichkeit der direkten numerischen Lösung (DNS) turbulenter Strömungen, was bzgl. der notwendigen CPU-Zeiten zu einem enormen Rechenaufwand führt und nicht zur Zielstellung dieser Arbeit beiträgt. [83]

4.2.2 Geometrische Diskretisierung

Wie bereits zuvor beschrieben, wird die hydrodynamische Bilanzierung mittels Differentialgleichungen bestimmt. Um eine angenäherte Lösung der Differentialgleichungen zu erhalten, müssen algebraische Gleichungen an diskreten Gitterpunkten aufgestellt werden. In FDS erfolgt die Diskretisierung durch ein feines Gitternetz, welches aus quaderförmigen Elementen, den Gitterzellen, besteht. Die Festlegung der Gitternetzstruktur für das Simulationsmodell spielt bei der Validierung eine wesentliche Rolle. Dabei können besonders große Netze zu fehlerhaften bzw. ungenauen Berechnungen führen. Auf der anderen Seite führt eine zu „feine“ Gitterzellengröße zu einem enormen Rechenaufwand, welche in den Ergebnissen jedoch nur einen geringen Einfluss haben kann. Gemäß McGrattan et al. ([83], [85]) lässt sich eine grobe Abschätzung für die Bestimmung der notwendigen Gitterzellengröße der Flamme und der Auftriebsplume ansatzweise über den dimensionslosen Faktor D^*/dx bestimmen. Dabei ist D^* der charakteristische Durchmesser des Brandherdes und lässt sich wie folgt ermitteln:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} \cdot c_{p,\infty} \cdot T_{\infty} \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{Gl. (4-7)}$$

Dabei ist

\dot{Q}	die Wärmefreisetzungsrate	[kW]
ρ_{∞}	die Rohdichte der Umgebungsluft (bei 20 °C > 1,2041)	[kg/m ³]
$c_{p,\infty}$	die spezifische Wärmespeicherkapazität der Umgebungsluft (bei 20 °C -> 1,005)	[kJ/(kg·K)]
T_{∞}	die Temperatur der Umgebungsluft	[K]
g	die Gravitationskraft der Erde (9,81)	[m/s ²]

In den Validierungsstudien von FDS variiert der Indikator D^*/dx bei Brandsimulationen mit ähnlichen Anforderungen zu den hier folgenden Untersuchungen zwischen 4 und 15 [85]. Besonders bedeutsam für diese Arbeit ist die Validierungsstudie zum NRCC Facade Heat Flux Measurements Test, der an einem Fassadenprüfstand, ähnlich der Kanadischen Prüfung gemäß CAN/ULC-S134-13 [21] bzw. gemäß ISO 13785-2 [71], durchgeführt worden ist. Dabei wurde eine ausreichende Konvergenz bei einem Indikator $D^*/dx = 15$ unter Berücksichtigung einer Wärmefreisetzungsrates von 3.000 kW zwischen Experiment und Simulation festgestellt. Dieser Indikator wird in den weiterführenden Untersuchungen bei den Konvergenzstudien als Richtwert herangezogen.

4.2.3 Wärmetransportmechanismen

4.2.3.1 Strahlung

Der Strahlungswärmetransport für einen absorbierenden, streuenden und emittierenden Körper wird in FDS über die Strahlungsübertragungsgleichung (RTE: Radiation Transport Equation) bestimmt [86].

$$s \cdot \nabla I_\lambda(x, s) = -\kappa(x, \lambda) I_\lambda(x, s) - \sigma_s(x, \lambda) I_\lambda(x, s) + B(x, \lambda) \quad \text{Gl. (4-8)}$$

$$\frac{\sigma_s(x, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s', s) I_\lambda(x, s') ds'$$

Dabei ist

- s der Richtungsvektor der Intensität
- λ die Wellenlänge
- $\kappa(x, \lambda)$ der lokale Absorptionskoeffizient
- $I_\lambda(x, s)$ die Strahlungsintensität bei der Wellenlänge λ
- $B(x, \lambda)$ der Emissionsquellterm
- $\sigma_s(x, \lambda)$ der lokale Streukoeffizient

Bei der Anwendung von FDS kann die spektrale Abhängigkeit der RTE in der Regel nicht genau aufgelöst werden. Stattdessen wird das Strahlungsspektrum in eine relativ kleine Anzahl von Frequenzbändern unterteilt und für jedes Band eine eigene RTE abgeleitet [86].

$$s \cdot \nabla I_n(x, s) = \kappa_n(x) [I_{b,n}(x) - I_n(x, s)], n = 1 \dots N \quad \text{Gl. (4-9)}$$

Dabei ist

- n das Frequenzband
- $I_n(x, s)$ die Strahlungsintensität über das Frequenzband n
- κ_n der Absorptionskoeffizient innerhalb des Frequenzbandes n

Selbst bei einer relativ geringen Anzahl von Bändern ist das Lösen mehrerer RTEs sehr zeitaufwändig. Bei größeren Brandszenarien ist in der Regel Ruß das maßgebende Verbrennungsprodukt für die Strahlung. Da das Strahlungsspektrum von Ruß gegenüber Gasen wie z. B. CO_2 und H_2O kontinuierlich ist, kann in guter Näherung das Gas als grauer Strahler angenommen werden. Die spektrale Abhängigkeit wird dann zu einem Frequenzband zusammengefasst und der Quellterm der Strahlungsintensität für einen schwarzen Körper angegeben [86]:

$$I_b(x) = \frac{\sigma T(x)^4}{\pi} \quad \text{Gl. (4-10)}$$

Bei kleinen Flammenausbildungen kann die Annahme eines grauen Strahlers zur Überschätzung der emittierten Strahlungswirkung der Flamme führen, da die Ausbeute an Ruß gegenüber den strahlungswirksamen Gasen CO_2 und H_2O zu gering ist. Als Alternative steht in FDS ein 6-Band-Modell zur Verfügung, welches eine genaue Darstellung der Strahlungsbanden des Brennstoffs, des CO_2 und des H_2O ermöglicht [86].

Das in FDS integrierte Strahlungsmodell basiert auf der Finiten-Volumen-Methode, welches sich auf die orthogonale Gitterstruktur und der in FDS voreingestellten standardmäßigen Unterteilung in 100 diskrete Raumwinkel stützt. Entsprechend Abbildung 4-1 erfolgt die Strahlungsausbreitung vom Kreismittelpunkt in beliebiger Richtung der Kugel mit dem Azimutwinkel ϕ und dem Polarwinkel θ .

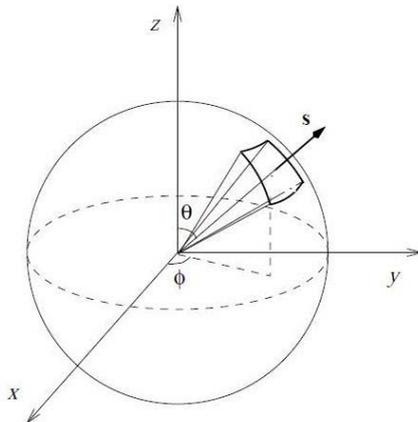


Abbildung 4-1: Winkeldiskretisierung für die Finite-Volumen-Methode gemäß [86]

Zur Steuerung der Unterteilung in einzelne Raumwinkel dient in FDS der Befehl `NUMBER_RADIATION_FRACTION` in der `MISC` Line. Durch die Erhöhung der

Strahlungswinkel kann die Rechendauer wesentlich erhöht werden. Validierungsstudien mit FDS haben gezeigt, dass bei Modellgrößen in der Größenordnung der Brandsimulationen in dieser Arbeit und Gitterzellen im Zentimeterbereich die voreingestellte Unterteilung in 100 diskrete Raumwinkel ausreichend valide ist [85].

Der wichtigste Strahlungsparameter bei einem Brand ist der freigesetzte Energieanteil in Form von Wärmestrahlung χ . Dieser ist eine Funktion aus der Flammentemperatur und der chemischen Zusammensetzung der Reaktionsstoffe bei der Verbrennung, von denen beide in einer Brandsimulation mit Gitterzellen im Zentimeterbereich nicht ausreichend zuverlässig berechnet werden. Dies liegt daran, dass mit der Diskretisierung des Gitternetzes im Rechenmodell im Zentimeterbereich die Randbereiche der Flamme somit nicht ausreichend aufgelöst werden. Durch die Abhängigkeit des Quellterms bzgl. der Temperatur in der vierten Potenz, kann es zu Unterschätzungen der Strahlungsenergie kommen. Aus diesem Grund wird in FDS für Brandsimulationen im Zentimeterbereich der freigesetzte Strahlungsanteil in Abhängigkeit des Brennstoffs durch den Parameter `RADIATIVE_FRACTION` gesteuert. [85]

4.2.3.2 Konvektion

Der konvektive Wärmeübergang zwischen Fluiden und Festkörpern stellt neben der Strahlung den zweiten wesentlichen Wärmeübertragungsmechanismus dar. Dieser setzt sich aus der Temperaturdifferenz der anliegenden Gastemperatur auf der Oberfläche T_g , und der Oberflächentemperatur der Wand T_w , sowie dem Wärmeübergangskoeffizienten zusammen [83]:

$$\dot{q}''_{\text{conv}} = h \cdot (T_g - T_w) \quad \text{Gl. (4-11)}$$

Dabei ist

\dot{q}''_{conv}	Wärmestromdichte infolge Konvektion	[W/m ²]
h	der Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² ·K)]
T_g	die Gastemperatur	[K]
T_w	die Oberflächentemperatur des Festkörpers	[K]

Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient kann in FDS entweder durch konstante Eingangsgrößen z. B. aus den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung für einzelne Festkörper verwendet werden oder alternativ durch FDS mittels empirischer Korrelationen berechnet werden. Bei der instationären Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten in FDS spielen insbesondere die Geometrie, die Orientierung, die charakteristische Länge und diverse

Ähnlichkeitszahlen unter Verwendung des LES-Turbulenzansatzes eine Rolle. Der Wärmeübergangskoeffizient wird nach folgender Gleichung bestimmt [83]:

$$h = \max \left[C \cdot (T_g - T_w)^{\frac{1}{3}}; \frac{k}{L} Nu \right] \quad \text{Gl. (4-12)}$$

Dabei ist

h	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² ·K)]
C	die empirische Koeffizient für natürliche Konvektion für eine horizontale Platte mit 1,52 für eine vertikale Platte mit 1,31	[-]
L	die charakteristische Länge in Relation zur physikalischen Größe des Körpers	[-]
k	die Wärmeleitfähigkeit des Gases	[W/(m·K)]
Nu	die Nußelt-Zahl	[-]

Nach [83] wird die Nußelt-Zahl wie folgt ausgedrückt:

$$Nu = C_1 + C_2 \cdot Re^n \cdot Pr^m \quad \text{Gl. (4-13)}$$

Dabei ist

C_1	die ebene Oberflächen mit $C_1 = 0$
C_2	die ebene Oberflächen mit $C_2 = 0,037$
n	die ebene Oberflächen mit $n = 0,8$
m	die ebene Oberflächen mit $m = 0,33$
Re	die Reynolds-Zahl
Pr	die Prandtl-Zahl $Pr = 0,7$

4.2.3.3 Wärmeleitung

In FDS wird die Wärmeleitung in ein oder mehrschichtigen Festkörpern anhand der eindimensionalen Fourier-Gleichung berechnet. Die instationäre Temperaturentwicklung $T_s(x,t)$ im Festkörper wird in x-Richtung von der beanspruchten Oberfläche ($x=0$) eindimensional in dem Festkörper berücksichtigt [86]:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \dot{q}_s''' \quad \text{Gl. (4-14)}$$

Dabei ist

ρ_s	die Rohdichte	[kg/s]
c_s	die Wärmespeicherkapazität	[kJ/(kg·K)]
k_s	die Wärmeleitfähigkeit	[W/(m·K)]

Der Quellterm \dot{q}_s''' ergibt sich aus der Summe der chemischen Reaktionen aus der Wärmeproduktion oder den Wärmeverlusten der Pyrolysemodelle für Feststoffe und Flüssigkeiten:

$$\dot{q}_s''' = \dot{q}_{s,c}''' + \dot{q}_{s,r}''' \quad \text{Gl. (4-15)}$$

In der Simulation können dem Festkörper auf der Rückseite verschiedene Eigenschaften zugewiesen werden. Bei der Zuweisung „exposed“ wird das rückseitige Gitternetz mit den dort vorherrschenden thermischen Eigenschaften berücksichtigt. Hierzu muss die Dicke des Festkörpers (object) die maximale Größe einer Gitterzelle besitzen, ansonsten wird diesem automatisch die Eigenschaft „void“ zugewiesen, was einer Luftschicht mit der zu Beginn eingestellten Umgebungstemperatur entspricht. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, der Rückseite die Eigenschaft „insulated“ zuzuordnen, wodurch kein Wärmetransfer über diese erfolgt.

Seit der FDS-Version 6.6.0 ist ein 3D-Wärmeleitmodell implementiert, welches sich jedoch noch in der Beta-Version befindet und somit in dieser Arbeit nicht zur Anwendung gekommen ist.

4.2.4 Pyrolyse Modelle

4.2.4.1 Vorgabe der Pyrolyserate

In FDS besteht die Möglichkeit, die Wärmefreisetzungsrates \dot{q}'' über eine zeitabhängige Funktion $f(t)$ in Verbindung mit der Verbrennungswärme $\Delta h_{c,\text{eff}}$ vorzugeben [86]:

$$m''_{\text{Abr}} = \frac{\dot{q}'' \cdot f(t)}{\Delta h_{c,\text{eff}}} \quad \text{Gl. (4-16)}$$

Dabei ist

m''_{Abr}	die flächenspezifische Abbrandrate	[kg/s]
\dot{q}''	die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrates	[kW/m ²]

4.2.5 Pyrolyserate über reaktionskinematische Ansätze

4.2.5.1 Flüssigkeiten

Flüssigkeitsbrände werden in FDS ähnlich wie Brände von Feststoffen behandelt. Die Geschwindigkeit, mit der flüssiger Brennstoff beim Verbrennen verdampft, ist eine Funktion der Flüssigkeitstemperatur und der Konzentration von Kraftstoffdampf über der Pooloberfläche. Nach der Beziehung von Clausius-Clapeyron ist der Volumenanteil der Verdampfungsmenge aus der Verbrennung über der Oberfläche eine Funktion der

Siedetemperatur der Flüssigkeit, der Verdampfungswärme, des Molekulargewichts und der Oberflächentemperatur der Flüssigkeit und wird wie folgt bestimmt [86]:

$$X_{F,l} = \exp \left[\frac{h_v \cdot W_F}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b} \right) \right] \quad \text{Gl. (4-17)}$$

Dabei ist

h_v	die Verdampfungswärme	[kJ/kg]
W_F	das Molekulargewicht des Verbrennungsgas	[g/mol]
T_s	die Oberflächentemperatur	[K]
T_b	die Siedetemperatur	[K]

Die Verdampfungsrate \dot{m}'' wird in FDS durch die Diffusion wie folgt ermittelt [86]:

$$\dot{m}'' = h_m \cdot \left[\frac{\bar{\rho}_m \cdot W_F}{R \cdot T_g} \cdot \ln \left(\frac{X_{F,g} - 1}{X_{F,l} - 1} \right) \right] ; h_m = \frac{Sh D_{1,g}}{L} \quad \text{Gl. (4-18)}$$

Dabei ist

$\bar{\rho}_m$	der Druck	[Pa]
T_g	die Temperatur	[K]
$X_{F,g}$	der Volumenanteil des Brennstoffs in Gasform in der Gitterzelle oberhalb der Pooloberfläche	[%]

Die Sherwood-Zahl wird dabei wie folgt in FDS berücksichtigt:

$$Sh = 0,037 \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \cdot Re^{\frac{4}{5}} ; Sc = 0,6 ; Re = \frac{\rho ||u|| L}{\mu} \quad \text{Gl. (4-19)}$$

Dabei ist

L	die Längenskala (1)	[-]
T_g	die Temperatur	[K]

Die Wärmeleitung in Flüssigkeiten werden in FDS wie bei einem thermisch dicken Feststoff bestimmt, weshalb die Flüssigkeit hinsichtlich der Höhe auf max. eine Gitterzelle beschränkt sein muss.

4.2.5.2 Feststoffe

In FDS existiert ein detaillierter Ansatz zur Simulation der Feststoffpyrolyse. Der Ansatz basiert auf der Vorgabe reaktionskinematischer Parameter auf Grundlage der nach Arrhenius zusammengestellten Approximationen. Die notwendigen Parameter für den Präexponentieller Faktor $A_{\alpha\beta}$ und die Aktivierungsenergie $E_{\alpha\beta}$ für die jeweilige Schicht α mit der Reaktion β kann mit Hilfe der Thermogravimetrischen Analyse (TGA) und der dynamischen Differenzialkalorimetrie (DTA) bestimmt werden.

Die Oberfläche eines Feststoffes kann in FDS aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Materialien bestehen. Dabei ist es möglich, dass eine einzelne Materialkomponente bei verschiedenen Temperaturen bis zu zehn unterschiedliche Reaktionen durchläuft.

Die volumetrische instationäre Freisetzungsrates des gasförmigen Brennstoffes an der Oberfläche des pyrolysierten Feststoffes wird über die einzelnen Materialkomponenten α mit der Reaktion β in FDS wie folgt berechnet:

$$\dot{m}_Y''' = \rho_s(0) = \sum_{\alpha=1}^{N_m} \sum_{\beta=1}^{N_{r,\alpha}} v_{Y,\alpha\beta} r_{\alpha\beta} \quad \text{Gl. (4-20)}$$

Dabei ist

\dot{m}_Y'''	die instationäre Brennstoffmasse zur Oberfläche	[kg/(m ³ ·s)]
$\rho_s(0)$	die Ursprungsdichte der Materialschicht	[kg/m ³]
$v_{Y,\alpha\beta}$	der reaktiver Brennstoffanteil	[-]
$r_{\alpha\beta}$	die Reaktionsrate α der Materialkomponente β	[1/s]

Dabei wird die Reaktionsrate $r_{\alpha\beta}$ unter der Annahme einer Reaktion $\beta = 1$ und einer Materialkomponente $\alpha = 1$ basierend auf der Reaktionsabhängigkeit und auf der Arrhenius-Gleichungen nach folgender Gleichung gelöst:

$$r_{\alpha\beta} = \left(\frac{\rho_{s,a}}{\rho_s(0)} \right)^{n_{s,\alpha\beta}} A_{\alpha\beta} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\alpha\beta}}{RT_s}\right) \quad \text{Gl. (4-21)}$$

Dabei ist

$r_{\alpha\beta}$	die Reaktionsrate	[1/s]
$\rho_{s,a}$	die Dichte der Materialkomponente	[kg/m ³]
$A_{\alpha\beta}$	der präexponentieller Faktor	[1/s]
n	die Ordnungszahl der Reaktion	[-]
$E_{\alpha\beta}$	die Aktivierungsenergie	[J/mol]
R	die universelle Gaskonstante	[J/(mol K)]
T_s	die Temperatur der Materialkomponente	[K]

4.2.6 Modellierung der Verbrennung

Die Verbrennung beschreibt die Reaktion der Pyrolysegase des Brennstoffs mit dem Sauerstoff. Während bei der Brandsimulation unterschiedliche Arten von Brennstoffen vorkommen können, wird in FDS bei der Anwendung des vereinfachten chemischen Mischungsverbrennungsmodells (simple chemistry, mixing-controlled combustion model) nur ein gasförmiger Brennstoff bei der Verbrennungsreaktion in der Gasphase berücksichtigt. Der Grund hierfür ist der sehr hohe Rechenaufwand für die Lösung der notwendigen Transportgleichungen von mehreren gasförmigen Brennstoffen. Daraus folgend wird die

Verbrennungsrate mehrstufiger Reaktionen von unterschiedlichen Brennstoffen aus der Feststoff- und Flüssigkeitsphase automatisch bei der Bestimmung der Verbrennungswärme angepasst, um die Auswirkung unterschiedlicher Brennstoffe bei der Verbrennung in der Gasphase zu berücksichtigen. Somit ergibt sich nur eine Gasphasenreaktion für alle verwendeten Brennstoffe im Simulationsmodell.

Zur Berechnung der Verbrennung in FDS stehen zwei unterschiedliche Modelle zur Verfügung:

- Mischungsbruch-Modell (Mixture-Fraction-Model),
- Finite-Rate-Modell.

Standardmäßig wird in FDS das Mischungsbruch-Modell verwendet. Dabei wird die Reaktion bei der Verbrennung zwischen Brennstoff und Sauerstoff unendlich schnell angenommen und als Anteil zum Gesamtvolumen bestimmt. Durch diesen Ansatz wird die Anzahl notwendiger Transportgleichungen auf den gasförmigen Brennstoff und eine für die Reaktionsprodukte begrenzt. Der sogenannte Mischungsbruch steht für den Quotienten aus der Masse des freigesetzten, gasförmigen Brennstoffs und der Gesamtmasse innerhalb eines Volumens. Somit ist dieser an der Brenneroberfläche gleich 1 und bei einer reinen Luft gleich 0.

4.3 Experimentelle und numerische Auswertungen

4.3.1 Messtechnik

Bei den Brandversuchen für die Validierung der Simulationsmodelle im Kapitel 5 und 6 werden die Temperaturen, Wärmestromdichten und Emissionswerte messtechnisch erfasst. Die eingesetzte Messtechnik zur Erfassung der Temperaturen und der Wärmestromdichten werden zum besseren Verständnis dieser Arbeit nachfolgend kurz erläutert.

Thermoelemente

Bei Brandversuchen werden zur Temperaturmessung in der Regel Thermoelemente (TE) bestehend aus zwei einzelnen Thermodrähten eingesetzt. Oftmals werden die Thermodrähte auch mineralisoliert in Metallrohren geführt und als Mantelthermoelement (MTE) bezeichnet.

Die am häufigsten vorkommenden Thermoelemente in der Brandversuchstechnik sind aus Kostengründen NiCr-Ni-Mantelthermoelementen Typ K gemäß DIN EN 60584 [43] mit einer Messgrenze der Tempererfassung von max. 1300 °C. Zur Messung der Temperaturen werden die zwei Drähte aus unterschiedlichen Metallen (Nickel und Chrom) an beiden Enden miteinander verlötet. Durch Erwärmung der Messfühler (Drähte) entstehen unterschiedliche Spannungen, die in Beziehung zur Temperatur gesetzt werden. Die Temperatur wird dabei durch den Wärmeübergang des umströmenden Fluides sowie durch die Wärmestrahlung auf den Messkörper (Durchmesser im mm Bereich) ermittelt.

In FDS wird zur Bestimmung der Temperaturen eine empirisch modifizierte Modellimplementierung zur Approximation eines NiCr-Ni Thermoelements gemäß Gl. (4-22) zur Verfügung gestellt, der die Temperaturen infolge Strahlung und Konvektion erfasst.

$$\rho_{TC} c_{TC} \frac{dT_{TC}}{dt} = \varepsilon_{TC} (U/4 - \sigma T_{TC}^4) + h(T_g - T_C) = 0 \quad \text{Gl. (4-22)}$$

Dabei ist

ε_{TC}	der Emissionsgrad des Thermoelements	[-]
U	die integrierte radiative Intensität	[KW/sr]
T_g	die Gastemperatur	[K]
T_C	die Temperatur am Thermoelement	[K]
h	der Wärmeübergangskoeffizient zu einer kleinen Kugel	[W/(m·K)]

Plattenthermoelemente

Plattenthermoelemente (PTE) haben sich bei Brandexperimenten von groß skalierten Brandversuchen als alternative Messtechnik zum TE etabliert. Plattenthermoelemente wurden ursprünglich in der Feuerwiderstandsprüfung verwendet und sind in der DIN EN 1363-1 [36] geregelt. Die Abbildung 4-2 zeigt exemplarisch den Aufbau eines PTE. PTE sind normativ bis 1100 °C einsetzbar, und zeigen gegenüber Thermoelementen konstantere Temperaturverläufe sowie einen höheren Wärmeübergang infolge Strahlung bei gleichen experimentellen Randbedingungen auf.

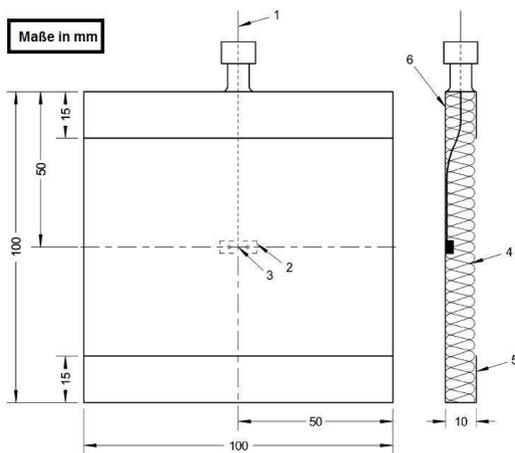


Abbildung 4-2: Aufbau des Plattenthermoelement gemäß DIN EN 1363-1 [36]

- 1 - ummanteltes Thermoelement mit wärmegeädämter Messstelle
- 2 - punktgeschweißter oder geschraubter Metallstreifen
- 3 - Messstelle des Thermoelements
- 4 - Wärmedämmstoff (zum Probekörper ausgerichtet)
- 5 - Blechstreifen mit Dicke von $(0,7 \pm 0,1)$ mm aus einer Nickel- Stahllegierung
- 6 - Fläche „A“

Wärmestromaufnehmer

Wärmestromdichten werden bei Experimenten in der Brandforschung z. B. durch wassergekühlte „Heat Flux Meter“ (Wärmestromaufnehmer) gemessen. Diese können neben der radiativen Wärmestrahlung auch die insgesamt einwirkende Wärmestromdichte infolge Konvektion und Strahlung messen. Die Wärmestromaufnehmer werden in der Regel zur Messung bündig in die Prüfwanne gesetzt. [123]

Die Wärmestromaufnehmer bestehen aus einem wassergekühlten Kupferröhrchen auf das ein Konstantanplättchen aufgeschweißt wird. Ihre Funktion basiert auf der Messung der Thermospannung zwischen der brandbeanspruchten Oberfläche im Mittelpunkt des Konstantanplättchens und der gekühlten Außenwand des Kupferzylinders. Diese Temperaturdifferenz erlaubt, wegen der bekannten Geometrie und Materialkennwerte des Konstantans, mit Hilfe von Kalibriermessungen eine Aussage über den auf das Plättchen auftreffenden Wärmestrom. Infolge der Kühlung des Kupferröhrchens erfolgt nur ein äußerst geringerer Anstieg der Oberflächentemperatur des Konstantanplättchens, sodass wegen des größeren Temperaturgefälles zu den wärmebeaufschlagenden Bauteilen oder Gasen mit diesen Geräten ein wesentlich höherer Wärmestrom im Vergleich zu den benachbarten Bauteilen gemessen werden kann. [122]

Durch die Verwendung eines zusätzlichen Saphir-Kodak-INTRAN2-Fensters vor dem Konstantanplättchen wird der auftreffende Wärmestrom um einen zu kalibrierenden Anteil konvektiver Belastung geschmälert. Damit kann mit Hilfe von Eichkurven ausschließlich der Wärmestrom infolge Strahlung angegeben werden. [122]

FDS stellt zur Auswertung vergleichbarer Wärmestromdichten aus der Simulation die Auswerteparameter „Gauge Heat Flux“ zur Bestimmung der einwirkenden Wärmestromdichte infolge Konvektion und Strahlung gemäß Gleichungen Gl. (4-23) und „Radiometer“ zur Bestimmung der Wärmestromdichte nur infolge der Strahlung gemäß Gleichung Gl. (4-24) zur Verfügung [83].

Gauge Heat Flux:

$$q''_{\text{gauge}} = \varepsilon_{\text{gauge}} (q''_{\text{inc,rad}} - \sigma T_{\text{gauge}}^4) + h(T_{\text{gas}} - T_{\text{gauge}}) \quad \text{Gl. (4-23)}$$

Dabei ist

$\varepsilon_{\text{gauge}}$	der vorgegebene Emissionsgrad	[-]
$q''_{\text{inc,rad}}$	die einwirkende Strahlung	[KW/m ²]
T_{gauge}	die vorgegebene Temperatur	[K]

Radiometer:

$$q''_{\text{radiometer}} = \varepsilon_{\text{gauge}} (q''_{\text{inc,rad}} - \sigma T_{\text{gauge}}^4) \quad \text{Gl. (4-24)}$$

Bei der Implementierung der numerischen Modelle in FDS werden in den Simulationsmodellen gemäß Kapitel 5 bis 7 zur Gewährleistung gleichwertiger Ergebnisse zu den Experimenten der Emissionsgrad zu $\varepsilon_{\text{gauge}} = 1$ und die Temperatur $T_{\text{gauge}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ berücksichtigt.

4.3.2 Bewertungsmethoden von Validierungsversuchen

4.3.2.1 Modellunsicherheiten

Bei der Validierung von Experimenten mit numerischen Simulationsmodellen bestehen grundsätzlich Unsicherheiten bei den Ergebnissen der Ein- und Ausgabewerte, welche sich aus einer Vielzahl an Einflussparametern ergeben. Schon durch die Approximation der mathematischen Formulierung zur Beschreibung der physikalischen Prozesse ergibt sich eine intrinsische Modellunsicherheit, die unvermeidlich bei der Anwendung von numerischen Modellen ist. Auch bei der Implementierung eines geeigneten geometrischen Simulationsmodells auf Grundlage von Experimenten entstehen oftmals Zwänge zur Vereinfachung geometrischer Objekteigenschaften. Auf experimenteller Seite bestimmen Messungenauigkeiten der verwendeten Sensorik, Unsicherheiten aus Berechnungsmethoden zur Gewinnung von Ergebnissen aus Rohdaten sowie Benutzerfehler oder Benutzerunsicherheiten die Ungenauigkeiten von Auswertungsergebnissen. Insbesondere bei Verwendung von Ergebnissen aus Experimenten Dritter muss zwangsläufig mit dem Auftreten dieser Unsicherheiten gerechnet werden.

Zur Abschätzung möglicher Unsicherheiten aus Experimenten und aus numerischen Modellen stellen McGrattan et al. in [87] eine durch Hamins et al. [65] entwickelte Methodik, auf Grundlage von Validierungsversuchen und empirischen Korrelationen zur kombinierten Abschätzungsmethode in Abhängigkeit möglicher brandphysikalischer, strömungsrelevanter und messtechnischer Eingangs- und Ausgangsparameter, zusammenfassend vor. Die Unsicherheit jeder Messung als Kombination aus Ein- und Ausgabeparametern als Standardabweichung ω_E ist für die relevanten Ausgangsparameter der Brandversuche in dieser Arbeit in Tabelle 4-1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4-1: Kombinierte relative Unsicherheiten für ausgewählte Ausgangsparameter gemäß Hamins et al. [65]

Ausgangsparameter	Kombinierte relative Unsicherheit
Heißgastemperatur	0,14
Plume Temperatur	0,14
Wärmestromdichte	0,20
Oberflächentemperatur	0,14

4.3.2.2 Hilfsmittel zur Validierung

Qualitative Auswertung

Aufgrund der Vielzahl an Messdaten aus Experiment und Simulation können die Auswertungen der Messergebnisse und die Validierung in einem Zeit-Wert-Diagramm schnell unübersichtlich werden. Gemäß Münch [104] und McGrattan et al. [87] kann zur Darstellung von Abweichungen zweier Vergleichskurven eine zeitlich unabhängige direkte Gegenüberstellung der Referenz- und Vergleichswerte hergestellt werden. Hierzu wird das zugehörige Wertepaar aus Referenz- und Vergleichswert zu einem Zeitpunkt t in ein x-y-Diagramm eingetragen. Sofern beide Werte übereinstimmen, liegen die Datenpunkte im Diagramm auf einer Geraden der Steigung 1. Abweichungen lassen sich mit Hilfe von Abweichungsmarkern im Diagramm graphisch darstellen. Durch die zusätzliche graphische Darstellung der kombinierten relativen Unsicherheit für die Ausgabeparameter können im Diagramm die Abweichungen übersichtlich eingegrenzt werden.

Quantitative Auswertung

Bei Validierungsversuchen kann in vielen Fällen die qualitative Darstellung für die Feststellung von Abweichungen zwischen Experiment und Simulation nicht ausreichen, da oftmals eine vergleichende quantitative Aussage für Validierungs- oder Parameterstudien getroffen werden muss.

Eine einfache Form der Quantifizierung ist die Auswertung mittels der Bewertungszahl I bei der die Maximalwerte zweier Verlaufskurven ausgewertet werden. Dabei wird der maximale Wert gemäß NUREG-1824 [111] zwischen Modell und Experiment entsprechend Gl. (4-25) ins Verhältnis gesetzt.

$$I = \frac{M_{\text{Mod,max}} - E_{\text{Exp,max}}}{E_{\text{Exp,max}}} \quad \text{Gl. (4-25)}$$

Ein ermittelter Wert null für die Bewertungszahl I bedeutet dabei die größtmögliche Übereinstimmung zwischen zwei Werten. In ähnlicher Weise werden bei Fassadenprüfungen in Deutschland durch die Prüfstellen oftmals zur Vergleichsauswertung die Isothermen aus den gemessenen Maximaltemperaturen vor dem Prüfstand herangezogen.

Mit Hilfe der L_2 -Norm-Methodik gemäß Peacock et. al. [114] nach Gl. (4-26) lassen sich die Abweichungen zwischen zwei Kurven quantitativ über die Zeit bestimmen:

$$\frac{\|\vec{E} - \vec{m}\|}{\|\vec{E}\|} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^n E_i^2}} \quad \text{Gl. (4-26)}$$

Dabei sind

\vec{E} die experimentell ermittelten Daten
 m_i die numerisch ermittelten Daten

Sofern zwei Temperaturkurven in einem betrachteten Zeitraum mittels L_2 -Norm-Methodik miteinander verglichen werden, kann dies bei gegenläufigen Steigungen der Messkurven unter Betrachtung der insgesamt einwirkenden thermischen Beanspruchung über die gesamte Einwirkungszeit zu Über- oder Unterschätzungen führen. Aus diesem Grund wird bei Anwendung der L_2 -Norm-Methodik in dieser Arbeit eine Kombination aus dieser und dem Vergleich der Mittelwerte der betrachteten thermischen Messgrößen aus Experiment und Simulation genutzt, um hierdurch eine Einschätzung zur Gesamteinwirkung zu erhalten.

5 Experimentelle und numerische Untersuchung von Prüffeuern

5.1 Einführung

Wie bereits in Kapitel 2 ausführlich erläutert, wird bei mittel und groß skalierten Brandversuchen für die Prüfung von Außenwandbekleidungen zwischen den drei Prüffeuertypen Gasbrenner, Holzkippe und Poolfeuer unterschieden. Die thermische Beanspruchung der Prüfwand im Brandversuch wird durch die Wärmefreisetzungsrate des Prüffeuers maßgebend dominiert. Mögliche Unsicherheiten bei der Wärmefreisetzungsrate im Experiment oder bei der numerischen Simulation können einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse der gemessenen Ausgangsparameter für z. B. die Heißgastemperaturen oder die Wärmestromdichten haben.

Um weitere Erkenntnisse zu den brandtechnischen Eigenschaften der Prüffeuern, insbesondere zum Brandverlauf und zur numerischen Simulation der Wärmefreisetzungsraten zu gewinnen, werden nachfolgend die drei Prüffeuertypen anhand von Brandversuchen untersucht. Auf Grundlage der Feststellungen zu den brandtechnischen Eigenschaften der einzelnen Prüffeuern werden numerische Modelle für die Simulation erarbeitet, welche anhand der Ergebnisse aus den Experimenten validiert werden. Ziel der Untersuchungen in diesem Kapitel ist die Bestimmung valider numerischer Modellierungsansätze von Prüffeuern, um eine ausreichende Sicherheit bei der Anwendung des Prüffeuernmodells bei der Übertragung auf geänderte Geometrien von groß skalierten Brandversuchen in der Anwendung von CFD-Modellen zu erhalten.

Ergänzend zu den numerischen Zielstellungen in diesem Kapitel sollen Erkenntnisse zu den brandtechnischen Eigenschaften und insbesondere zur thermischen Einwirkung auf die Prüfwand für die nationalen Prüfverfahren von Außenwandbekleidungen gemäß DIN 4102-20 [32] (Gasbrenner) für das Raumbrandszenario und gemäß MVV TB [107] (Holzkippe) für das Sockelbrandszenario gewonnen werden.

5.2 Gasbrenner

Als Untersuchungsgrundlage für den Gasbrenner werden zwei Kalibrierungsversuche der MFPA Leipzig, nachfolgend bezeichnet als DIN1 [96] und DIN2 [97], auf Grundlage der Prüfnorm für das Raumbrandszenario gemäß DIN 4102-20 [32] herangezogen.

Die Zielstellung dieser Arbeit ist die Bestimmung eines skalierten Prüffeuers unter möglichst realitätsnahen Naturbrandbeanspruchungen in einem Prüfverfahren. Das Brandszenario soll dabei mit möglichst geringfügigem technologischem Aufwand repräsentativ simuliert werden können. Aus diesem Grund sind die Erkenntnisse aus den Kalibrierungsversuchen gemäß DIN 4102-20 [32] mit der Ausführung einer skalierten Brandkammer und einem skalierten Prüffeuers als relevant zu betrachten, da aus diesem erste Feststellungen zur thermischen Beanspruchung von Prüfwänden und vor allem der Simulation des Prüffeuertyps im Brandversuch gewonnen werden können.

5.2.1 Experimentelle Untersuchung

Die beiden nachfolgend ausgewerteten Kalibrierungsversuche wurden am Versuchsstand D der MFPA Leipzig an der Außenstelle in Laue im Jahr 2015 durchgeführt.

Kalibrierungsversuche dienen neben der Überprüfung von messtechnischen Einrichtungen, dem Vergleichsnachweis hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Brandprüfung zwischen den akkreditierten Prüfstellen. Eine Besonderheit der Brandprüfstelle in Laue ist die Anordnung des Geländes auf offenem Feld. Dadurch können sich, aufgrund der natürlichen Lüftungsbedingungen der Fassadenprüfhallen, im ungünstigsten Fall insbesondere ungünstige Windverhältnisse auf die Brandversuche am Fassadenprüfstand auswirken.

5.2.1.1 Randbedingungen

Die Brandversuche wurden in einer witterungsgeschützten Versuchshalle mit den Abmessungen $B \times L \times H = 3,5 \text{ m} \times 7,7 \text{ m} \times 7,0 \text{ m}$ unter natürlichen Lüftungsbedingungen durchgeführt. Das Hallentor war bei den Kalibrierungsversuchen DIN1 und DIN2 auf ca. 2 m Höhe geöffnet. Das Verhältnis zwischen Zu- und Abluft war somit bei beiden Versuchen 2:1. Die genauen geometrischen Randbedingungen sind der Abbildung 5-1 und der Abbildung 5-2 zu entnehmen.

In Tabelle 5-1 wurden alle wesentlichen klimatischen, geometrischen und material-spezifischen Randbedingungen für beide Brandversuche zusammengefasst. Ergänzt wird die Tabelle durch Angaben zum Prüffeuers und zur Beanspruchungszeit. Im Rahmen der Ausarbeitung wurden zur Erfassung sämtlicher klimatischen Randbedingungen, ergänzend zu den Angaben aus den Prüfberichten, die Temperaturen und die relativen Luftfeuchten für

den Außenbereich berücksichtigt. Die Klimawerte wurden gemäß der Stationsmessung am Standort Leipzig vom Deutschen Wetterdienst [25] für die exakte Prüfstunde berücksichtigt.

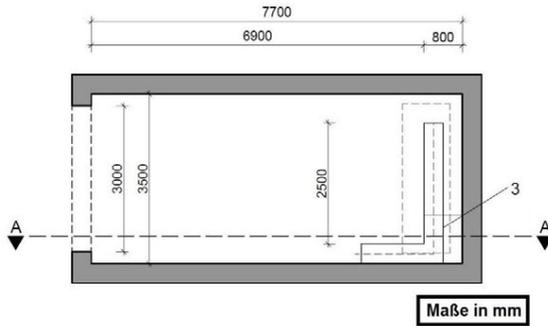


Abbildung 5-1: Grundriss des Prüfstands gemäß DIN 4102-20 [32] der MFPA Leipzig [96]

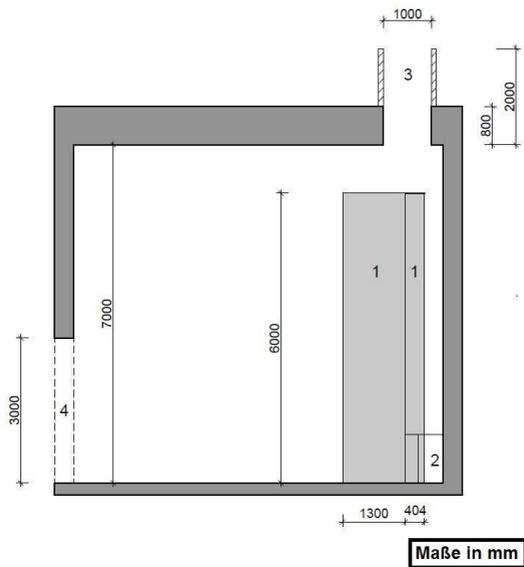


Abbildung 5-2: Schnitt A-A zum Prüfstand gemäß DIN 4102-20 [32] der MFPA Leipzig [96]

- 1 - Fassadenprüfstand
- 2 - Brandkammer
- 3 - Rauchabzug
- 4 - Zuluftöffnung

Tabelle 5-1: Versuchsrandbedingungen der Kalibrierungsversuche DIN1 und DIN2

Klimatische Randbedingungen					
Versuch	Temperatur [°C]		Relative Luftfeuchte [%]		Wind
	Innen	Außen	Innen	Außen	Außen
DIN1 [96]	20	18	74	84	nahezu windstill
DIN2 [97]	19	18	57	61	stark böiger Wind
DIN_Mittel	19,5	18	66	72	-
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen					
Bauteil		Innenmaße [m]	Material		
Prüfstand	Rückwand B x H	2,5 x 6,0	Kalksandstein		
	Eckwand B x H	1,3 x 6,0			
Brandkammer	Grundfläche B x L	1,0 x 0,8	Kalksandstein + Stahlbeton		
	Höhe H	1,0			
Prüfhalle	Grundfläche B x L	3,5 x 7,7	Stahlbeton		
	Höhe H	7,0			
Lüftungsbedingungen	Zuluft B x H (teilweise geöffnet)	3,0 x 3,0	-		
	Abluft B x L	3,0 x 1,0			
Prüffeuern					
	Maße Brenner B x L x H [m]	Gasdurchsatz [g/s]	$H_{u,eff}$ [MJ/kg]	Zündinitial	
Kompakt-Gasbrenner	0,8 x 0,3 x 0,2	7,4	48,65	Pilotflamme	
Beanspruchungszeit Kalibrierungsversuche					
20 Minuten Beanspruchungszeit + 10 Minuten Beobachtungszeit					

5.2.1.2 Prüffeuern

Das Prüffeuern wurde, wie bereits beschrieben, über einen Kompakt-Gasbrenner in der Brandkammer realisiert. Gemäß DIN 4102-20 [32] wird beim Gasbrenner als Brennstoff grundsätzlich Propan vorgesehen. Bei den betrachteten Kalibrierungsversuchen DIN1 und DIN2 wurde ein Propan-Butan-Gemisch mit einem höheren Heizwert von ca. $H_u = 48,65$ MJ/kg gegenüber reinem Propangas mit ca. $H_u = 46,0$ MJ/kg verwendet.

In Abbildung 5-3 ist der eingesetzte Kompakt-Gasbrenner dargestellt. Das Gasgemisch wurde über eine Gasleitung von unten in eine rechteckige, mit Kies gefüllte Wanne eingeleitet und durch ein Prallblech und die Kiesschüttung gleichmäßig im Brenner verteilt. Zur Gewährleistung der notwendigen Verbrennungsreaktion wurden ca. 24.000 l/h Zuluft beigemischt.

Der Gasbrenner war ca. 0,35 m unterhalb des Sturzes bündig mit der Vorderseite der Rohbauwand positioniert. Der Abstand zur Laibung der Brandkammer Richtung Eckwand betrug 0,03 m und war somit nahezu bündig zur Brandkammerlaibung.

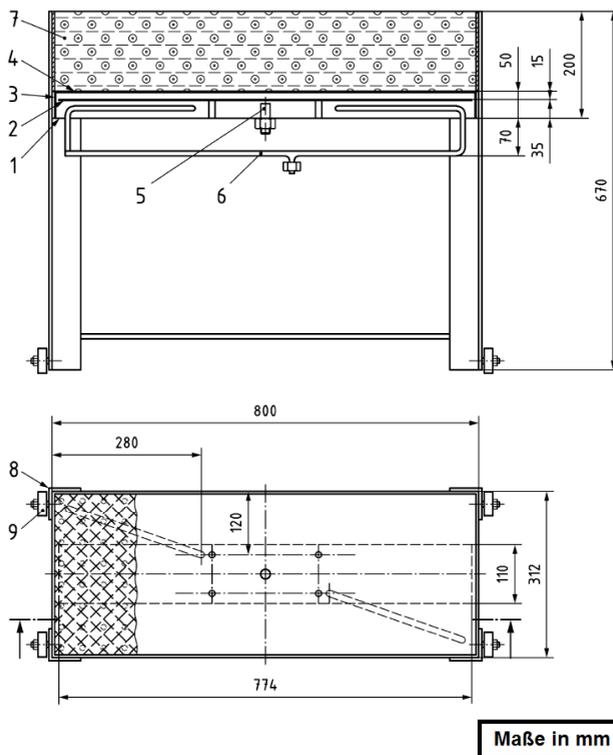


Abbildung 5-3: Ansicht und Draufsicht des Kompakt-Gasbrenners nach Angabe DIN 4102-20 [32]

- 1 - Brennergehäuse 800 mm × 312 mm × 200 mm
- 2 - Prallblech 774 mm × 110 mm × 2 mm
- 3 - Lochblech 790 mm × 302 mm × 2 mm; Loch \varnothing 10 mm
- 4 - Drahtgewebe 794 mm × 306 mm
- 5 - Gasanschluss
- 6 - Luftanschluss
- 7 - Kiesschicht
- 8 - Winkel L 60 mm × 60 mm
- 9 - Rad

Der Gasdurchsatz des Kompakt-Gasbrenners betrug während der Brandprüfung ca. 7,4 g/s und wurde durch eine Steuerungseinheit reguliert. Unmittelbar vor Prüfbeginn erfolgte die Gaszufuhr zum Gasbrenner und mit Ende der 20. Prüfminute wurde diese beendet. Durch eine Pilotflamme wurde der Kompakt-Gasbrenner entzündet. Der Gasverbrauch wurde nach

Prüfende an einer Gasuhr abgelesen, sodass die insgesamt freigesetzte Wärmeenergie über den effektiven Heizwert und die Zeit bestimmt werden konnte. In Abbildung 5-4 ist der zu erwartende Gasdurchsatz pro Zeiteinheit für die Prüf- und Beobachtungszeit von insgesamt 30 Minuten dargestellt. Aus dieser wird deutlich, dass unter konstanter Gaszufuhr theoretisch eine näherungsweise konstante Wärmefreisetzungsrate möglich ist.

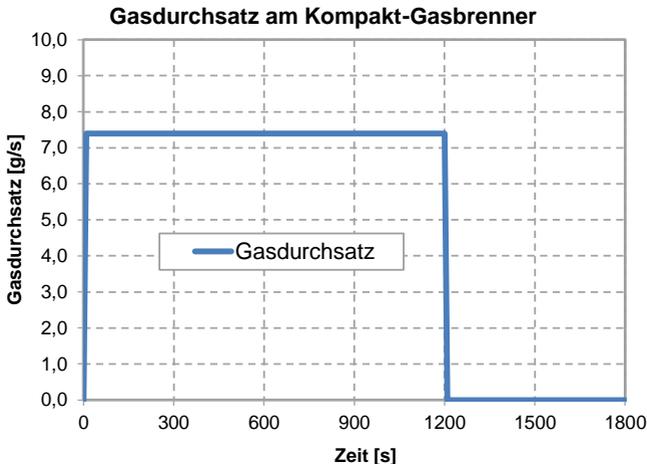


Abbildung 5-4: Zeitlicher Verlauf des Gasdurchsatzes am Kompakt-Gasbrenner zur Gewährleistung der Brandbeanspruchung durch das Prüffeuern

5.2.1.3 Messdaten

Während der Brandversuche wurden Temperaturen und Emissionswerte gemessen. Das Zeitintervall zur Erfassung der Messdaten wurde mit 10 Sekunden angesetzt. Die Temperaturen aus beiden Versuchen wurden entsprechend den dargestellten Achsen gemäß Abbildung 5-5 in einem Abstand von 0,1 m vor der Prüfwand erfasst. Ergänzend wurden an sechs Messstellen auf halber Höhe im Abgasschlot Temperaturmessungen vorgenommen. Die genaue Anordnung der Messstellen kann der Abbildung 10-1 gemäß Anlage D entnommen werden. In dieser sind zusätzlich die Messstellen für die Messung der O_2 -, CO_2 - und CO -Werte angegeben. Die Messung dieser erfolgte mit einer Maihak-Gasanalyseanlage über eine Vierfachsonde ebenfalls auf halber Höhe des Abluftschlotes.

Zur Temperaturmessung wurden NiCr-Ni-Mantelthermoelementen Typ K gemäß JEC 584 Teil 1, mit einem Thermdrahtdurchmesser von 0,37 mm und einem Manteldurchmesser von 3 mm verwendet und online mit dem Messsystem TUM 99-2 registriert.

Zur Positionierung der Mantelthermoelemente vor dem Prüfstand kam, wie in Abbildung 5-6 dargestellt, ein Stahlmessbaum zur Verwendung. Die Flammenhöhen wurden visuell durch Vergleich der Flammenhöhen an Messmarken am Prüfstand registriert. Die festgestellten Flammenhöhen aus dem Prüfbericht beziehen sich auf die intermittierende und nicht auf die ständige visuell wahrzunehmende Flamme.

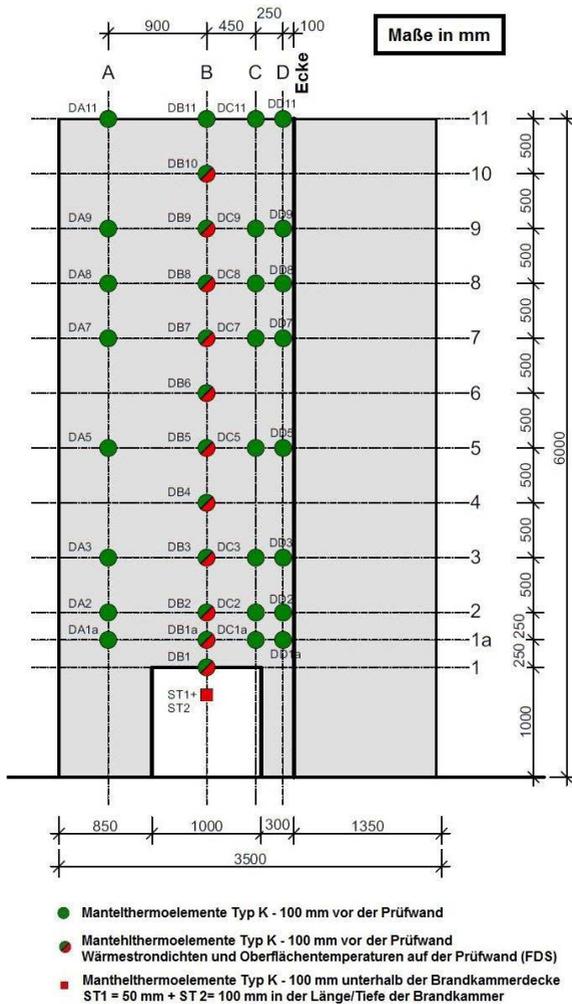


Abbildung 5-5: Messstellenplan der Kalibrierungsversuche DIN1 und DIN2 mit ergänzenden Messstellen für die weiterführenden Untersuchungen mit FDS



Abbildung 5-6: Ansicht links: Prüfstand unmittelbar vor Ausführung des Kalibrierungsversuchs DIN1 und Ansicht rechts: Messung Abstand 10 cm der Mantelthermoelemente zum Prüfstand [96]

5.2.1.4 Versuchsergebnisse

Nachfolgend sind die relevanten Ergebnisse aus den Brandversuchen DIN1 und DIN2 für die Temperaturen in der Brandkammer, in Achse DB und DC sowie für den Sauerstoffverbrauch im Abgasschlot dargestellt. Die Ergebnisse aus den Messdaten werden mit den Erkenntnissen aus den visuellen Auswertungen der Foto- und Videoaufnahmen, insbesondere zum Flammenbild während der Brandbeanspruchungsphase, ergänzt.

Temperaturen

Die Gegenüberstellung der Temperaturverläufe in der Brandkammer an den Messpunkten ST1 und ST2 in Abbildung 5-7 zeigen zwischen den Brandversuchen DIN1 und DIN2 eine sehr gute Übereinstimmung über den Beanspruchungszeitraum von 20 Minuten sowie in der anschließenden zehnminütigen Beobachtungszeit der Abklingphase. Auffällig ist der schnelle Temperaturabfall auf ca. 100 °C innerhalb von ca. 150 Sekunden nach Abschalten des Brenners, was z. T. auf den geringen Wärmeeintrag in den Prüfstand und somit auf die verminderte Rückkopplung dieser auf die umgebende Gastemperatur in der Abklingphase zurückzuführen ist.

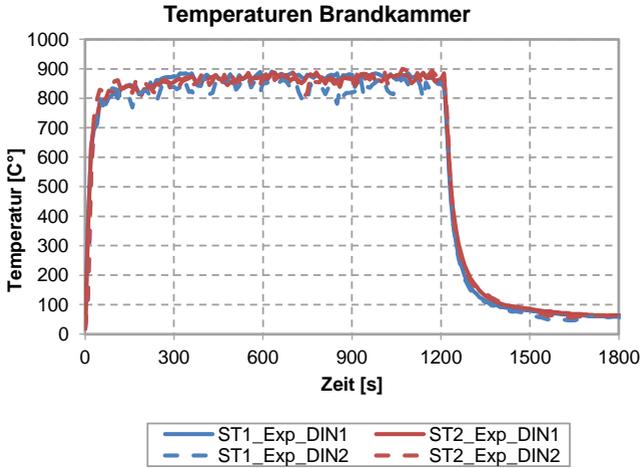


Abbildung 5-7: Gemessene Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelemente in der Brandkammer an den Messstellen ST1 und ST2 für die Kalibrierungsversuche DIN1 und DIN 2

Die Temperaturverläufe der Messstellen in Achse DB zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Brandversuchen DIN1 und DIN2 bis zur 12. Prüfminute. Entsprechend den durchgeführten Auswertungen durch die Videoaufnahmen wurde ab der 12. Prüfminute eine starke Ablenkung der Flammen, auf Grund von Windeinflüssen, am Prüfstand beobachtet. Im Brandversuch DIN2 weisen die Temperaturverläufe an den Messstellen der Achse DB in Abhängigkeit der Höhe Differenzen von z. T. 100 °C bis 200 °C auf. Die Temperaturverläufe an den Messstellen Achse DC gemäß Abbildung 5-9 zeigen wiederum keine wesentlichen Temperaturdifferenzen zwischen den Brandversuchen auf.

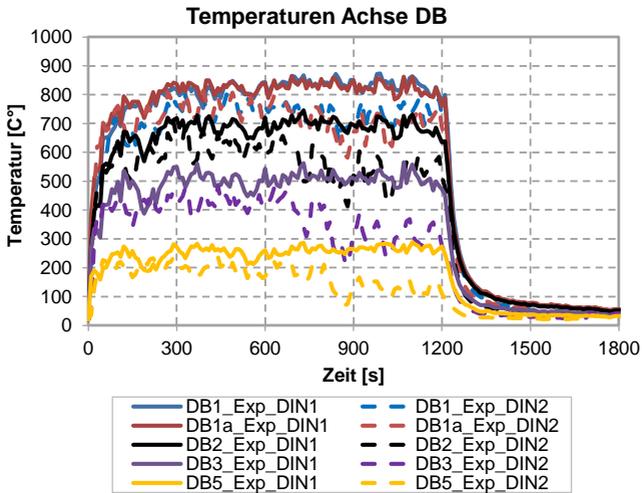


Abbildung 5-8: Gemessene Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelemente entlang der Achse DB an den Messstellen DB1 bis DB5 für die Kalibrierungsversuche DIN1 und DIN 2

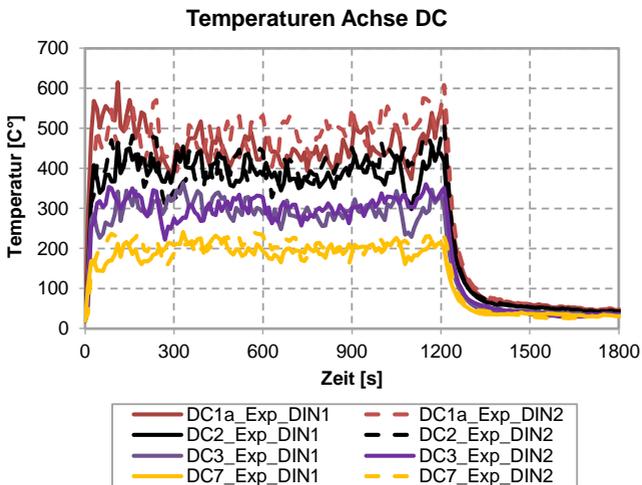


Abbildung 5-9: Gemessene Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelemente entlang der Achse DC an den Messstellen DC1 und DC5 für die Kalibrierungsversuche DIN1 und DIN 2

Emissionswerte

Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen im Abgasschlot zeigen ab der 40. Prüfsekunde beim Brandversuch DIN1 einen Abfall um ca. 0,2 % und beim Brandversuch DIN2 um ca. 0,1 % gegenüber dem Eingangswert zu Prüfbeginn auf. Die zeitversetzte Messung des Sauerstoffverbrauchs gegenüber dem Prüfbeginn lässt sich zum einen durch die Wegstrecke der Heißgase bis zum Abgasschlot begründen, da diese insbesondere mit zunehmender Höhe durch Abkühlung an Auftriebsgeschwindigkeit verlieren. Ein weiterer Aspekt ist die zeitverzögerte Datenaufnahme aufgrund des Zeitintervalls von 10 Sekunden. Die geringfügige Differenz in der Sauerstoffkonzentration zwischen den beiden Brandversuchen DIN1 und DIN2 kann auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden.

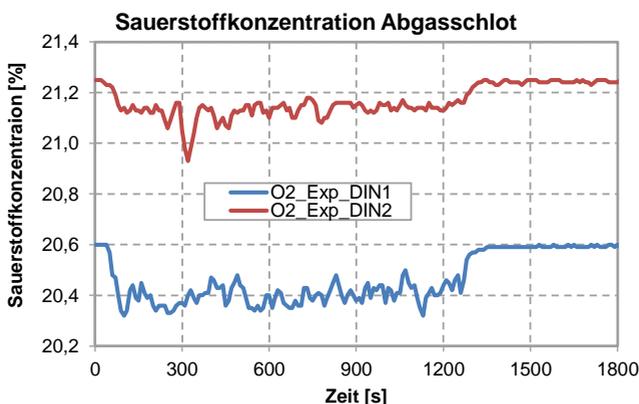


Abbildung 5-10: Gemittelte Sauerstoffkonzentrationen im Abgasschloss aus den Kalibrierungsversuchen DIN1 und DIN 2

Flammene Ausbildung

Die Auswertung zur Flammenerscheinung auf Grundlage der Videoaufzeichnungen der beiden Brandprüfungen DIN1 und DIN2 ergab eine ständige Flammenehöhe von ca. 1 m für beide Versuche. Die Beobachtungen stehen in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Temperaturen entlang der Achse DB im Brandversuch DIN1. Die durchschnittlichen Temperaturen, am Messpunkt DB3_Exp_DIN1 1 m über dem Brandkammersturz, betragen ca. 500 °C. Für den Kalibrierungsversuch DIN2 wurden in der Achse DB, nach Beginn der Prüfung, geringere Temperaturen an den Messstellen registriert. Dies deutet unter zusätzlicher Beobachtung der Videoaufzeichnung darauf hin, dass die maßgebende Flammeneachse gegenüber dem Brandversuch DIN1 im größeren Abstand zu den Messstellen vor dem Prüfstand war.

Der Vergleich zwischen der Abbildung 5-11 und der Abbildung 5-12 zeigt, dass eine deutliche Flammenablenkung, aufgrund von Strömungseinflüssen im Kalibrierungsversuch DIN2, ab der ca. 12. Prüfminute vorlag. Gemäß den Videoaufzeichnungen erreichte die intermittierende Flamme bei den Brandprüfungen eine max. Höhe von ca. 1,5 m.



2. Prüfminute



10. Prüfminute



19. Prüfminute

Abbildung 5-11: Flammenausbildung während des Prüfverlaufs für drei Zeitphasen beim Kalibrierungsversuch DIN1 [96]



3. Prüfminute



12. Prüfminute



19. Prüfminute

Abbildung 5-12: Flammenausbildung während des Prüfverlaufs für drei Zeitphasen beim Kalibrierungsversuch DIN2 [97]

5.2.2 Numerische Untersuchung

Die numerische Simulation der Brandversuche DIN1 und DIN2 erfolgte auf Grundlage der geometrischen und materialspezifischen Randbedingungen gemäß Tabelle 5-1. Des Weiteren wurden für die beiden Brandversuche DIN1 und DIN2 die klimatischen Randbedingungen als Eingangsgröße sowie die Ausgangsparameter aus den Messungen der Brandversuche für die Temperaturen und Sauerstoffkonzentrationen gemittelt, um mögliche Unsicherheiten aufgrund von klimatischen Einflüssen sowie Messungenauigkeiten auszugleichen. Für die numerische Simulation wurden auf dieser Grundlage die Eingangsparameter gemäß DIN_Mittel aus Tabelle 5-1 verwendet.

5.2.2.1 Geometrie

Der Prüfstand einschließlich der Prüfhalle wurde in FDS auf Grundlage der experimentellen Vorgaben entsprechend der Abbildung 5-1 und der Abbildung 5-2 sowie gemäß der Tabelle 5-1 unter Berücksichtigung der unterschiedlich verwendeten Gitterzellengrößen implementiert.

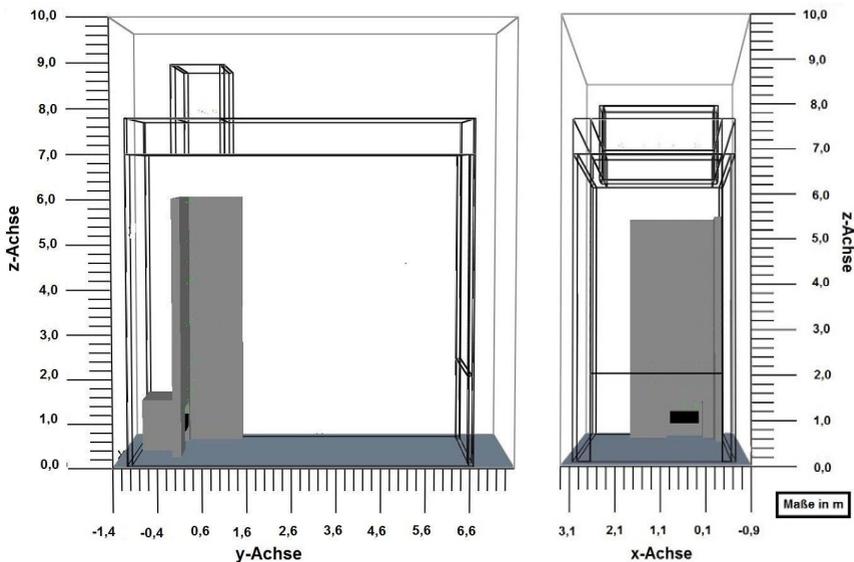


Abbildung 5-13: Darstellung der Simulationsmodelle aus FDS der Kalibrierungsversuche DIN1 und DIN2

5.2.2.2 Gitternetz

Für die Simulation werden zur Bestimmung der Gitternetzstruktur im ersten Simulationsschritt die Gitterzellengrößen mit 5 cm bzw. 10 cm angesetzt. Sofern die Untersuchungen keine ausreichende Konvergenz gewährleisten, werden in weiteren Simulationsschritten die Größen des Rechengitters verfeinert.

Die Bestimmung der notwendigen Gitterzellengröße erfolgte über den Ansatz gemäß Abschnitt 4.2.2. Dabei wurde der charakteristische Branddurchmesser D^* unter Berücksichtigung einer mittleren Umgebungstemperatur von 290 K sowie einer Wärmefreisetzungsrate von 360 kW mit $D^* = 0,64$ bestimmt. Zur Festlegung der notwendigen Gitterzellengröße werden neben dem Ansatz gemäß Abschnitt 4.2.2 die geometrischen Randbedingungen der Prüfhalle, des Prüfstands und des Prüffeuers berücksichtigt. Zur Reduzierung der Rechendauer wurde bei den Validierungsversuchen mit Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie für die Simulationsvarianten mit einer Gitterzellengröße von 5 cm nur der Prüffebereich (Brandkammer, Flamme und Plume) mit einer Gitterzellengröße von 5 cm simuliert. Die Umgebung wurde mit einer Gitterzellengröße von 10 cm geometrisch diskretisiert.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der relevanten Parameter der Gitterzellengrößen auf Grundlage des charakteristischer Branddurchmesser D^*

Gitterzellengröße [cm]	Rechengebiet B x L x H [m]	Gesamtanzahl Zellen	Netzberechnung D^*/dx
ohne Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie			
10	2,7 x 2,5 x 6,0	40.500	6,4
5	2,7 x 2,5 x 6,0	324.000	12,8
mit Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie			
10	4,2 x 9,0 x 10,0	378.000	6,4
5/10	4,2 x 9,0 x 10,0	854.280	12,8

In Tabelle 5-2 sind die wesentlichen Kenngrößen der Gitternetzstruktur der Simulationsvarianten zusammengefasst. Bei einer Gitterzellengröße von 10 cm ergibt sich auf Grundlage der Erläuterungen gemäß 4.2.2 keine ausreichende Gitterzellengröße. Aus diesem Grund ist keine ausreichende Übereinstimmungen zwischen den Ausgangsmessgrößen aus den Experimenten und den Simulationsergebnissen zu erwarten. Bei Berücksichtigung einer Gitterzellengröße von 5 cm werden die Empfehlungen auf Grundlage der Validierungsstudie gemäß [85] in guter Näherung eingehalten.

Die Validierungsversuche mit einer Gitterzellengröße von 5 cm bzw. 10 cm wurden mit der Open-MPI Funktion in FDS am Clustersystem der Leibniz Universität Hannover berechnet. Dazu wurde das Rechengebiet in einzelne Gitternetze entsprechend Abbildung 5-14 zerlegt.

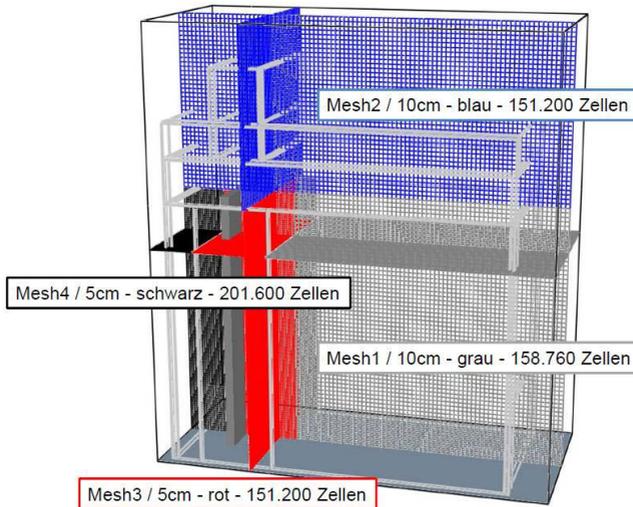


Abbildung 5-14: Darstellung der Aufteilung des Simulationsmodells in die Gitternetze Mesh1 bis 4 für die Berechnung über die Open-MPI Funktion

5.2.2.3 Simulation Prüffeuern

Die Bestimmung der maßgebenden Wärmefreisetzungsrate für die numerische Untersuchung erfolgte auf Grundlage von zwei Untersuchungsvarianten. Bei der Simulation der Varianten sollte bestimmt werden, welche Variante eine genauere Validierung des Prüffeuers erreicht.

Bei der Variante Var1 wird die Wärmefreisetzungsrate durch einen definierten Gasdurchfluss über sogenannte Sprühdüsen in einen Wannenbehälter simuliert und über sogenannte repräsentative „Partikel“ dargestellt. Für die notwendige Angabe der Verbrennungswärme wurde der Heizwert des Butan-Propan-Gemisch mit $H_o = 48,65$ MJ/kg angesetzt. Der erforderliche Gasdurchfluss von 7,4 g/s wurde auf die drei vorgesehenen Sprühdüsen gleichmäßig aufgeteilt und in einem Winkel von 45° von oben ins Gehäuse eingeleitet.

Bei der Variante Var2 wird der in Abbildung 5-16 dargestellte Verlauf der Wärmefreisetzungsrate auf die Grundfläche des modellierten Kompakt-Gasbrenners über die Flächenzuweisung & SURF ID projiziert und über den Befehl & RAMP_Q gesteuert.

Die Varianten sind in Abbildung 5-15 visuell gegenübergestellt.

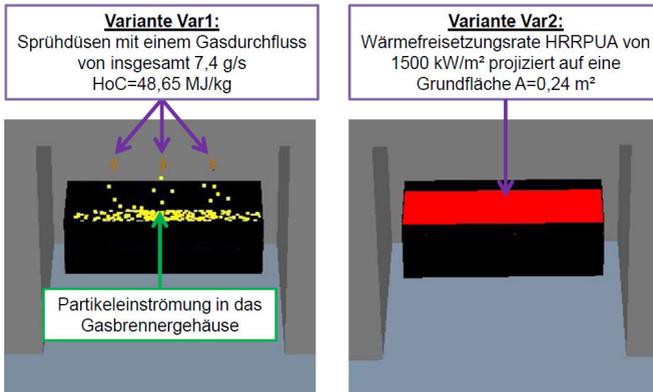


Abbildung 5-15: Darstellung der Brennavarianten Var1 und Var2 für die Modellierung des Prüffeuers in FDS

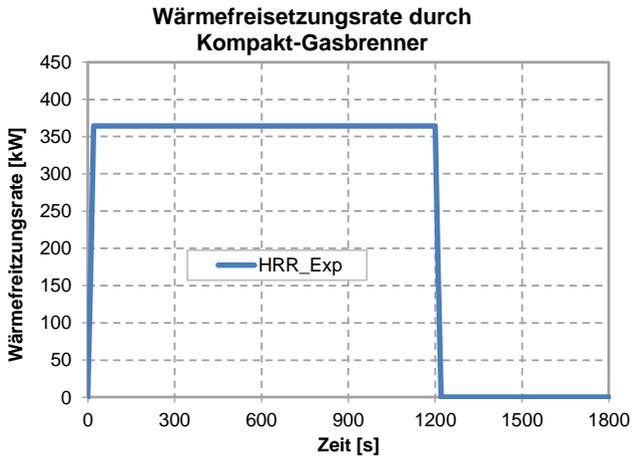


Abbildung 5-16: Verlauf der vorgegebenen Wärmefreisetzungsrate für die numerischen Untersuchungen in FDS für Var2

Auf Grundlage der Temperaturverläufe aus den experimentellen Untersuchungen gemäß Abschnitt 5.2.1 wird deutlich, dass der Kompakt-Gasbrenner bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate zeitlich zur Entzündung nachläuft. Ähnliche Randbedingungen sind auch bei der Abklingphase bis zur vollständigen Abschaltung des Brenners zu beobachten. Aus diesem Grund wird bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate ein linearer Anstieg in den ersten 20 Sekunden nach Prüfbeginn angesetzt. Das Abschalten des Brenners erfolgt nach der 1.200 Prüfsekunden mit einer zusätzlich berücksichtigten linearen Abklingphase von 20 Sekunden.

Propan als Brennstoff ist in FDS vordefiniert. Aufgrund der experimentellen Ergebnisse sind jedoch für einige Parameter Modifizierungen und ergänzende Angaben für die Simulation notwendig. Die berücksichtigten Brennstoffparameter in FDS sind der nachfolgenden Tabelle 5-3 zu entnehmen.

Tabelle 5-3: Verbrennungsparameter in FDS für den Brennstoff Propan einschließlich der Erkenntnisse aus den experimentellen Vorgaben

	Propan	Einheit	Quelle
Chemische Formel	C ₃ H ₈	[-]	vgl. Tabelle 2-7
Heat of Combustion H_c	48,65	[MJ/kg]	vgl. Experiment
RADIATIVE_FRACTION χ_r	0,3	[-]	vgl. Tabelle 2-7
CO-Yield Y_{CO}	0,005	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7
Soot-Yield $Y_{Ruß}$	0,015	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7

5.2.2.4 Verwendete Materialien

Die materialspezifischen Kenngrößen für die Berechnungen in FDS wurden unterschiedlichen Literaturquellen entnommen. Die zugehörigen Quellenangaben der verwendeten Materialien einschließlich ggf. angesetzter instationärer, materialspezifischer Eigenschaften sind detailliert in der Anlage F dargestellt.

Die Zuweisung der materialspezifischen Eigenschaften zu den simulierten Bauteilen in FDS erfolgt auf Grundlage der Tabelle 5-1.

In Tabelle 5-4 werden die notwendigen Eingabeparameter für die verwendeten Materialien bei den Versuchen DIN1 und DIN2 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5-4: Materialspezifische Eigenschaften für die Eingabe in FDS

Material	Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m ³]	Emissionsgrad [-]
Stahl*	0,45	54	7.850	0,7**
Beton*	0,9	1,64	2.100	0,7**
Kalksandstein*	1,02	1,0	1.600	0,8**

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS und ggf. temperaturabhängiger Materialeigenschaften sowie Quellennachweise s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

5.2.3 Ergebnisse

Zunächst werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen der Varianten Var1 und Var2 unter Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie vorgestellt. Dabei werden die Wärmefreisetzungsrate, die Temperaturen, die Emissionswerte und die Flammenausbildung ausgewertet und mit den Ergebnissen aus den experimentell durchgeführten Brandversuchen verglichen. Im Weiteren wird durch eine zusätzliche Untersuchungsreihe der Einfluss der Umfassungsgeometrie der Prüfhalle untersucht.

5.2.3.1 Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie

Auswertung Wärmefreisetzungsrate

In Abbildung 5-17 wird der implementierte, instationäre Verlauf der Wärmefreisetzungsrate den erfassten Ausgangsparametern in FDS aus den Simulationsvarianten Var1 und Var2 mit den Gitterzellengröße von 5 und 10 cm gegenübergestellt.

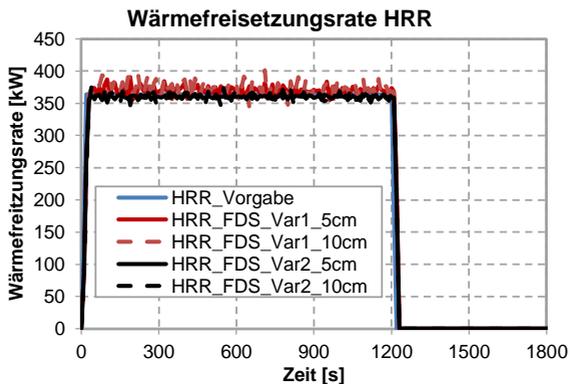


Abbildung 5-17: Vorgegebene Wärmefreisetzungsrate im Vergleich zu den simulierten Wärmefreisetzungsrate der Varianten Var1 und Var2 für eine Gitterzellengröße von 5 und 10 cm

Dabei zeigt die Variante Var1 gegenüber Var2 einen inkonstanteren Verlauf bei der simulierten Wärmefreisetzungsrate im Messintervall von 10 Sekunden. Die Abweichungen zum Verlauf der Wärmefreisetzungsrate wurden in Tabelle 5-5 quantifiziert und für die einzelnen Varianten gegenübergestellt.

Die maximale Abweichung zwischen der vorgegebenen Wärmefreisetzungsrate und dem Ergebnis aus der Simulation wurde für Var1 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm mit ca. 2,5 % bestimmt. Grund hierfür ist die Registrierung der Messdaten in FDS im Zeitintervall von 10 Sekunden und der groben Gitternetzstruktur mit einer Gitterzellengröße von 10 cm.

Die auftretenden Ungenauigkeiten sind unter Betrachtung der insgesamt freigesetzten Wärmeenergie zu vernachlässigen. Grundsätzlich zeigt die Variante Var1 im Vergleich zu Variante Var2 höhere Abweichungen auf, welche jedoch ebenfalls aufgrund der Geringfügigkeit vernachlässigbar sind.

Tabelle 5-5: Auswertung der freigesetzten Wärmeenergie in MJ über die Prüfzeit von 1.800 Sekunden sowie prozentuale Abweichung der untersuchten Varianten gegenüber der vorgegeben Wärmefreisetzungsrate

	Vorgabe	Var1_5cm	Var1_10cm	Var2_5cm	Var2_10cm
freigesetzte Wärmeenergie [MJ]	432,00	438,35	443,39	433,91	434,83
Abweichung gegenüber Vorgabe [%]	-	1,5	2,5	0,44	0,65

Auswertungen Temperaturen

Im Folgenden werden die Temperaturmessstellen aus den experimentellen Untersuchungen mit den Ergebnissen aus der Simulation für die einzelnen Varianten gegenübergestellt. Aufgrund der geringfügigen Energieleistung des Prüffeuers (skaliert) sind lediglich die Messstellen an den Achsen DB und DC für die Auswertung als relevant zu betrachten, da sich ausschließlich diese im Bereich der Flamme und der Plume befinden.

Temperaturen Brandkammer

In Abbildung 5-18 werden die Temperaturverläufe an den Messstellen ST1 und ST2 für die Varianten Var1 und Var2 unter Betrachtung der zwei untersuchten Gitterzellengrößen von 5 und 10 cm den gemittelten Temperaturen aus den Brandversuchen DIN1 und DIN2 gegenübergestellt.

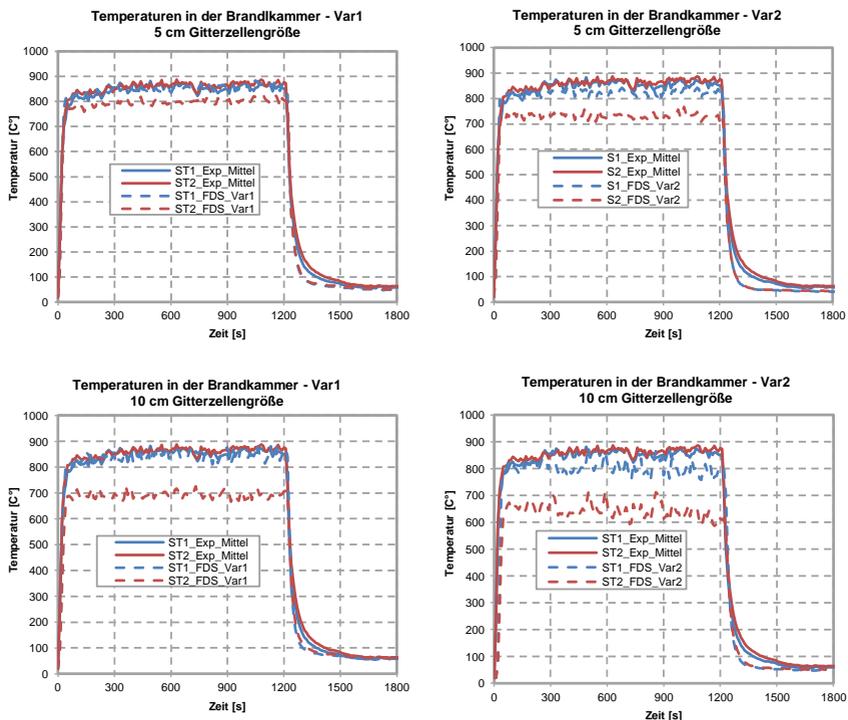


Abbildung 5-18: Darstellung der Temperaturverläufe in der Brandkammer an den Messstellen ST1 und ST2 für die Simulationsvarianten Var1 und Var2 und den gegenübergestellten gemittelten Temperaturverläufen aus den Brandversuchen DIN1 und DIN2

Aus der Darstellung der Temperaturverläufe gemäß Abbildung 5-18 wird deutlich, dass die Messstelle ST1 für alle Simulationsvarianten eine gute Validität mit den gemittelten experimentellen Ergebnissen vorweisen.

Die Betrachtung der Temperaturverläufe für die Messstelle ST2 zeigt, dass erst eine Gitterzellengröße von 5 cm zu einer verbesserten Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment führt. Dies ist auf die Flammene Ausbildung in der Brandkammer zurückzuführen, die erst mit einer Gitterzellengröße von 5 cm ausreichend genau simuliert

werden kann. Hinzu kommt, dass die Messstelle ST2 in den Brandversuchen nicht ausreichend deckungsgleich mit der angegebenen Position aus dem Prüfbericht war.

Temperaturen Achse DB

Die Temperaturverläufe für die Messstellen der Achse DB sind für die Simulationsvarianten und den gemittelten Ergebnissen der Brandversuche in der Abbildung 5-19 dargestellt.

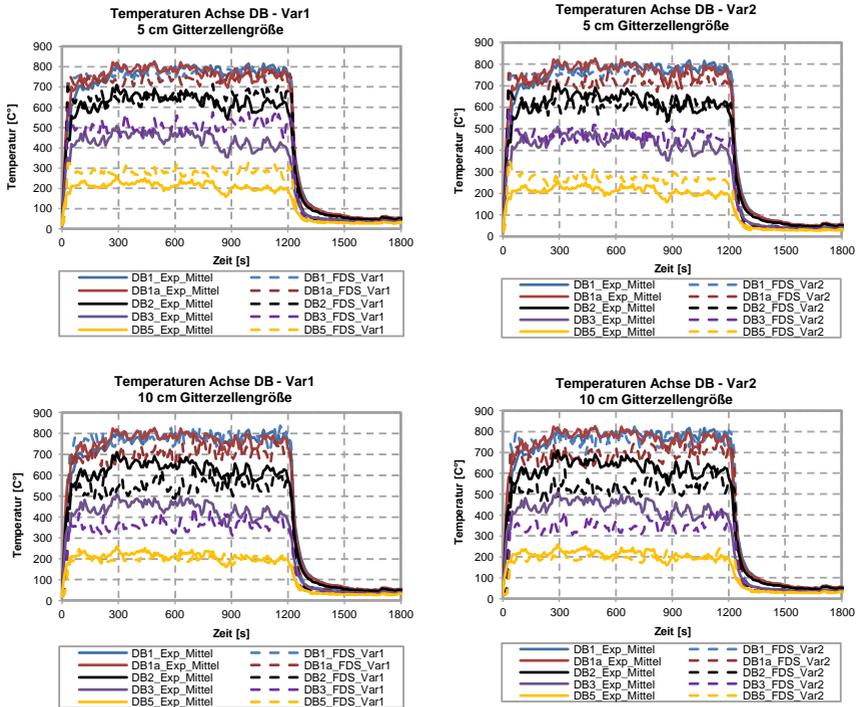


Abbildung 5-19: Temperaturentwertung entlang Achse DB der wesentlichen Messstellen für die Varianten Var1 und Var2 für die untersuchten Gitterzellengrößen 5 und 10 cm

Bei einer Gitterzellengröße von 5 cm zeigen die Varianten Var1 und Var2 für die Temperaturverläufe zwischen Experiment und Simulation eine gute Übereinstimmung auf. Die Varianten mit einer Gitterzellengröße von 10 cm weichen, wie erwartet, deutlicher ab.

Temperaturen Achse DC

Die Betrachtung der Temperaturverläufe an der Achse DC in Abbildung 5-20 verdeutlichen den Einfluss der Gitterzellengröße auf die Ergebnisse der Simulation. Sowohl die Variante Var1 als auch die Variante Var2 zeigen bei den Temperaturverläufen an den Messstellen der Achse DC zwischen Experiment und Simulationen wieder eine gute Übereinstimmung auf.

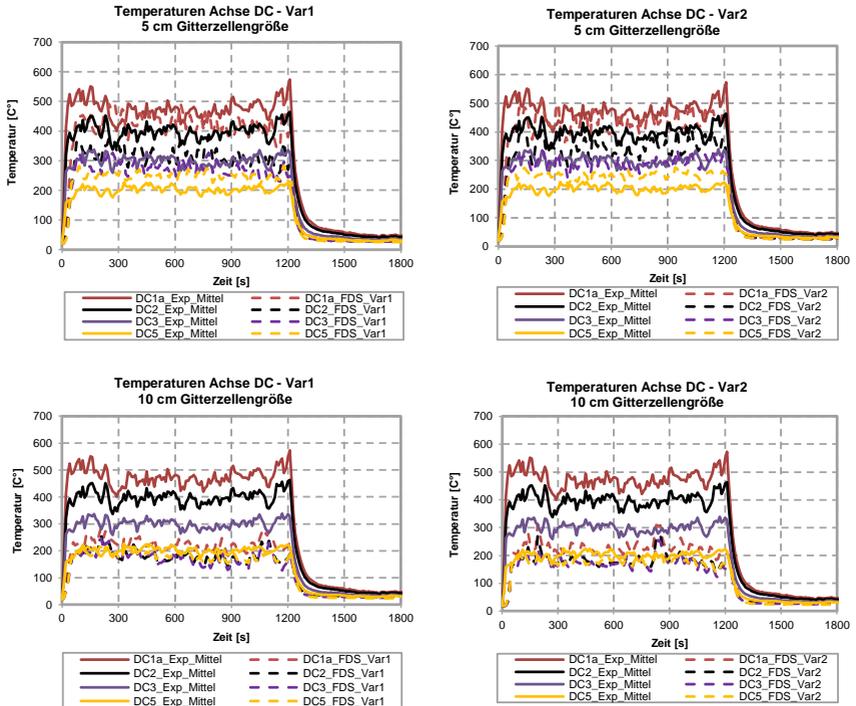


Abbildung 5-20: Temperaturauswertung entlang Achse DC der wesentlichen Messstellen für die Varianten Var1 und Var2 für die untersuchten Gitterzellengrößen 5 und 10 cm

Bei einer Gitterzellengröße von 10 cm ist auf Grundlage der Temperaturverläufe keine Validität zwischen Simulation und Experiment nachzuweisen. Eine geometrische Diskretisierung des Simulationsmodells mit einer Gitterzellengröße von 10 cm ist bei einer Prüffeuereistung von 360 kW somit nicht geeignet, um lokale Temperaturen an der Prüfwand ausreichend genau bestimmen zu können.

Emissionswerte

Bei der Auswertung des Sauerstoffverbrauchs werden die Ergebnisse an den Messpunkten A-D gemäß Abbildung 10-1 in der Anlage D aus dem Experiment und den einzelnen Simulationsvarianten gemittelt und in Abbildung 5-21 dargestellt.

Hierbei wird wieder deutlich, dass erst eine Gitterzellengröße von 5 cm zu guten Übereinstimmungen zwischen Experiment und Simulation führt.

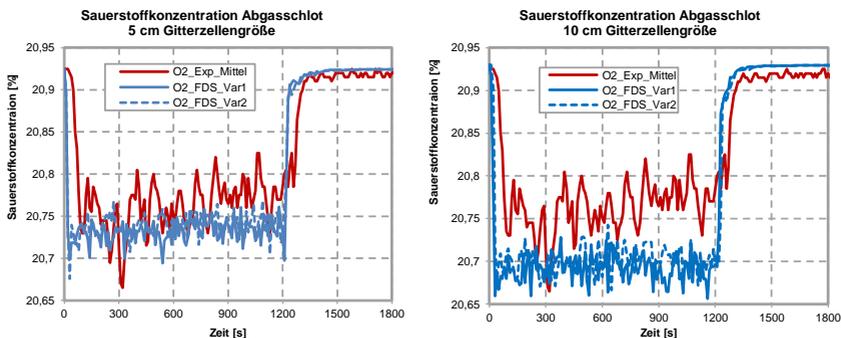


Abbildung 5-21: Auswertung des Sauerstoffverbrauchs im Abgasschlot für die Varianten Var1 und Var2 bei einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm

Flammenausbildung

Die Auswertungen der Flammenausbildung aus der Simulation zeigen bei allen Versuchen eine ständige Flammenhöhe von ca. 1 m auf (vgl. Abbildung 5-22) und entsprechen somit der Flammenhöhe aus den Brandversuchen DIN1 und DIN2.

Die intermittierende Flamme erreicht bei den Simulationen bei einer Gitterzellengröße von 5 cm maximale Flammenhöhen von ca. 2 m, was bei Betrachtung der Temperaturverläufe am Messpunkt DB5, die erhöhten Temperaturen in der Simulation gegenüber dem Experiment erklärt.

Ein Einfluss auf die Flammenausbildung durch die Eckausbildung des Prüfstands konnte aufgrund der visuellen Auswertungen sowie durch die Temperaturverläufe an den Achse DB und DC nicht festgestellt werden.

Die Abbildung 5-22 zeigt eine schmalere Ausbildung der austretenden Flamme aus der Brandkammeröffnung bei den Simulationsvarianten mit einer Gitterzellengröße von 10 cm gegenüber den Varianten mit einer Gitterzellengröße von 5 cm auf. Das Flammenbild

verdeutlicht nochmal, warum bei den Varianten mit einer Gitterzellengröße von 10 cm die Temperaturverläufe in Achse DC gegenüber den Varianten mit einer Gitterzellengröße von 5 cm deutlich abweichen.

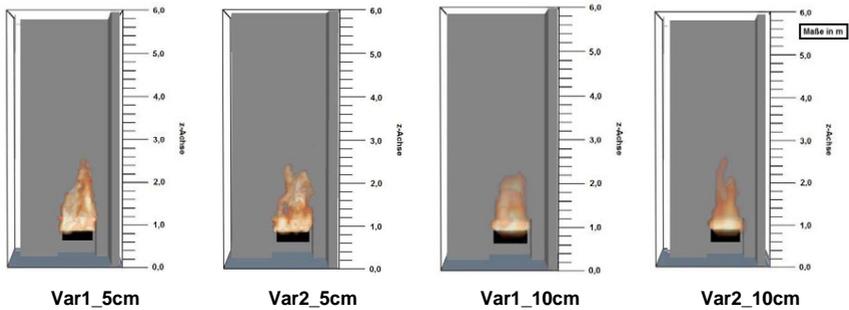


Abbildung 5-22: Flammenausbildung in der Simulation für die zwei untersuchten Varianten Var1 und Var2 bei unterschiedlicher Gitterzellengröße

5.2.3.2 Ohne Berücksichtigung der Prüfhallegeometrie

Im folgenden Untersuchungsschritt wird überprüft, welchen Einfluss die Berücksichtigung der Prüfhallegeometrie, aufgrund der Umfassungsbauteile und den definierten Strömungsverhältnissen aus Zu- und Abluft, auf die Simulationsergebnisse hat. Dazu werden die Simulationsvarianten Var1 und Var2 mit einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm ohne Berücksichtigung der Prüfhalle simuliert. In Abbildung 5-23 ist das angepasste Simulationsmodell dargestellt.

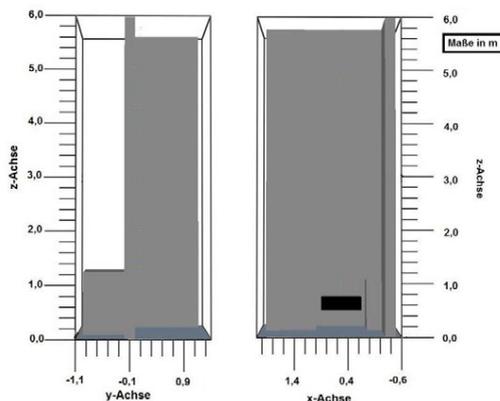


Abbildung 5-23: Geometrie in der Simulation der Varianten Var1 und Var2 ohne Prüfhalle für die Gitterzellengrößen mit 5 und 10 cm (Var1_oP u. Var2_oP)

Die Ergebnisse aus den zwei Simulationsvarianten Var1 und Var2 sind qualitativ betrachtet nahezu identisch. Zur besseren Übersicht wird aus diesem Grund nur die Auswertung der Temperaturverläufe für die Simulationsvariante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 5 cm an den Achse DB und DC in Abbildung 5-24 gegenübergestellt.

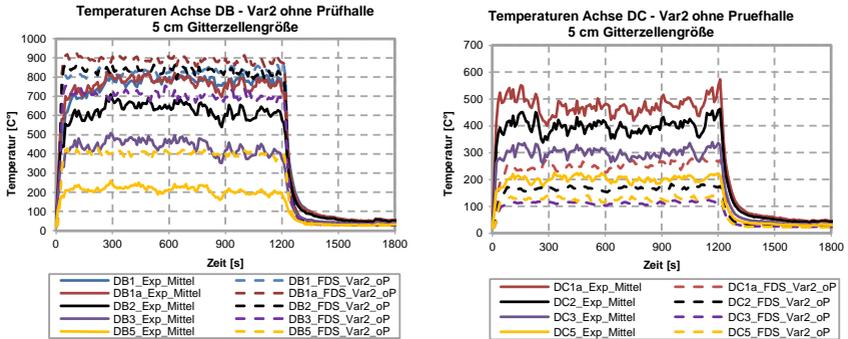


Abbildung 5-24: Darstellung der Temperaturverläufe entlang Achse DB und DC für ausgewählte Messstellen der Varianten Var2 ohne Berücksichtigung der Prüfhalle

Die Temperaturverläufe mit dem geänderten Umgebungsmodell zeigen keine Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation auf. In der Achse DB sind die Temperaturverläufe aus der Simulation gegenüber dem Experiment für alle dargestellten Messstellen deutlich höher und in der Achse DC deutlich niedriger.

Somit ist bei Prüffeuern in Brandkammern von mittel skalierten Brandversuchen die Berücksichtigung der geometrischen Umgebungsbedingungen für die Simulation und den resultierenden lokalen Messergebnissen für eine ausreichende Validität zwischen Experiment und Simulation notwendig. Inwieweit diese Erkenntnis auf groß skalierte Brandversuche angewendet werden muss, wird im Abschnitt 5.3 genauer untersucht.

5.2.3.3 Wärmestromdichten

In Abbildung 5-25 sind die Wärmestromdichten als Isothermen für die Oberfläche der Prüfwand mit Darstellung der max. Wärmestromdichte von 50 kW/m^2 und 35 kW/m^2 für die Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 5 cm dargestellt. Bei Betrachtung der Eckwand wird eine Wärmestromdichte von maximale $10 - 15 \text{ kW/m}^2$ während der gesamten Prüfzeit auf einer Oberfläche $< 0,5 \text{ m}^2$ simuliert. Die simulierte Wärmestromdichte ist grundsätzlich nicht ausreichend, um eine spontane Entzündung von brennbaren Außenwandbekleidungen, wie z. B. VHF mit Holzbekleidungen (Wärmestrom für die spontane Entzündung ca. 28 kW/m^2 [118]) oder WDVS mit EPS (Wärmestrom für die spontane Entzündung

ca. 30 kW/m^2 bei einer Beanspruchungszeit > 15 Minuten [99]), zu erreichen. Somit wird für den Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] deutlich, dass die Eckwandausbildung bei einem seitlichen lichten Abstand zwischen Brandkammerlaibung und Eckwand von $0,3 \text{ m}$ bei dem skalierten Prüffeuern nur einen geringen Einfluss hat.

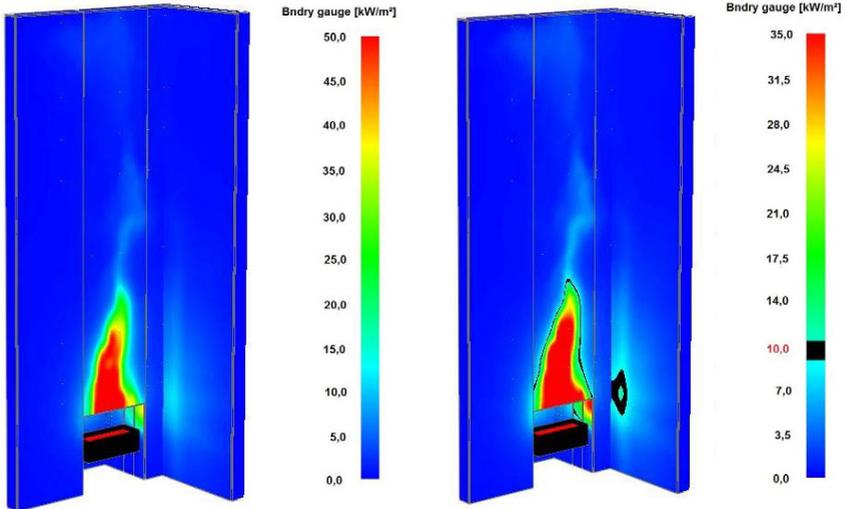


Abbildung 5-25: Maximale einwirkende Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) in kW/m^2 ; links max. 50 kW/m^2 ; rechts max. 35 kW/m^2

In Abbildung 5-26 wird der Verlauf der einwirkenden Wärmestromdichte der Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 5 cm unter Berücksichtigung des Einflusses der Prüfhalle für den Strahlungsanteil und den konvektiven Anteil gegenübergestellt. Die Einwirkung auf die Prüfwandfläche während der Beanspruchungszeit von 1.200 Sekunden beträgt im Mittel $65,8 \text{ kW}$. Davon beträgt der konvektive Anteil ca. $14,9 \text{ kW}$ und der Strahlungsanteil ca. $50,9 \text{ kW}$. Somit ergibt sich ein %-Anteil zwischen Konvektion und Strahlung von ca. 23% zu 77% . Die Wärmestromdichte infolge Strahlung des Prüffeuers ist somit die deutlich dominierende Einwirkungsgröße auf die Prüfwand. Insgesamt beträgt die einwirkende Wärmeenergie auf die Prüfwand $79,6 \text{ MJ}$ bei einer insgesamt freigesetzten Wärmeenergie des Prüffeuers von 434 MJ .

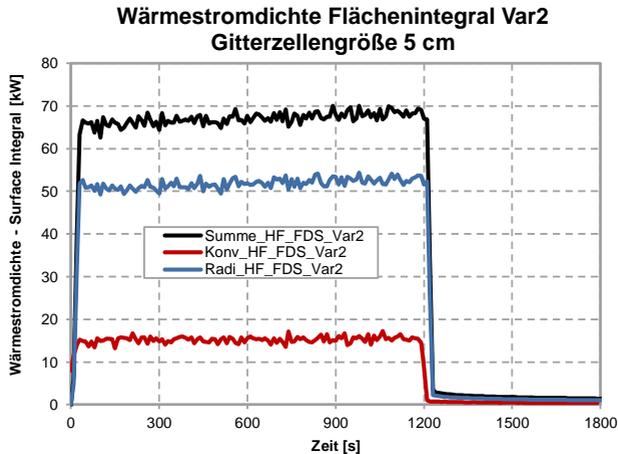


Abbildung 5-26: Flächenintegral der einwirkenden Wärmestromdichte infolge Konvektion und Strahlung (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwand

5.2.4 Fazit

Zur Simulation des Gasbrenners haben sich sowohl die Variante Var1 als auch die Variante Var2 gemäß Abschnitt 5.2.2.3 als ausreichend valide dargestellt. Aufgrund der geringen Leistung des Prüffeuers in der Brandkammer im mittel skalierten Brandversuch konnte in der Simulation erst aber einer Gitterzellengröße von 5 cm und unter Berücksichtigung der Umgebungsgeometrie der Prüfhalle die notwendige Übereinstimmung bei den untersuchten Ausgangsparametern der Temperaturen und der Emissionswerte zwischen Experiment und Simulation erzielt werden. Die Variante Var2 ist gegenüber der Variante Var1 aufgrund der kürzeren Simulationsdauer die bevorzugte Simulationsvariante von Gasbrennern.

Die untersuchte thermische Beanspruchung der Rück- und Eckwand haben deutlich aufgezeigt, warum die Brandprüfung gemäß DIN 4102-20 [32] in die Kategorie der mittel skalierten Brandversuche einzuordnen ist.

5.3 Holzkrippe

5.3.1 Experimentelle Untersuchung

Zur Validierung der Simulationsvarianten mit einer einzelnen Holzkrippe als Prüffeuern dienen zwei Kalibrierungsversuche des Sockelbrandversuches gemäß MVV TB [107], welche im Zuge des Forschungsthemas „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“ ([94], [95]) untersucht wurden. Ein weiterer durchgeführter Kalibrierungsversuch im Zuge des Forschungsthemas wurde, aufgrund der großen Abweichungen in der bestimmten Wärmefreisetzungsrate für die Holzkrippe zu den zwei anderen Kalibrierungsversuchen, von der Untersuchung ausgeschlossen.

Die Kalibrierversuche wurden 2013 an einem Prüfstand gemäß den Anforderungen nach MVV TB [107] an der MFPA Leipzig durchgeführt. Der Kalibrierungsversuch gemäß [94] wird nachfolgend als Kali1 und der Kalibrierungsversuch gemäß [95] als Kali2 bezeichnet. Beide Versuche dienen zur Validierung der Simulation von Holzkrippen vor einem Fassadenprüfstand. Insgesamt werden vier Ansätze zur Simulation der Holzkrippe unter Berücksichtigung der vorgegebenen Wärmefreisetzungsrate vorgestellt und untersucht.

5.3.1.1 Randbedingungen

Beide Kalibrierungsversuche wurden in einer witterungsgeschützten Versuchshalle mit den Abmessungen $B \times L \times H = 8,12 \text{ m} \times 6,7 \text{ m} \times 10,0 \text{ m}$ unter natürlichen Lüftungsbedingungen durchgeführt. Die genauen geometrischen Randbedingungen sind der Abbildung 5-27 und der Abbildung 5-28 zu entnehmen.

In der Tabelle 5-6 sind die wesentlichen klimatischen, geometrischen und material-spezifischen Randbedingungen der Brandversuche übersichtlich zusammengefasst. Ergänzt wird die Tabelle durch Angaben zum Prüffeuern und der Beanspruchungszeit. Die Klimawerte für den Außenbereich wurden von der Stationsmessung vom Deutschen Wetterdienst [25] am Standort Leipzig für die exakte Prüfstunde berücksichtigt.

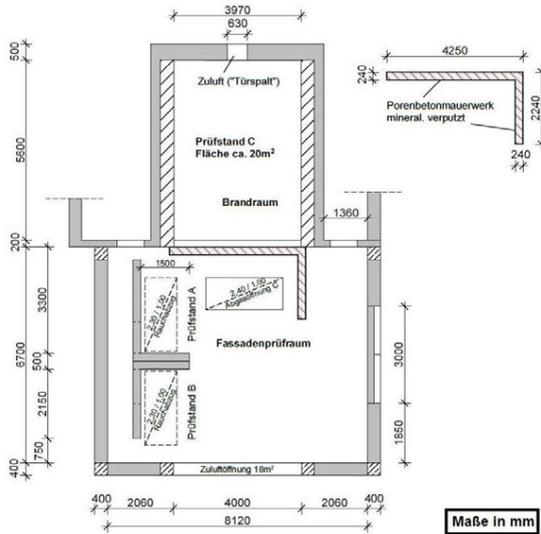


Abbildung 5-27: Grundriss des Prüfstands gemäß MVV TB [107] der MFPA Leipzig [94]

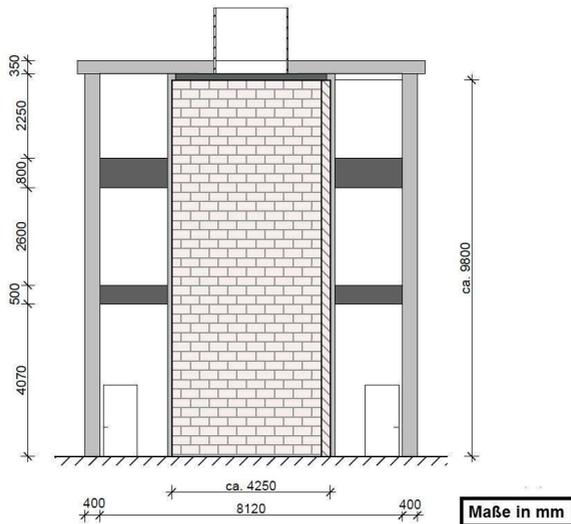


Abbildung 5-28: Ansicht des Prüfstands gemäß MVV TB [107] an der MFPA Leipzig [94]

Tabelle 5-6: Versuchsrandbedingungen der Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2 ([94], [95])

Klimatische Randbedingungen						
Versuch	Temperatur [°C]		Relative Luftfeuchte [%]		Wind	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Außen	
Kali1	8	4	68	90	keine Angaben	
Kali2	10	7	50	61	stark böiger Wind	
Kali_Mittel	9	6,5	59	70	–	
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen						
Bauteil		Innenmaße [m]	Material			
Prüfstand	Rückwand B x H	4,0 x 9,8	Porenbetonmauerwerk mineralisch verspachtelt			
	Eckwand B x H	2,0 x 9,8				
Prüfhalle	Grundfläche B x L	6,7 x 8,12	Stahlbeton und Kalksandsteinmauerwerk			
	Höhe H	10,0				
Lüftungs- bedingungen	Zuluft B x H	4,0 x 4,5 (teilweise geöffnet)	–			
	Abluft B x L	1,0 x 2,4				
Prüfeuere						
	Maße Krippe b x l x h _c [m]	Maße Stab D x B x l [m]	Masse [kg]	Stab / Luft	H _{u,eff} [MJ/kg]	Zündinitial
Holzkrippe (Fichte)	1,1 x 1,1 x 0,72	0,04 x 0,04 x 1,1	200 kg	1/1	17,28	4 x Stahlwanne mit jeweils 200 ml Isopropanol
Beanspruchungszeit Kalibrierungsversuche						
45 Minuten						

5.3.1.2 Prüfeuere

Die Brandbeanspruchung der Prüfwand erfolgte über eine ca. 200 kg Holzkrippe mit den Stabmessungen $b \times l \times h_c = 0,04 \text{ m} \times 0,04 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}$. Das Stab-Luft-Verhältnis der Holzkrippe war im Verhältnis 1:1. Die Verlegung der jeweiligen Schicht wurde kreuzweise ausgeführt. Außerdem wurden die Stäbe zur Gewährleistung einer höheren Stabilität der Holzkrippe untereinander vernagelt. Unterhalb der Holzkrippe wurde eine Abbrandwaage positioniert, welche die Ermittlung des Gewichtsverlusts über Weg-Zeit-Aufnehmern ermöglicht hat.

Die Holzstäbe wurden bis zum Erreichen ihrer Gewichtskonstanz in einem Klimaraum mit einem Normklima von 23 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 % gelagert. Der Aufbau der Holzkrippe am Prüfstand erfolgte frühestens ein Tag vor der durchgeführten Prüfung. Die Holzkrippe wurde, wie in Abbildung 5-29 dargestellt, in einem Abstand von ca. 0,1 m jeweils zur Rück- und Eckwand unmittelbar in der Ecke des Prüfstandes platziert.



Abbildung 5-29: 200 kg Holzkrippe im Kalibrierungsversuch mit einer zusätzlichen Aufständering auf Mauerwerkssteinen [94]

In Abbildung 5-30 sind die ermittelten Wärmefreisetzungsraten aus den Abbrandraten ausgewiesen. Dabei wurde die Darstellung der Wärmefreisetzungsrate auf insgesamt 2.100 Sekunden beschränkt, da zu diesem Zeitpunkt mehr als 90 % der Masse umgesetzt waren und keine signifikanten Temperaturbeanspruchungen auf die Prüfwand mehr vorherrschten.

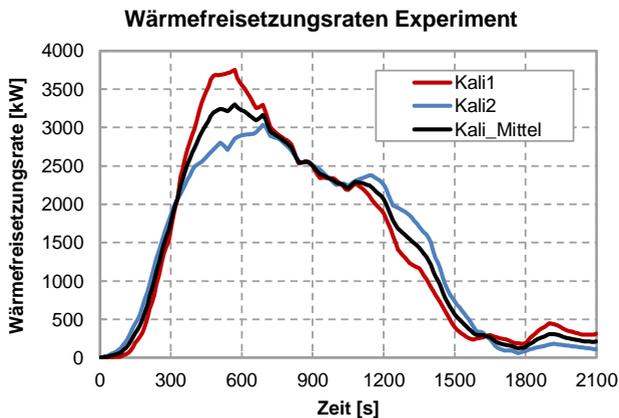


Abbildung 5-30: Wärmefreisetzungsraten der Holzkrippen für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2 sowie die gemittelte Wärmefreisetzungsrate Kali_Mittel mit einer Geometrie von 1,1 m x 1,1 m x 0,72 m

Insgesamt zeigen beide Verläufe für die Wärmefreisetzungsrate eine gute Übereinstimmung über die Prüfzeit. Zum Zeitpunkt der 1.500. Prüfsekunde haben beide Holzkrippen eine Gesamtmasse von ca. 86 % umgesetzt. Die beiden Wärmefreisetzungsdaten werden durch die Darstellung der gemittelten Wärmefreisetzungsrate in Abbildung 5-30 ergänzt.

5.3.1.3 Messdaten

Während der Brandversuche wurden Temperaturen, Wärmestromdichten und Flammenhöhen gemessen. Eine Gasanalyse im Abgasschlot wurde nicht durchgeführt. Das Zeitintervall zur Erfassung der Messdaten wurde mit 10 Sekunden angesetzt. Die Temperaturen unmittelbar am Prüfstand wurden in beiden Versuchen gemäß Abbildung 5-5 in einem Abstand von 0,01 m vor der Prüfwand erfasst. Diese wurden dabei mit NiCr-Ni Mantelthermoelementen Typ K gemäß JEC 584 Teil 1, mit einem Thermodrahtdurchmesser von 0,37 mm und einem Manteldurchmesser von 3 mm gemessen und online mit einem Messsystem TUM 99-2 registriert. Die Flammenhöhen wurden visuell durch Abgleich mit Messmarken am Prüfstand erfasst.

Außerdem wurde jeweils ein Mantelthermoelement mit der Bezeichnung ST1 seitlich und ST2 oberhalb der Holzkrippe angeordnet. Im Abstand von 1,0 m zur Eckwand und 0,1 m zur Rückwand wurden zusätzlich fünf Plattenthermoelemente gemäß DIN EN 1363-1 [36] in unterschiedlichen Höhen positioniert. An den gleichen Positionen wurde jeweils ein Mantelthermoelement angeordnet. Im Abstand von 3 m zur Rückwand wurden insgesamt drei Strahlungsaufnehmer entsprechend den Positionen in Abbildung 5-5 vorgesehen.

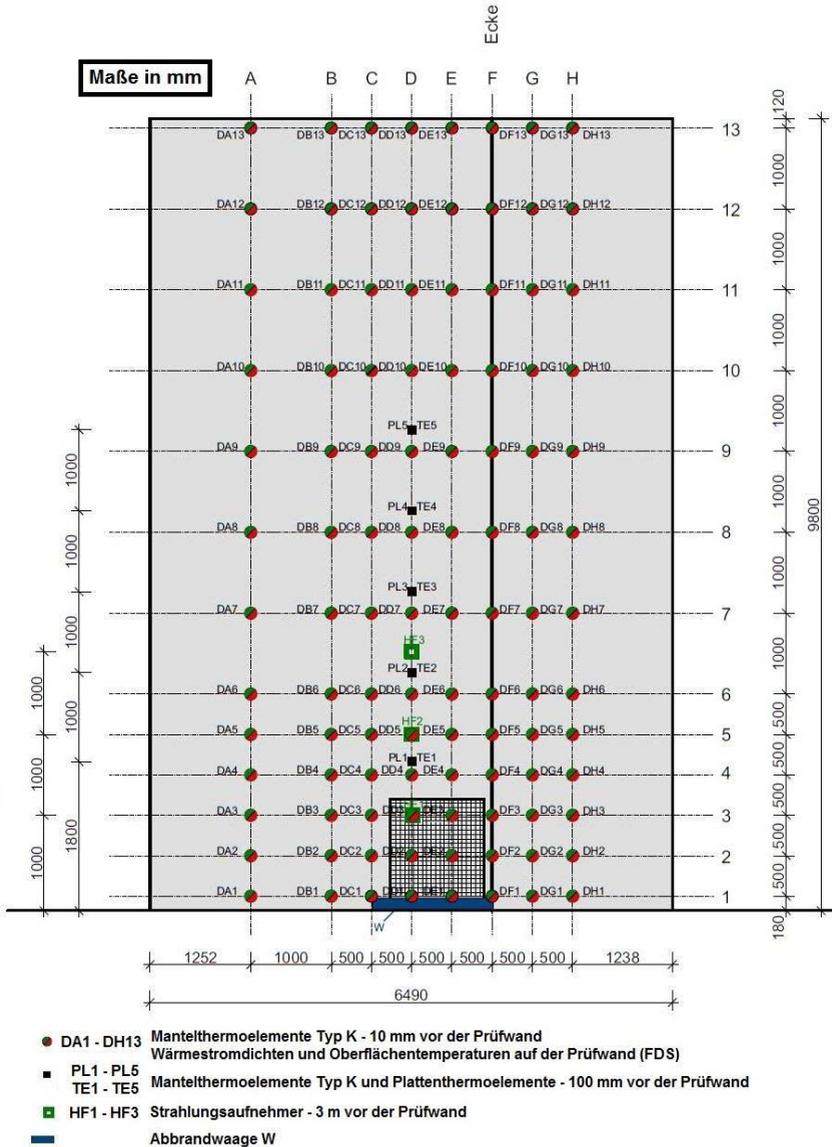


Abbildung 5-31: Messstellenplan der Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2 mit ergänzenden Messstellen für die weiterführenden Untersuchungen in FDS

5.3.1.4 Versuchsergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den Kalibrierungsversuchen Kali1 und Kali2 zusammenfassend dargestellt. Bei der Darstellung der Temperaturen der einzelnen Achsen werden zur besseren Übersicht die Messstellen nur an jedem zweiten Messpunkt, beginnend ab Zahlenachse 3, dargestellt.

Temperaturen

In Abbildung 5-32 werden die Temperaturverläufe ST1 seitlich und ST2 oberhalb der Holzkrippe gegenübergestellt. Die Temperaturen an der Messstelle ST2 oberhalb der Holzkrippe zeigen für beide ausgewerteten Kalibrierungsversuche bis zur 25. Prüfminute eine sehr gute Übereinstimmung untereinander auf. Auffällig ist, dass der Verlauf beim Kalibrierungsversuch Kali2 während der Abklingphase einen langsameren Temperaturabfall aufweist als Kali1. Bei der Auswertung der Videoaufzeichnungen wird in diesem Zusammenhang deutlich, dass sich die Holzkrippen bei Versuch Kali1 aufgrund des Stabilitätsversagens deutlich mehr an die Eckwand neigt, als bei Versuch Kali2 und somit die Flamme in der Abklingphase bei Kali1 nicht mehr im Bereich des Mantelthermoelements wirkt.

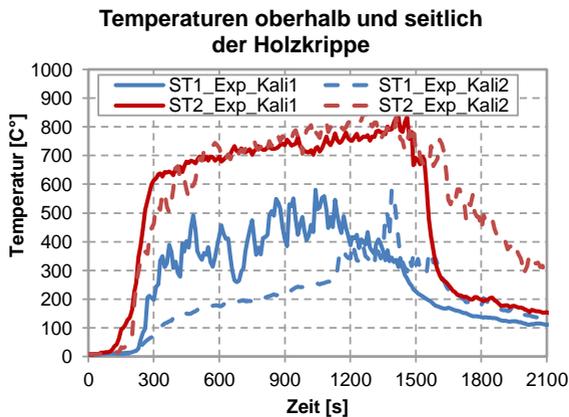


Abbildung 5-32: Gemessene Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelemente ST1 seitlich und ST2 oberhalb der Holzkrippen für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2

Bei der Messstelle ST1 betragen die Temperaturdifferenzen zwischen den Brandversuchen, insbesondere in der Vollbrandphase der Holzkrippe, z. T. bis zu 300 °C. Unter Betrachtung des Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate sowie bei der Auswertung der Videoaufnahmen

konnte keine Begründung hierfür abgeleitet werden. Somit ist davon auszugehen, dass die Messstellen bei den Brandversuchen unterschiedlich positioniert waren oder unterschiedlich von der Flamme aus der Position bei Versuchsbeginn abgelenkt worden sind, sodass keine Übereinstimmung erzielt werden konnte.

In Abbildung 5-33 sind die Temperaturverläufe der Plattenthermoelemente an der Rückwand für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2 gegenübergestellt. Die Temperaturverläufe unterscheiden sich dabei zwischen den Versuchen deutlich. Beim Versuch Kali1 erreichen die Messstellen PL1 bis PL3 während der Vollbrandphase Temperaturen von über 500 °C, was auf die Flammenwirksamkeit in diesem Bereich hindeutet und auf Grundlage der Videoaufzeichnungen bestätigt werden kann. Beim Versuch Kali2 befand sich die Flamme näher an der Eckwand, sodass bei diesem Versuch nur die Strahlungswirkung der Flamme maßgebend war.

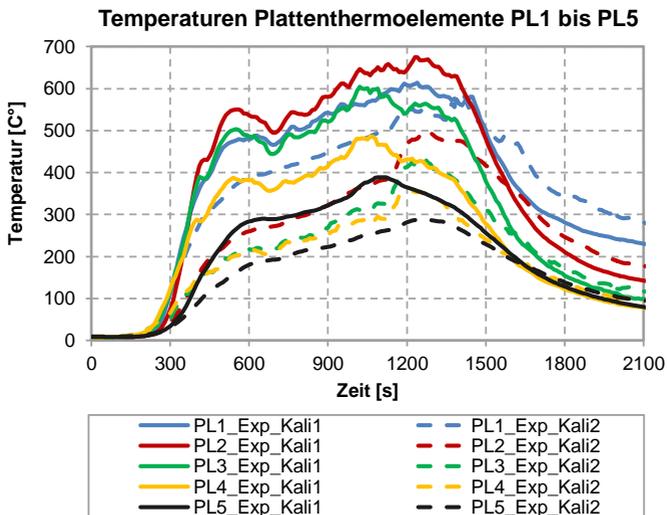


Abbildung 5-33: Gemessene Temperaturverläufe an den Plattenthermoelementen PL1 bis PL5 für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2

In der Abbildung 5-34 sind die Temperaturverläufe der Achsen DE und DG über die Höhe dargestellt. Für beide Achsen stimmen die Temperaturverläufe für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2 in guter Näherung überein. Auf Grundlage der Messstellen an den hier ausgewiesenen Achsen wird die gleichwertige Beanspruchung infolge des konvektiven Heißgasstroms in der Flammenachse und im flammennahen Bereich deutlich. Dabei spielen die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse in der Prüfhalle und das unterschiedliche

Versagensbild der Holzkippen nur eine untergeordnete Rolle. Gleichwertige Erkenntnisse ergeben sich für die Achse DF, welche in Abbildung 5-35 dargestellt sind.

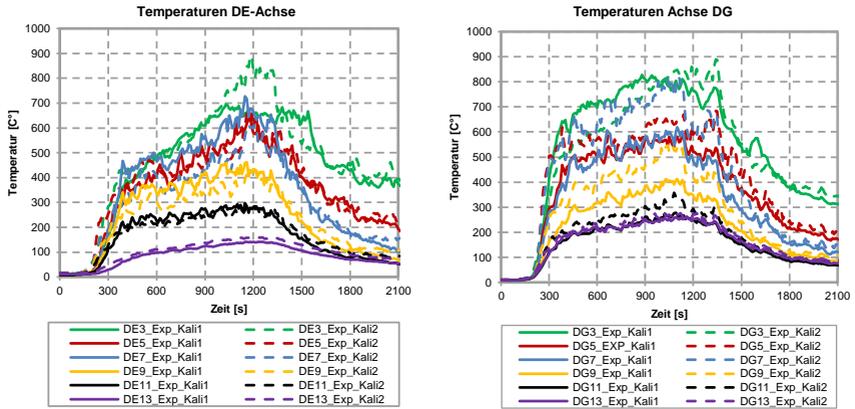


Abbildung 5-34: Gemessene Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelement entlang der Messstellen in Achsen DE und DG für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2

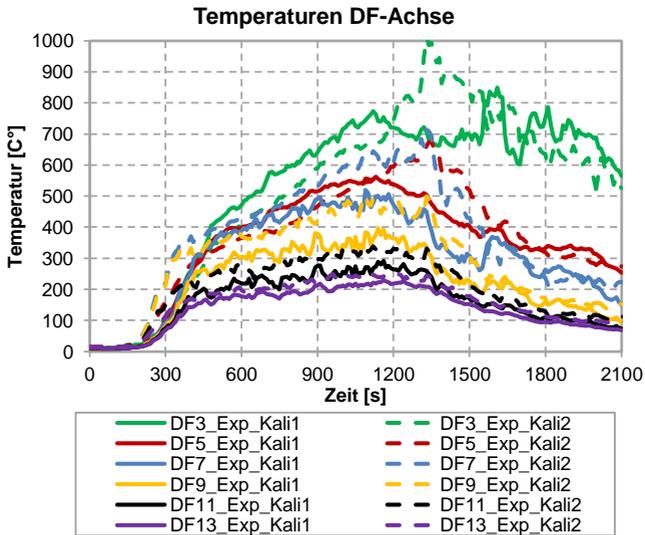


Abbildung 5-35: Gemessene Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelement entlang der Messstellen in Achse DF für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2

Für die folgenden Validierungsversuche werden die Achsen DE, DG und DF als maßgebend betrachtet. Dies wird damit begründet, dass in den Achsen DE, DG und DF die höchste Beanspruchung infolge des konvektiven Heißgasstroms vorherrscht und durch den reproduzierbaren Temperaturverlauf eine gute Validierung möglich ist.

Die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen der weiteren Achsen unterscheiden sich dabei deutlicher und weisen im Verhältnis zu den in diesem Abschnitt ausgewerteten Achsen sehr viel niedrigere Temperaturen auf, sodass eine Validierung an lokalen Messstellen dieser Achsen für die Gesamtbewertung nicht zielführend ist (vgl. Temperaturverläufe Anlage D).

Wärmestromdichten

In Abbildung 5-36 sind die Verläufe der Wärmestromdichten infolge Strahlung dargestellt. Der Verlauf in einer Höhe von 3 m über dem Prüfhallenboden des Messpunkts HF3 ist für beide Kalibrierungsversuche nahezu übereinstimmend.

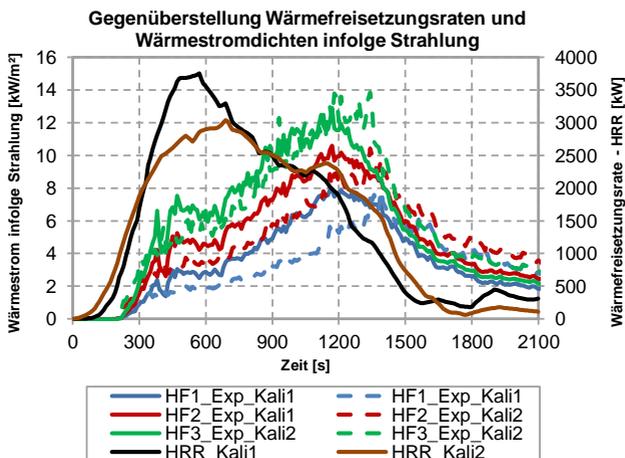


Abbildung 5-36: Gemessene Wärmestromdichten infolge Strahlung im Abstand 3 m vor der Rückwand in den Höhen HF1 = 1 m, HF2 = 2 m und HF 3 = 3 m für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2

Bei den Messstellen HF1 und HF2 sind die gemessenen Wärmestromdichten im Kalibrierungsversuch Kali2 gegenüber Kali1 niedriger, was auf eine unterschiedlich verlaufende Brandausbreitung innerhalb der Holzkrippe zwischen den beiden Brandversuchen zurückzuführen ist. Beim Versuch Kali1 sind nach Auswertung der

Videoaufnahmen sichtbare Flammen an der Stirnseite der Holzkrippe bereits ab der 7. Prüfminute zu beobachten, was auf eine zuerst vermehrt stattgefundene Brandausbreitung im vorderen Bereich der Holzkrippe hindeutet.

Bei der Gegenüberstellung der Wärmefreisetzungsraten in den beiden Brandversuchen wird insbesondere der Effekt des instationären effektiven Heizwerts für den Brennstoff Holz, wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, deutlich. Während bei Beginn des Brandversuchs bis zur ca. 10. Prüfminute der Vollbrandphase die Wärmestromdichte infolge Strahlung relativ konstant verläuft, nimmt diese bis zur 20. Prüfminute kontinuierlich zu. Dies deutet auf einen steigenden Heizwert bei abfallender Abbrandrate hin. Durch den beim Pyrolyseprozess entstehenden Holzkohlerückstand ergibt sich zusätzlich der Effekt einer erhöhten Strahlungsintensität, bzw. es ist anzunehmen, dass der freigesetzte Strahlungsanteil, bezogen auf die Wärmefreisetzungsrate, mit zunehmender Branddauer ansteigt. Schlussendlich spielt auch die Brandausbreitung innerhalb der Krippe zum Krippenrand hier eine wichtige Rolle.

Flammenausbildung

Entsprechend der Untersuchungsberichte ([94], [95]) wird eine max. Flammenhöhe von 7 m für den Kalibrierungsversuch Kali1 von der 5. bis zur 15. Minute und für den Kalibrierungsversuch Kali2 von der 5. bis zur 19. Minute angegeben. Unter Betrachtung der Temperaturmessstellen, insbesondere in den Achsen DE und DG sowie unter Berücksichtigung der Auswertungen der Videoaufnahmen zu den zwei Versuchen, handelt es sich bei der Angabe zur Höhe um die intermittierende Flamme. Die ständige Flamme erreicht unter Berücksichtigung der Videoaufnahmen Höhen von max. 4 m bis 5 m. Die Abbildung 5-37 und Abbildung 5-38 veranschaulichen diese Feststellung.

Durch den z. T. einströmenden Wind über die Zuluftöffnung wird die Flammenausbildung während der Brandprüfung stark beeinflusst. Dies hat, wie die Temperaturverläufe gemäß Abbildung 5-33 verdeutlicht haben, Auswirkungen auf die gemessenen Temperaturen seitlich zur Holzkrippe.

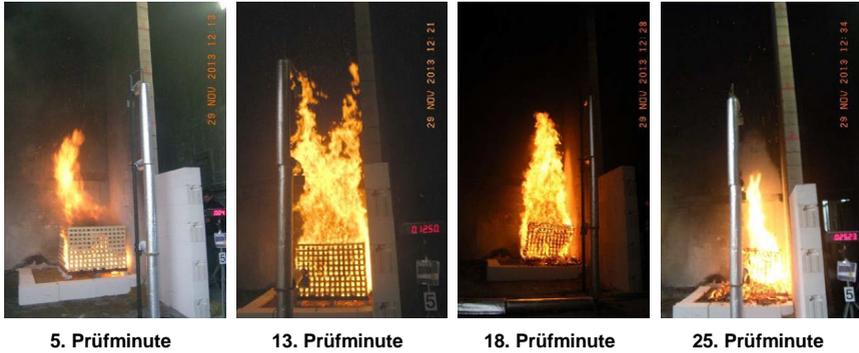


Abbildung 5-37: Flammenausbildung während des Brandversuchs für vier Zeitphasen beim Kalibrierungsversuch Kali1 [94]

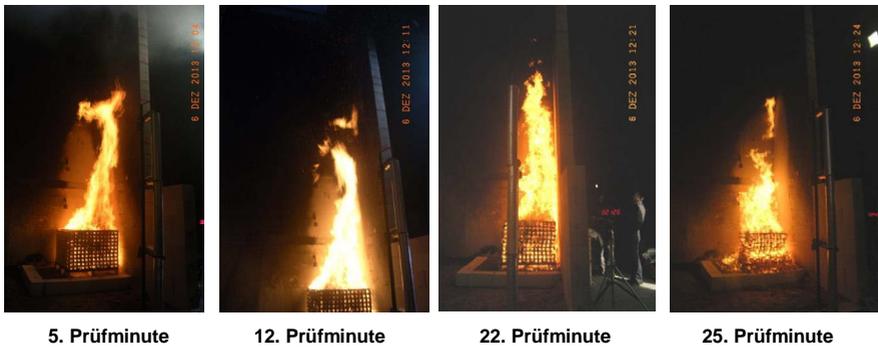


Abbildung 5-38: Flammenausbildung während des Brandversuchs für vier Zeitphasen beim Kalibrierungsversuch Kali2 [95]

5.3.2 Numerische Untersuchung

Die numerische Simulation der zwei Brandversuche Kali1 und Kali2 erfolgt auf Grundlage der geometrischen und materialspezifischen Randbedingungen gemäß ([94], [95]). Des Weiteren werden für die Simulation die klimatischen Randbedingungen sowie die Messdaten, auf Grundlage der Kalibrierungsversuche gemäß Abschnitt 5.2, gemittelt. Hierzu werden für die Validierung die Werte Kali_Mittel aus Tabelle 5-6 herangezogen. Dadurch können Ungenauigkeiten aus der Messung ausgeglichen werden.

5.3.2.1 Geometrie

Die Randbedingungen der Brandversuche werden in FDS auf Grundlage der experimentellen Vorgaben, entsprechend der Abbildung 5-27 und der Abbildung 5-28 sowie der Tabelle 5-6, implementiert. In den folgenden Untersuchungen werden die Ergebnisse aus den Validierungsversuchen ohne und mit Berücksichtigung der Fassadenprüfhalle zur Bestimmung des Einflusses der Umgebungsgeometrie bei groß skalierten Brandversuchen bei gleichbleibender Gitterzellengröße ausgearbeitet. In Abbildung 5-39 wird der Validierungsansatz, ohne Berücksichtigung der Prüfhalle, veranschaulicht.

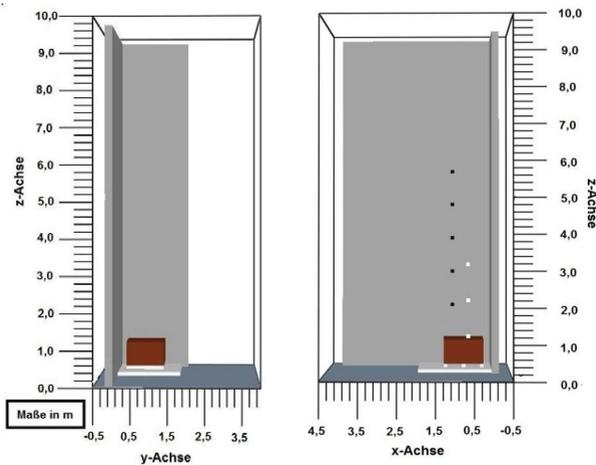


Abbildung 5-39: Geometrische Darstellung der Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2 in FDS ohne Berücksichtigung der Prüfhalle

Beim Validierungsversuch mit Berücksichtigung der Prüfhalle, entsprechend Abbildung 5-40, werden neben der Umfassungsgeometrie der Prüfhalle auch die Einbauten der angrenzenden Prüfstände A und B im Simulationsmodell berücksichtigt. Da genauere Angaben zur Öffnungshöhe des Tors für die Zuluft während der Prüfung fehlen, wurde bei den Modellierungen die vollständige, mögliche Öffnungshöhe angesetzt. Bei allen

Simulationsversuchen wird die Abbrandwaage unter der Holzkrippe durch den Ansatz einer geschlossenen Stahlplatte simuliert.



Abbildung 5-40: Geometrische Darstellung der Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2 in FDS mit Berücksichtigung der Prüfhalle

5.3.2.2 Gitternetz

Für die Simulation werden beim Ansatz der Gitternetzstruktur insgesamt drei Gitterzellengrößen untersucht. Die Bestimmung der notwendigen Gitterzellengröße erfolgt über den Ansatz gemäß Abschnitt 4.2.2. Dabei ist der charakteristische Branddurchmesser D^* unter Berücksichtigung einer mittleren Temperatur der Umgebungsluft von 282 K und einer mittleren Wärmefreisetzungsrate von 2664 kW für die Vollbrandphase (300. s bis 1.200. s) mit $D^* = 1,44$ m bestimmt worden. Bei der Festlegung der notwendigen Gitterzellengrößen für die Konvergenzstudie werden, neben dem Ansatz gemäß Abschnitt 4.2.2, zusätzlich die geometrischen Randbedingungen der Fassadenprüfhalle, des Prüfstands, des Prüffeuers sowie die Positionierung der Plattenthermoelemente im Kalibrierungsversuch berücksichtigt. Aus diesem Grund wurden die Gitterzellengrößen mit 5, 10 und 20 cm für die Konvergenzstudie festgelegt.

In Tabelle 5-7 sind die wesentlichen Kenngrößen der Gitternetzstruktur des Simulationsmodells zusammengefasst. Bei einer Gitterzellengröße von 10 cm sollte sich, auf Grundlage der Erläuterungen gemäß Abschnitt 4.2.2, eine ausreichende Gitterzellengröße zur Validierung der Simulationsmodelle ergeben.

Tabelle 5-7: Zusammenfassung der relevanten Parameter der Gitterzellengrößen auf Grundlage des charakteristischen Branddurchmessers D^*

Gitterzellengröße [cm]	Rechengebiet B x L x H [m]	Gesamtanzahl Zellen	Netzberechnung D^*/dx
ohne Berücksichtigung der Prüfhalle			
20	4,8 x 4,4 x 10	26.400	7,2
10	5,0 x 4,5 x 10	225.000	14,4
5	5,0 x 4,5 x 10	1.800.000	28,8
mit Berücksichtigung der Prüfhalle			
20	10 x 10 x 13	162.500	7,2
10	10 x 10 x 13	1.300.000	14,4
5/10	10 x 10 x 13	2.473.900	28,8

5.3.2.3 Simulation Prüffeuern

Bei der Simulation des Prüffeuers werden vier unterschiedliche Varianten, unter Berücksichtigung der vorgegebenen, gemittelten Wärmefreisetzungsrate aus den Kalibrierungsversuchen, genauer untersucht.

Die Varianten Var1 und Var2 verfolgen den Ansatz aus BiR ([132], [133]) gemäß Abschnitt 2.5.4, wobei die wirksame Wärmefreisetzungsrate q_{aG} in der Variante Var1a auf die Grundfläche und bei der Variante Var1b auf die halbe Höhe der Holzkrippe projiziert wird. Bei der Variante Var2 wird der Ansatz für q_{aA} verfolgt. Es werden somit 130 % auf die obere Fläche und 70 % auf die seitlichen Flächen von q_{aA} angesetzt. Bei Variante Var3 wird die Holzkrippe geometrisch als Stab-Luft-Modell wirklichkeitsnah abgebildet, um damit den Kamineffekt in der Holzkrippe hinsichtlich einer realitätsnahen Durchströmung im Holzkruppenkern abzubilden.

Die Abbildung 5-41 stellt die untersuchten Varianten visuell gegenüber. Dabei ist die farblich braun dargestellte Fläche, die wirksame Brandfläche für den Ansatz der vorgegebenen gemittelten Wärmefreisetzungsrate aus Kali_Mittel.

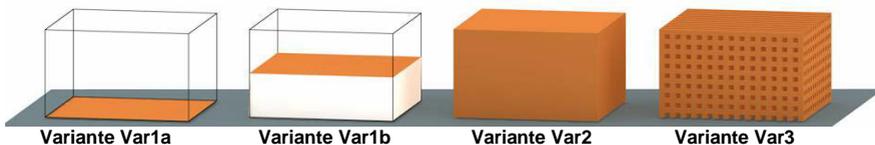


Abbildung 5-41: Darstellung der Modellierungsvarianten für den Ansatz der Wärmefreisetzungsrate in FDS

In Tabelle 5-8 werden die geometrischen Randbedingungen sowie die angesetzten maximalen Wärmefreisetzungsraten für die simulierten Prüffeuervarianten der Holzkrippe bei unterschiedlichen Gitterzellengrößen zusammengestellt.

Tabelle 5-8: FDS Eingabedaten der maximalen, flächenspezifischen Wärmefreisetzungsraten der unterschiedlichen Simulationsvarianten auf Grundlage des gemittelten Kalibrierungsversuch Kali_Mittel

Kali_Mittel	Variante Var1a/-b			Variante 2			Variante 3		
	A _{grund} [m ²]	Max. qaG [kW]	Max. HRRPUA [kW/m ²]	A _{oben+Seite} [m ²]	Max. qaA [kW/m ²]	Max. HRRPUA [kW/m ²]	A _{stab} [m ²]	Max. qaG [kW]	Max. HRRPUA [kW/m ²]
20 cm	1,44	3.304	2.294	5,28	626	130 %: 814 70 %: 438	-		
10 cm	1,21		2.731	4,29	770	130 %: 1.001 70 %: 539	14,8	3.304	222,94
5 cm									

Der Strahlungsanteil, bezogen auf die freigesetzte Wärmefreisetzungsraten der simulierten Holzkrippen, wird mit maximal $\chi_r = 0,25$ angesetzt und über den FDS Befehl RADIATIVE_FRACTION in der Simulation gesteuert. Der Einfluss der Reduzierung des Strahlungsanteils, bezogen auf die Wärmefreisetzungsraten auf $\chi_r = 0,2$, wird anhand der Auswertung zur thermischen Beanspruchung der Prüfwanne in der folgenden Validierungsstudie ebenfalls untersucht. Holz als Verbrennungsprodukt ist in FDS nicht vordefiniert, sodass für die Simulation Angaben für die chemische Zusammensetzung, für die Verbrennungswärme, die CO- und Rußausbeuten sowie für den Strahlungsanteil der Wärmefreisetzungsraten vorgegeben werden müssen.

Die Tabelle 5-9 fasst die Eingabeparameter für die Simulation des Verbrennungsprodukts Holz in FDS zusammen.

Tabelle 5-9: Eingabeparameter in FDS für das Verbrennungsprodukt Holz

	Wert	Einheit	Quelle
Chemische Formel	C _{3,4} H _{6,2} O _{2,5}	[-]	[84]
Heat of Combustion H_c	17,28	[MJ/kg]	vgl. Tabelle 2-7
RADIATIVE_FRACTION χ_r	0,20 + 0,25	[-]	vgl. Tabelle 2-7
CO-Yield Y_{CO}	0,005	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7
Soot-Yield Y_{Ruß}	0,015	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7

5.3.2.4 Verwendete Materialien

Bei den verwendeten Materialien wurde, wie bereits unter Abschnitt 5.2 beschrieben, überwiegend auf die instationären Materialparameter der Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung zurückgegriffen. Fehlende Angaben zu relevanten Materialien aus den Eurocodes wurden durch Angaben aus alternativen Literaturquellen ergänzt und können der Anlage F entnommen werden.

Tabelle 5-10: Materialspezifische Eigenschaften für die Eingabe in FDS

Material	Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m³]	Emissionsgrad [-]
Stahl*	0,45	54	7.850	0,7**
Beton*	0,9	1,64	2.100	0,7**
Kalksandstein*	1,02	1,0	1.600	0,8**
Porenbeton*	1,05	0,15	600	0,8**
Plattenthermoelement*	0,44	14,9	8.470	0,85***
Wärmedämmung Plattenthermoelement*	1,13	0,06	128	0,9***

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS und ggf. temperaturabhängiger Materialeigenschaften sowie Quellennachweise s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

*** Emissionsgrad - Empfehlung für die Simulation von Plattenthermoelementen gemäß FDS-USER Forum - Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS s. Anlage F

5.3.3 Ergebnisse

Die Validierungsstudie für die Simulation von Holzrippen, anhand definierter Wärmefreisetzungsraten auf Grundlage des Sockelbrandversuchs gemäß MVV TB [107], ist aufgrund der Vielzahl der untersuchten Parametern und der Holzrippenvarianten sehr umfangreich. Um einen Überblick für die relevanten Ergebnisse zu erzielen, werden die Ergebnisse von Varianten ohne ausreichende Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation nicht weiter dargestellt.

Dabei konnten die Varianten Var1a und Var1b, im Zusammenhang mit einer in der Ecke positionierten Holzrippe, nicht ausreichend validiert werden. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse aus diesen Varianten nachfolgend nur vereinzelt aufgeführt.

Bei der Variante Var3 konnte im Rahmen der Voruntersuchungen durch den Verfasser bei einer Gitterzellengröße von 2,5 cm im Brand- und Brandnahbereich die größte Übereinstimmung der Temperaturverläufe zwischen Experiment und Simulation erzielt werden. Die deutlich höhere Rechendauer von insgesamt ca. 10 Monaten gegenüber den übrigen Varianten mit Gitterzellengrößen ≥ 5 cm und einer Rechendauer von maximal 3 Monaten rechtfertigte jedoch nicht die weitere Verfolgung des Simulationsansatzes für die Bearbeitung der Forschungsfrage.

Die Validierungsversuche bei den Varianten Var2 und Var3 mit einer Gitterzellengröße von ≥ 5 cm zeigten auf, dass die geometrische Abbildung der Holzkrippe, mit einem Abstand zur Rück- und Eckwand von 10 cm, grundsätzlich zu teilweise deutlichen Überschätzungen der Temperaturverläufe in den Achsen DE, DF und DG führten. Aus diesem Grund werden im Folgenden ausschließlich die Varianten der Holzkrippen unter Berücksichtigung einer Gitterzellengröße von ≥ 5 cm bei einem Abstand der Holzkrippe zur Rück- und Eckwand von 20 cm vorgestellt.

Im Weiteren hat sich die Variante Var2 für die drei betrachteten Gitterzellengrößen von 5, 10 und 20 cm als ideale geometrische Simulationsvariante hinsichtlich der Validität und der Begrenzung der Rechendauer aufgezeigt.

Für die qualitative Auswertung über Zeitdiagramme wird der Auswertungsbereich auf 2.100 Sekunden beschränkt. Sofern bei einzelnen Validierungsansätzen eine quantitative Vergleichsauswertung verwendet wird, ist die Beanspruchungszeit auf max. 1.500 Sekunden beschränkt, da zu diesem Zeitpunkt ca. 86 % der Gesamtmasse der experimentell untersuchten Holzkrippen verbrannt worden sind. Nach diesem Zeitpunkt wurden keine relevanten thermischen Beanspruchungen mehr auf die Prüfwand festgestellt.

5.3.3.1 Wärmefreisetzungsrate

Die Abbildung 5-42 stellt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrates aus den Simulationen, exemplarisch bei einer Gitterzellengröße von 10 cm, für die Varianten Var1 (Var1a und Var1b zusammengefasst), Var2 und Var3 für das definierte Prüffeuern in FDS dar.

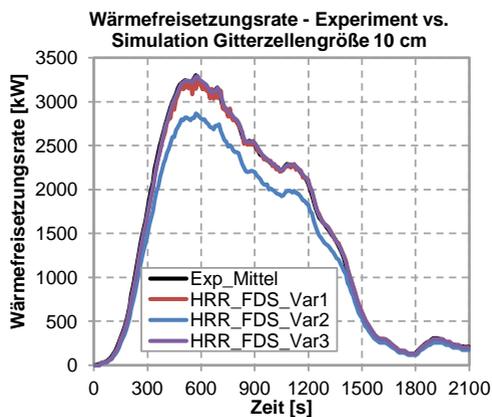


Abbildung 5-42: Wärmefreisetzungsrates HRR für die Varianten Var1 bis Var3 bei einer Gitterzellengröße von 10 cm

Gemäß den Verläufen der Wärmefreisetzungsraten wird deutlich, dass die implementierten Eingangsparameter für Exp_Mittel bei den untersuchten Varianten nahezu exakt in FDS simuliert wurden. Hinsichtlich des reduzierten Verlaufs für Var2 sind die Angaben aus Abschnitt 2.5.4 maßgebend.

5.3.3.2 Auswertungen ohne Berücksichtigung der Prüfhallengeometrie

Temperaturen Achse DE, DF und DG

In der Abbildung 5-43 sind die Temperaturverläufe der Achsen DE, DF und DG für die Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 5, 10 und 20 cm gegenübergestellt.

Bei der qualitativen Auswertung der Zeit-Temperatur-Diagramme an den Achsen DE, DF und DG konnte die größte Validität für die Variante Var2 erzielt werden. Des Weiteren wird deutlich, dass die Temperaturverläufe der Simulation in Abhängigkeit von der Höhe der Messstellen gegenüber den experimentellen Messwerten zu Beginn der Vollbrandphase der Holzkrippe höher verlaufen und mit zunehmender Prüfdauer vor den Temperaturverläufen aus dem Experiment in die Abklingphase übergehen.

Die qualitative Auswertung der Zeit-Temperatur-Diagramme gibt grundsätzlich keinen ausreichenden Aufschluss darüber, ob die Temperaturen an den betrachteten Messstellen zwischen Experiment und Simulation übereinstimmen.

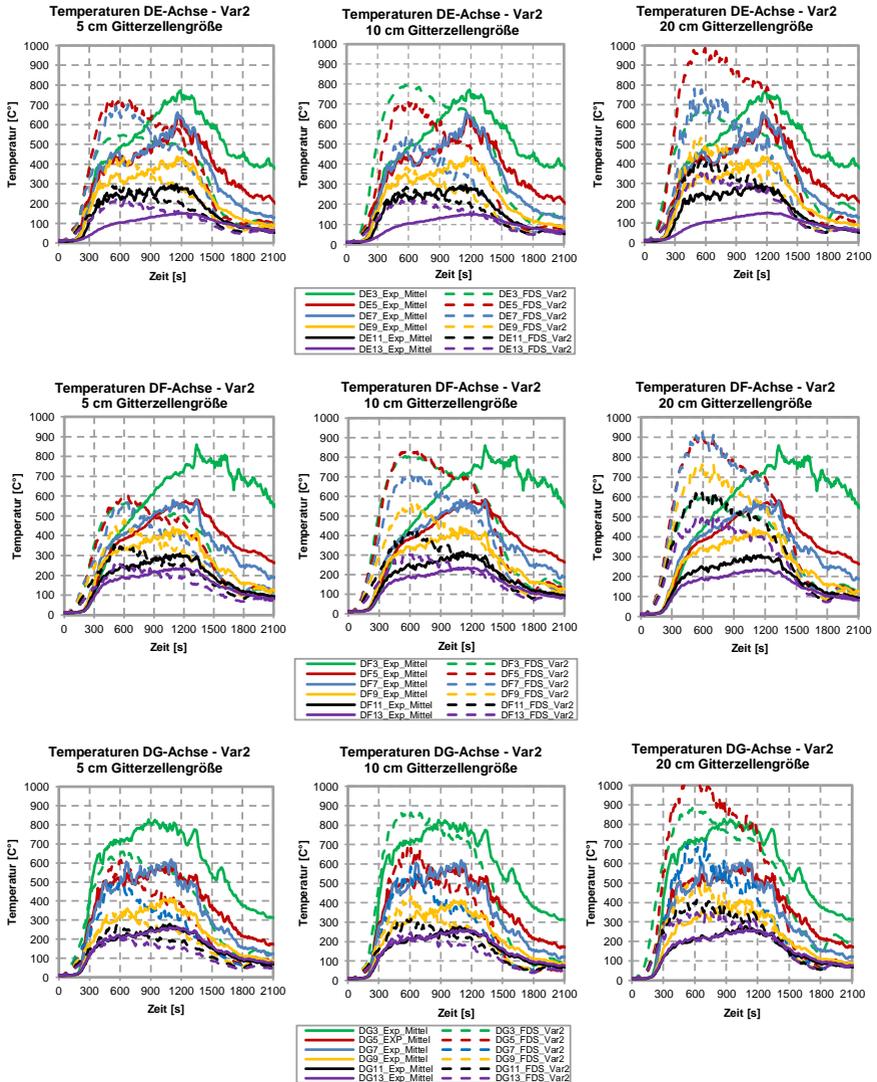


Abbildung 5-43: Temperaturverläufe für ausgewählte Messstellen an den Achsen DE, DF und DG im Vergleich zwischen Experiment und Simulation der Variante Var2

Für die weitere Beurteilung der Temperaturverläufe zwischen Experiment und Simulation wird die L_2 -Norm-Methodik gemäß Abschnitt 4.3.2 angewendet. Die quantitative Auswertung erfolgt hierbei für die Beanspruchungszeit bis zur 1.500. Prüfsekunde. In der Tabelle 5-11

sind die Auswertungen mittels L_2 -Norm der Achsen DE, DF und DG für unterschiedliche Gitterzellengrößen für Variante Var2 gegenübergestellt.

Tabelle 5-11: Auswertungen der Messstellen an den Achsen DE, DF und DG zwischen den gemittelten experimentellen und Simulationsergebnissen der Variante Var2 mittels L_2 -Norm-Methodik

L_2-Norm – Vergleich zwischen Exp. Mittel und Simulation Beanspruchungszeit 0 bis 1.500 Sekunden							
DE-Achse							
	DE3	DE5	DE7	DE9	DE11	DE13	Σ Mittelwerte
Var2_5cm	0,32	0,42	0,37	0,27	0,24	0,54	0,36
Var2_10cm	0,38	0,40	0,38	0,30	0,23	0,63	0,39
Var2_20cm	0,58	0,78	0,49	0,41	0,48	1,26	0,67
DF-Achse							
	DF3	DF5	DF7	DF9	DF11	DF13	Σ Mittelwerte
Var2_5cm	0,49	0,35	0,34	0,26	0,25	0,24	0,32
Var2_10cm	0,42	0,45	0,33	0,29	0,31	0,28	0,35
Var2_20cm	0,51	0,48	0,44	0,46	0,52	0,54	0,49
DG-Achse							
	DG3	DG5	DG7	DG9	DG11	DG13	Σ Mittelwerte
Var2_5cm	0,28	0,27	0,35	0,29	0,25	0,32	0,29
Var2_10cm	0,18	0,24	0,29	0,26	0,26	0,26	0,25
Var2_20cm	0,20	0,70	0,23	0,31	0,55	0,40	0,40

Unter Betrachtung der Mittelwerte aus der L_2 -Norm für die einzelnen Achsen wird deutlich, dass die Simulationsvarianten mit einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm miteinander näherungsweise konvergieren. Die Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 20 cm erreicht einem Mittelwert von 0,52 und weicht damit deutlich von den feineren Gitterzellengrößen ab.

Bei der Auswertung mittels L_2 -Norm lässt sich grundsätzlich die Über- und Unterschreitung der Temperaturverläufe untereinander nicht differenzieren. Daher kann zwischen Experiment und Simulation keine Übereinstimmung für die quantitative thermische Beanspruchung mittels dieses Verfahrens festgestellt werden.

Um eine zuverlässige Aussage bzgl. der Übereinstimmung der insgesamt vorherrschenden thermischen Beanspruchung zwischen Experiment und Simulation treffen zu können, werden in Tabelle 5-12 die Mittelwerte der gemessenen Temperaturen der einzelnen Achsen an den Messpunkte (DA-DH/1-13) für die Ergebnisse aus dem Experiment und der Simulationsvariante Var2 gegenübergestellt.

Tabelle 5-12: Mittelwerte der Temperaturmessungen für die gemittelten Ergebnisse aus dem Experiment und der Ergebnisse aus den Simulationsvarianten für die Prüfzeit von 0 bis 1.500 Sekunden

	Mittelwert T [°C] Beanspruchungszeit 0 bis 1.500 Sekunden								
	Achse DA	Achse DB	Achse DC	Achse DD	Achse DE	Achse DF	Achse DG	Achse DH	Σ Mittelwerte
Exp_Mittel	56	97	146	220	296	281	325	209	204
FDS_Var2 5 cm	34	62	98	191	303	295	251	147	173
FDS_Var2 10 cm	32	58	84	182	302	401	314	175	194
FDS_Var2 20 cm	32	49	83	203	368	440	393	156	216

Bei der Gegenüberstellung wird deutlich, dass die einwirkenden Temperaturen in den Achsen DE, DF und DG bei der Mittelwertbetrachtung für die Gesamteinwirkung kleinere Abweichungen aufweisen, als über die L_2 -Norm-Methodik bestimmt wurden. Grundsätzlich zeigen die Varianten der Versuchsreihe Var2 auf, dass die quantitative thermische Beanspruchung aus Simulation und Experiment in guter Übereinstimmung zueinander stehen.

Insgesamt betrachtet zeigt die Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm die größte Validität zwischen Experiment und Simulation. Die Temperaturunterschreitungen an den Achsen DA bis DD und DH werden durch die höheren Temperaturen in den Achsen DE, DF und DG kompensiert. Grundlage für die Einschätzung ist die einwirkende Wärmestromdichte gemäß Gl. (4-23), in der die Strahlung infolge Temperatur in der vierten Potenz wirkt.

Wärmestromdichten infolge Strahlung im Abstand 3 m zur Rückwand

In der Abbildung 5-44 sind auf der linken Seite die gemessenen Wärmestromdichten infolge Strahlung in einem Abstand von 3 m zur Rückwand mit den Simulationsergebnisse für Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm und einem Strahlungsanteil der Wärmefreisetzungsrate von 25 % gegenübergestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die gleiche Simulationsvariante mit einem geänderten Strahlungsanteil der Wärmefreisetzungsrate von 20 % abgebildet.

Grundsätzlich lässt sich aus dem Diagramm ableiten, dass ähnlich zu den Temperaturverläufen die Wärmestromdichten infolge Strahlung in der Simulation analog der

vorgegebenen gemittelten Wärmefreisetzungsrate aus den experimentellen Untersuchungen verlaufen.

Der unterschiedliche qualitative Verlauf zwischen der Wärmefreisetzungsrate und der Wärmestromdichte infolge der Strahlung wurde bereits im Abschnitt 5.3.1.4 ausführlich begründet. In der Konsequenz verläuft die Wärmestromdichte infolge Strahlung in der Simulation qualitativ gemäß dem Verlauf aus der vorgegebenen Wärmefreisetzungsrate. Aus diesem Grund sind die Verlaufskurven zwischen Experiment und Simulation zeitlich versetzt.

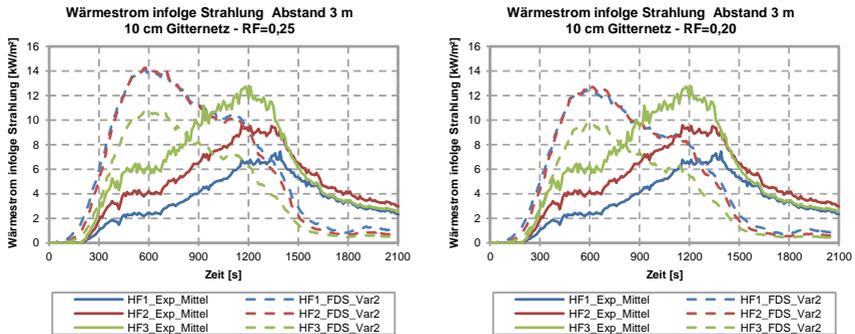


Abbildung 5-44: Wärmestromdichten infolge Strahlung bei unterschiedlichen Strahlungsanteilen in der Wärmefreisetzungsrate; links: Radiative_Fraction = 0,25; rechts Radiative_Fraction = 0,20

Grundsätzlich wird die Abstrahlung der Flammen in der Simulation für die untersuchten Varianten überschätzt. Maßgebend für die höheren Verläufe der Messpunkte HF1 und HF2 in der Simulation ist der Ansatz der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate auf die obere und die seitlichen Flächen des repräsentativen Quaders für die Holzkrippe. Der Ansatz repräsentiert zu Simulationsbeginn eine vollständige Brandausbreitung in der Holzkrippe zu den seitlichen Rändern, welche im Experiment erst zum Ende der Vollbrandphase mit Beginn der abklingenden Wärmefreisetzungsrate erreicht wird. Somit ist der Ansatz der Variante Var2 hinsichtlich der Abstrahlung insgesamt als konservativ anzunehmen. Der Strahlungsanteil in der Wärmefreisetzungsrate hat ebenfalls deutlichen Einfluss auf die Abstrahlung des simulierten Prüffeuers. Grundsätzlich würde ein Strahlungsanteil 0,2 die einwirkende Strahlung im Experiment quantitativ ausreichend abdecken. Um jedoch Unsicherheiten aus dem Experiment hinsichtlich zusätzlicher Einflussfaktoren durch erhöhte Ruß-, CO-, und CO₂-Ausbildung infolge ggf. unterventilierter Teilbereiche in der Krippe entgegenzuwirken, gibt der Ansatz eines Strahlungsanteils in der Wärmefreisetzungsrate von 0,25 bei einer einzelnen Holzkrippe ausreichend Sicherheit in der Simulation.

Flammenausbildung

Die Abbildung 5-45 stellt die Flammenausbildung während der Vollbrandphase zum Zeitpunkt der ca. 550. Prüfsekunde in der Simulation für die Variante Var2 der Flammenausbildung aus dem Experiment gegenüber. Die visuelle Betrachtung der Ergebnisse für die Flammenausbildung aus der Simulation steht bis zum Stabilitätsversagen der Holzkrippen in sehr guter Übereinstimmung mit den dokumentierten Fotoaufnahmen für die Flammenausbildungen aus den Experimenten. Die ständigen Flammen im Experiment und in der Simulation erreichen in Anhängigkeit der Brandphase eine max. Höhe von ca. 5 m. Bei der Betrachtung der Flammenausbildung für die Variante Var2 bestätigt sich nochmals, ergänzend zu den vorangegangenen Auswertungen, der valide Ansatz für Variante Var2 als Simulationsmodell der Holzkrippe im Eckbereich des Prüfstands.

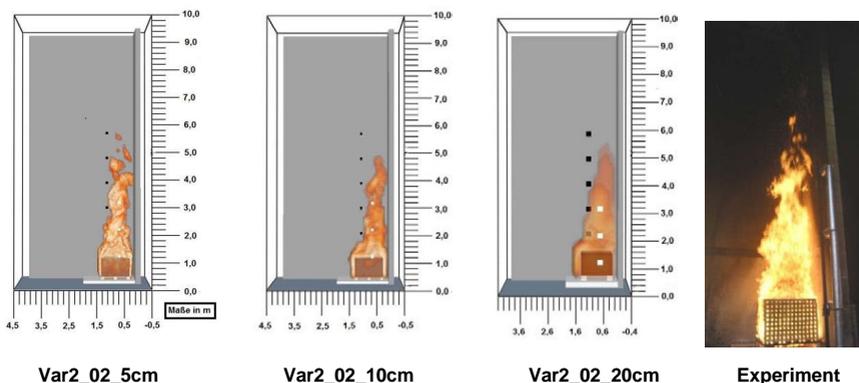


Abbildung 5-45: Gegenüberstellung der Flammenausbildung zwischen Experiment [94] und Simulation für die Variante Var2

5.3.3.3 Auswertungen mit Berücksichtigung der Prüfhallegeometrie

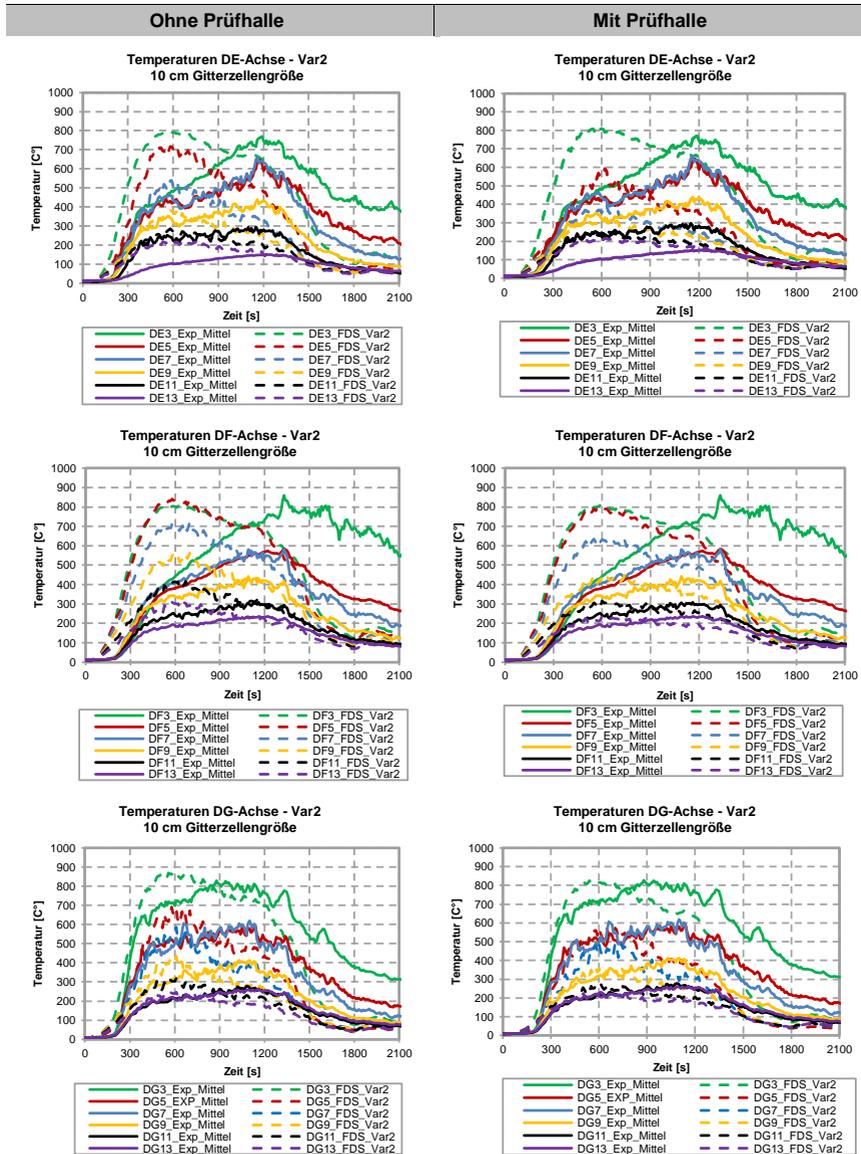


Abbildung 5-46: Temperaturverläufe für ausgewählte Messstellen an den hauptbeanspruchten Achsen DE, DF und DG im Vergleich zwischen Experiment und Simulation der Variante Var2 unter Berücksichtigung ohne und mit Fassadenprüfhalle

In Abbildung 5-46 werden die Temperaturverläufe für die bisher untersuchten Messstellen an den Achsen DE, DF und DG für die Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm ohne (oP) und mit Fassadenprüfhalle (mP) gegenübergestellt. Aus der Auswertung der Temperaturverläufe lässt sich kein eindeutiger Einfluss aus der berücksichtigten Prüfhallengeometrie mit definierten natürlichen Zu- und Abluftbedingungen ableiten. Lediglich in den höher gelegenen Messpunkten ist ein geringfügiger Temperaturabfall der Variante mit Prüfhalle gegenüber der Variante ohne Prüfhalle zu registrieren.

In einem zusätzlichen Arbeitsschritt wird die L_2 -Norm-Methodik herangezogen, um die Abweichungen der beiden Varianten untereinander zu quantifizieren. Die Tabelle 5-13 stellt die Ergebnisse für die Messpunkte aus den Zeit-Temperatur-Diagrammen der Achsen DE, DF und DG für die Methodik zusammen.

Tabelle 5-13: Auswertungen der Messstellen an der DE, DF und DG Achse zwischen der Variante Var2 ohne und mit Prüfhallengeometrie mittels L_2 -Norm-Methodik

	DE-Achse						
	DE3	DE5	DE7	DE9	DE11	DE13	Σ Mittelwerte
Var2_10cm_oP	0,38	0,40	0,38	0,30	0,23	0,63	0,39
Var2_10cm_mP	0,39	0,36	0,48	0,36	0,25	0,60	0,41
	DF-Achse						
	DF3	DF5	DF7	DF9	DF11	DF13	Σ Mittelwerte
Var2_10cm_oP	0,42	0,45	0,33	0,29	0,31	0,28	0,35
Var2_10cm_mP	0,42	0,43	0,29	0,22	0,21	0,21	0,30
	DG-Achse						
	DG3	DG5	DG7	DG9	DG11	DG13	Σ Mittelwerte
Var2_10cm_oP	0,18	0,24	0,29	0,26	0,26	0,26	0,25
Var2_10cm_mP	0,20	0,28	0,36	0,26	0,20	0,24	0,26

Die Ergebnisse aus Tabelle 5-13 verdeutlichen, dass die Temperaturverläufe in den Achsen DE und DG in guter Übereinstimmung zueinander stehen. Lediglich die Achse DF zeigt eine deutlichere Abweichung von 0,3 der Variante mit Prüfhalle gegenüber 0,35 der Variante ohne Prüfhalle. Unter Betrachtung der Mittelwerttemperaturen gemäß Tabelle 5-12 lässt sich eine Annäherung der Ergebnisse aus dem Experiment gegenüber den Ergebnissen zur Variante Var2 mit Berücksichtigung der Prüfhalle feststellen. Durch das definierte Strömungsbild der Zu- und Abluftöffnung in der Variante mit Prüfhalle rücken die Flamme und der Heißgasstrom im Eckbereich weiter vom Prüfstand ab, wodurch sich der Temperaturabfall begründen lässt.

Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte für die drei Achsen ergibt für die Variante ohne Prüfhalle einen Wert von 0,33 und bei der Variante mit Prüfhalle einen Wert von 0,32. Die Prüfhallengeometrie einschließlich der definierten Zu- und Abluft deuten auf eine

ausreichende Dimensionierung hin. Der Einfluss des sich einstellenden Strömungsbildes mit Prüfhalle gegenüber der Variante ohne Prüfhalle kann unter Betrachtung der Netzberechnung für ein näherungsweise feine Gitternetzstruktur bei einer Gitterzellengröße von 10 cm mit $D^*/dx = 14,4$ aufgrund der geringfügigen Abweichungen im Simulationsmodell vernachlässigt werden.

5.3.3.4 Auswertungen Flächenintegral Wärmestromdichte

In Abbildung 5-47 sind die Verläufe der einwirkenden Wärmestromdichten auf die Prüfwand (Flächenintegral) infolge Strahlung sowie Konvektion, sowie die daraus resultierende Summe (Gauge Heat Flux), für die Variante Var2 ohne Prüfhalle zusammengestellt.

Die größte thermische Beanspruchung wird für die Varianten mit einer Gitterzellengröße von 10 und 20 cm erreicht. Der Strahlungsanteil aus den einwirkenden Wärmestromdichten während der Vollbrandphase beträgt für die maßgebenden Varianten mit einer Gitterzellengröße von 10 und 20 cm ca. 90 % und der konvektive Anteil für die einwirkenden Wärmestromdichten ca. 10 %.

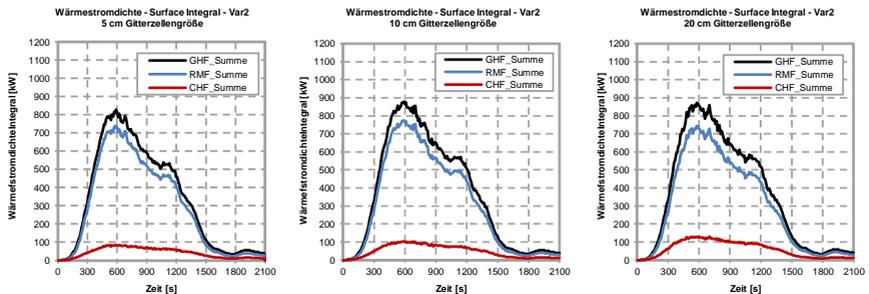


Abbildung 5-47: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF), für den Strahlungsanteil (Radiometer Flux - RMF) und den konvektiven Anteil (Convective Heat Flux - CHF) der beanspruchten Prüfwand für die Variante Var2

Die Gesamteinwirkung durch das Prüffeuern in den ersten 1.500 Prüfsekunden beträgt bei der Variante Var2 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm insgesamt 729 MJ bei einer gleichzeitig freigesetzten Wärmeenergie von 2.581 MJ. Somit wirken ca. 22 % der Wärmeenergie auf den Prüfstand und ca. 78 % gehen an die Umgebung durch Strahlung und durch Erwärmung der einströmenden Umgebungsluft in die Holzkrippe sowie in die Flamme oberhalb der Holzkrippe verloren.

5.3.4 Fazit

Für die Simulation der Holzkrippe vor dem Fassadenprüfstand zeigt der Simulationsansatz für die Variante Var2 gemäß Abschnitt 5.3.2.3 bei einem vorgehenden Verlauf der Wärmefreisetzungsrate die größte Übereinstimmung bei den Temperaturverläufen zwischen Experiment und Simulation. Dabei ist für die Variante Var2 eine Gitterzellengröße von 10 cm für die Validität zwischen Experiment und Simulation ausreichend.

Etwaige zeitliche Verschiebung der Temperaturverläufe zwischen dem Experiment und der Simulation sind unmittelbar auf den bestimmten ggf. zeitversetzten Verlauf der Wärmefreisetzungsrate im Experiment zurückzuführen. Die quantitative ausreichende Übereinstimmung konnte, trotz der Unsicherheiten aus der bestimmten Wärmefreisetzungsrate für die Variante Var2 nachgewiesen werden. Der Einfluss der Prüfhallengeometrie ist bei Dimensionierungen, wie bei der Prüfhalle am Prüfstand C der MFPA Leipzig, bei Kalibrierungsversuchen zur Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] vernachlässigbar.

5.4 Poolfeuer

Für die numerische Simulation des Poolfeuers mit dem Brennstoff Isopropanol wird als experimentelle Grundlage ein durchgeführter Brandversuch an einem Fassadenprüfstand durch das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der TU Braunschweig herangezogen. Die experimentellen Ergebnisse zu dem Brandversuch wurden in zwei Veröffentlichungen ([110], [144]) beschrieben und dienen in dieser Arbeit als Grundlage für die Validierung. Ergänzend zu den Veröffentlichungen wurden durch das IBMB die Messergebnisse in Excel-Datenform sowie eine Fotodokumentation zum Abbrand des Poolfeuers zur Verfügung gestellt. Die zur Verfügung gestellten Messdaten beinhalteten keine weiteren Ergebnisse gegenüber den in ([110], [144]) publizierten.

Ziel der nachfolgenden numerischen Untersuchung ist die Validierung des Pyrolysemodells in FDS zur Simulation von Poolfeuern mit dem Brennstoff Isopropanol.

5.4.1 Experimentelle Untersuchung

5.4.1.1 Randbedingungen

Der Fassadenprüfstand des IBMB befindet sich in einer ausreichend dimensionierten Halle mit teilweise transparenten Umfassungsbauteilen, sodass auf Grundlage der Erkenntnisse gemäß Abschnitt 5.3 auf die Berücksichtigung dieser in der Modellierung verzichtet werden kann. Bei der Versuchsdurchführung wurden die nach außen führenden Bauwerksöffnungen in der Prüfhalle verschlossen, wodurch das Risiko einer Querlüftung minimiert wurde.

Die Fassadenprüfhalle hat eine Abluftanlage, welche das Austreten von ungefilterten Brandgasen in die Atmosphäre verhindert. Oberhalb des Fassadenprüfstandes erfolgt die Absaugung der Brandgase über eine Abzugshaube sowie im Weiteren über einen Entrauchungskanal. Die Querschnittsabmessungen der Abluftanlage einschließlich Abzugshaube sind nicht bekannt. Der Volumenstrom der Abluftanlage während des Brandversuchs war auf ca. 2,5 m³/s reguliert. Aufgrund der fehlenden Angaben zu den Querschnittsabmessungen wird auf die Implementierung der Anlage B im Simulationsmodell verzichtet, da bei unterschiedlichen Abmessungen und gleichem Volumenstrom die Strömungsgeschwindigkeiten am Fassadenprüfstand wesentlich differieren können.

In Abbildung 5-48 ist der Versuchsaufbau vor Prüfbeginn dargestellt. Die mit Isopropanol gefüllte Stahlwanne wird in einer mit Wasser gefüllten Kühlwanne positioniert. Die Kühlwanne wurde unmittelbar in der Prüfstandecke platziert, wobei die mittig in der Kühlwanne befindliche Poolwanne aufgrund der geringeren Abmessungen einen Abstand zur Rückwand von ca. 0,15 m und zur Seitenwand von ca. 0,4 m hatte. Die Wannen wurden

auf eine Abbrandwaage gestellt, womit der Masseverlust unmittelbar über die Prüfzeit zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate ermittelt wurde.

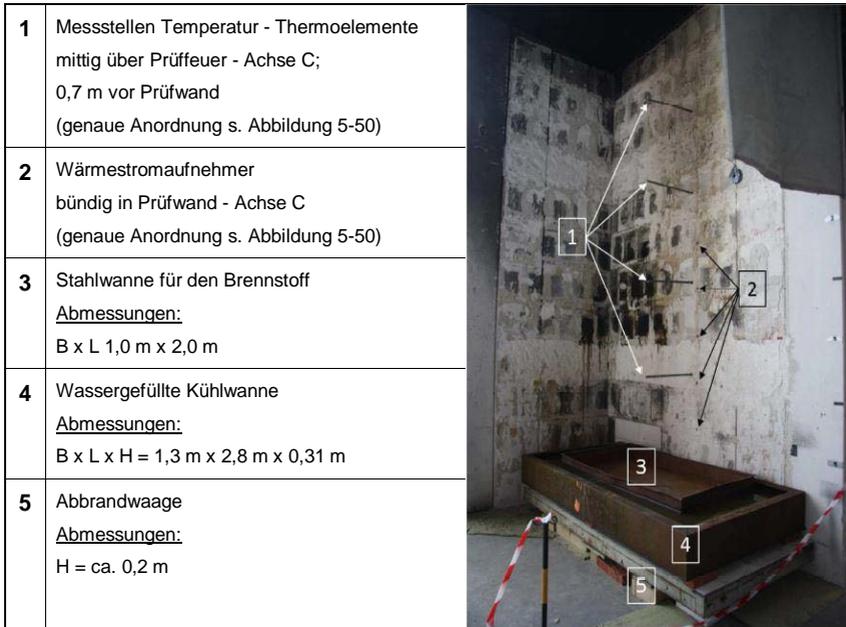


Abbildung 5-48: Prüfaufbau für den Poolfeuerversuch mit Isopropanol am IBMB gemäß [110]

Die angesetzten Abmessungen des Prüfstands können der Abbildung 5-50 entnommen werden. In der Simulation wurden die Wände des Prüfstandes, aufgrund der geringeren Wärmeindringzahl gegenüber Beton oder Kalksandstein konservativ, als Porenbetonwände angenommen.

5.4.1.2 Prüffeuern

Für den Poolfeuerversuch wurden 200 Liter Isopropanol in eine 2 m² große Stahlwanne gefüllt. Bei einer angenommenen Rohdichte von 786,0 kg/m³ ergibt sich eine eingesetzte Masse von ca. 157,2 kg. Die Verbrennungseffektivität für Isopropanol wird in der Literatur zwischen 0,9 und 0,95 ([69], [119]) angegeben, wobei teilweise größere effektive Heizwerte als gemäß Tabelle 5-15 bestimmt wurden. Im Folgenden werden die Verbrennungseffektivität zu 1,0 und der effektive Heizwert mit 31,3 MJ/kg angesetzt. Die Abbildung 5-49 stellt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate für den angesetzten effektiven Heizwert auf Grundlage der Masseverlustrate aus dem Experiment dar. Über das Flächenintegral der Verlaufskurve wurde der Masseverlust bestimmt, sodass auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse zum Zeitpunkt von 1.230 Sekunden ca. 90 % der Masse im Brandversuch

umgesetzt wurde. Nach 1.350 Sekunden müsste auf Grundlage der Verlaufskurve der Wärmefreisetzungsrate das Isopropanol vollständig verbrannt sein. Entgegen dieser Bestimmung beginnt die Abklingphase aus der Abbrandrate im Experiment allerdings erst mit ca. der 1.400. Prüfsekunde. Bei diesem Zeitpunkt wären theoretisch 105 % der Masse verbrannt worden.

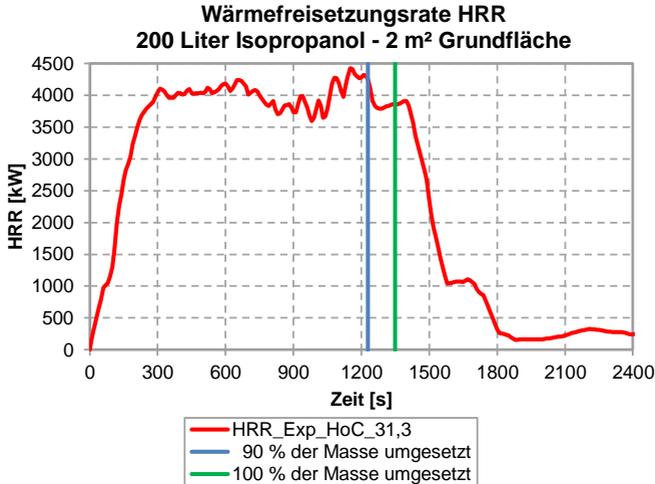


Abbildung 5-49: Wärmefreisetzungsrate im Brandversuch mit 200 Liter Isopropanol unter Berücksichtigung eines effektiven Heizwerts von 31,3 MJ/kg sowie Darstellung des Masseverlustes für 90 % und 100 % bezogen auf die Gesamtmasse

Für diese Feststellung lassen sich unterschiedliche Begründungen geben, wie z. B. das Auftreten von Messfehlern. Ein aber mit hoher Wahrscheinlichkeit eingetretenes Szenario stellt dabei das Auftreten von zusätzlichen Auftriebseinflüssen auf die Poolfeuerwanne während der Verbrennung dar. Die Auftriebseinflüsse könnten dabei einen deutlichen Einfluss vor und insbesondere nach der Vollbrandphase auf die Messungen der Abbrandrate genommen haben. Besonders deutlich wird dies unter Betrachtung der Abklingphase, wo der Kurvenverlauf zweimal untypischerweise kurzzeitig stagniert bzw. sogar nochmal ansteigt. Des Weiteren weist der Temperaturverlauf der Messstelle B5 mittig oberhalb des Poolfeuers ebenfalls auf eine Messungenauigkeit aufgrund des Einflusses des zusätzlichen Auftriebs hin. Das Poolfeuer beginnt mit der 1.200. Prüfsekunde die kontinuierliche Abklingphase, wobei gleichzeitig aber die ermittelte Wärmefreisetzungsrate aus der Abbrandrate noch über 3,5 MW betragen soll. Zum Zeitpunkt der 1.500. Prüfsekunde sind nach den experimentellen Vorgaben noch 2,5 MW vorherrschend, wobei die Temperatur an der Messstelle B5 nur noch ca. 100 °C beträgt.

5.4.1.3 Messdaten

Die Abbildung 5-50 zeigt die Positionierung der Messstellen in Achse C, welche gemäß den Veröffentlichungen ([110], [144]) im Brandversuch verwendet wurden. Des Weiteren wurden die Messstellen für die Simulation in Achse A und B projiziert um den Eckeinfluss in der Simulation zu untersuchen. Beim Brandversuch wurden sowohl Temperaturen als auch Wärmestromdichten gemessen.

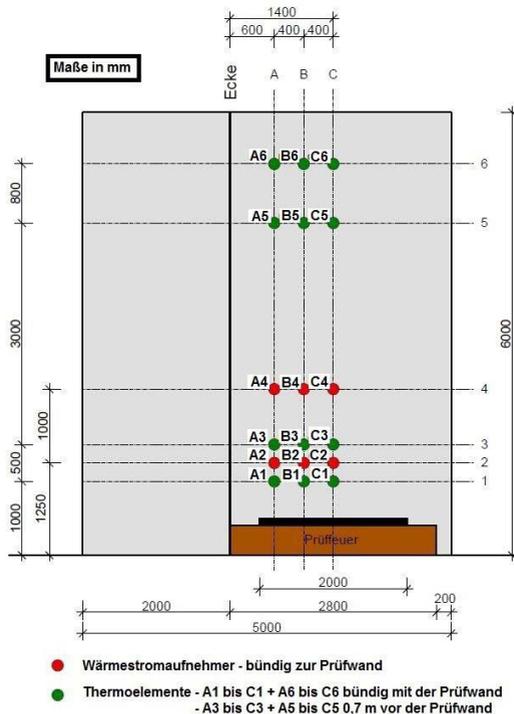


Abbildung 5-50: Messstellenplan für den Brandversuch des IBMB sowie Darstellung der zusätzlichen Messstellen in FDS

Zur Temperaturmessung wurden in der Simulation NiCr-Ni-Mantelthermoelemente Typ K gemäß JEC 584 Teil 1, mit einem Thermodrahtdurchmesser von 0,37 mm und einem Manteldurchmesser von 3 mm berücksichtigt, da keine genauen Angaben aus den Veröffentlichungen ([110], [144]) hierzu vorliegen. Die Wärmestromdichten werden grundsätzlich mit bündig in der Prüfwand befindlichen Wärmestromaufnehmern gemessen. Das Zeitintervall zur Erfassung der Messdaten während der Brandprüfung wurde mit 10 Sekunden angesetzt.

5.4.2 Numerische Untersuchung

5.4.2.1 Geometrie

In der Abbildung 5-51 wird das Simulationsmodell auf Grundlage des Brandversuchs des Poolfeuers mit Isopropanol in FDS dargestellt. Dabei wurde durch eine erste Voruntersuchung der Einfluss der Größe des Simulationsmodells hinsichtlich Länge, Breite und Höhe auf die Brandsimulation überprüft. Aus der Überprüfung wurde ersichtlich, dass eine Vergrößerung des geometrischen Modells in FDS über die Abmessungen nach Abbildung 5-51 hinaus keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat, jedoch die Rechendauer wesentlich erhöht.

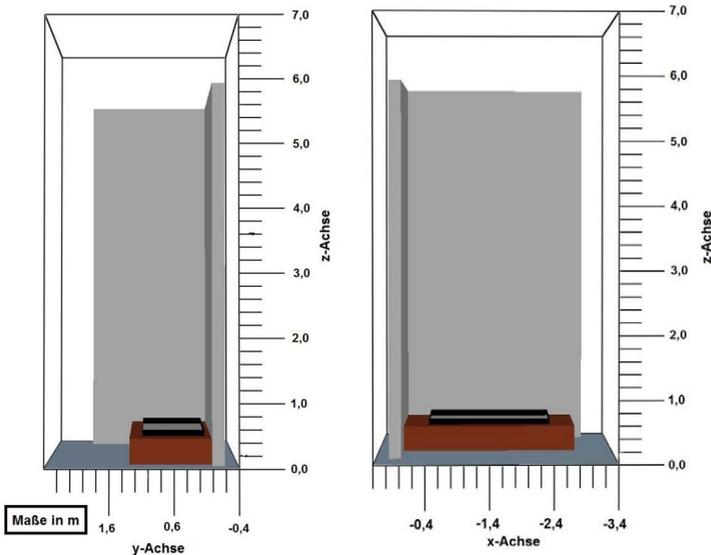


Abbildung 5-51: Geometrische Darstellung des Brandversuchs am IBMB ohne Berücksichtigung der Prüfhalle in FDS

5.4.2.2 Gitternetz

Gemäß Abschnitt 4.2.2 sollte sich für die anzusetzende durchschnittliche Wärmefreisetzungsrate von ca. 4,0 MW, einer Umgebungstemperatur von 293 K und einem daraus resultierenden Branddurchmesser von $D^*=1,67$ bei einer Gitterzellengröße von 10 cm eine ausreichende Gitterzellengröße ergeben. Des Weiteren sollte auch auf Grundlage der bisher erzielten Erkenntnisse aus Abschnitt 5.2 und 5.3 bei einer Gitterzellengröße von 10 cm eine ausreichende Validität erzielt werden. Unabhängig davon wird im Folgenden für

die Simulation des Poolfeuers mittels des integrierten Pyrolysemodells in FDS, eine Konvergenzstudie mit den Gitterzellengrößen 5, 10 und 20 cm durchgeführt. Die Tabelle 5-14 stellt die wesentlichen Parameter für die Konvergenzstudie übersichtlich zusammen.

Tabelle 5-14: Zusammenfassung der relevanten Parameter der Gitterzellengrößen auf Grundlage des charakteristischer Branddurchmesser D^*

Gitterzellengröße [cm]	Rechengebiet B x L x H [m]	Gesamtanzahl Zellen	Netzberechnung D^*/dx
20	3,8 x 3,0 x 7,0	9.975	8,3
10	3,8 x 3,0 x 7,0	79.800	16,7
5	3,8 x 3,0 x 7,0	638.400	33,4

5.4.2.3 Simulation Prüffeuern

Für das Pyrolysemodell des Flüssigkeitsbrandes sind in FDS zur Implementierung zusätzliche brandtechnische Parameter des Brennstoffs erforderlich. Die Tabelle 5-15 stellt die Eingangsparameter zusammen. Für die Verbrennungswärme wurde der untere Heizwert gemäß Abschnitt 5.4.1.2 herangezogen.

Tabelle 5-15: Kennwerte für den Brennstoff Isopropanol für das Pyrolysemodell in FDS

	Wert	Einheit	Quelle
Chemische Formel	C_3H_7OH	[-]	[84]
Heat of Combustion H_c	31,3	[MJ/kg]	[69]
RADIATIVE_FRACTION χ_r	0,3	[-]	
CO-Yield Y_{CO}	0,003	[g/g]	
Soot-Yield Y_{RuB}	0,015	[g/g]	
Siedetemperatur b	82,2	[°C]	
Absorptions Koeffizient κ	30 – 1.600	[1/m]	vgl. 5.4.3.1
Pyrolyseenergie L_v	664	[kJ/kg]	[69]
Wärmeleitfähigkeit λ	0,172	[W/(m·K)]	
Wärmespeicherkapazität c	2,6	[kJ/(kg·K)]	
Dichte ρ	786,0	[kg/m³]	
Masse m	157,2	[kg]	
Emissionsgrad ϵ	1	[-]	

5.4.2.4 Verwendete Materialien

In Tabelle 5-16 sind die in FDS implementierten Materialparameter zusammengestellt. Dabei wird der Stahlwanne des Poolfeuers die Material ID „Stahl“, dem Untergrund die Material ID „Beton“ und der Prüfwand die Material ID „Porenbeton“ zugewiesen. Der Kühlwanne einschließlich Abbrandwaage wird „INERT“ als Material ID zugewiesen, sodass wirklichkeitsnah keine negative Wechselwirkung durch Erwärmung der Kühlwanne und dem Poolfeuer entsteht.

Tabelle 5-16: Materialspezifische Eigenschaften für die Eingabe in FDS

Material	Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m ³]	Emissionsgrad [-]
Stahl*	0,45	54	7.850	0,7**
Beton*	0,9	1,64	2.100	0,7**
Porenbeton*	1,05	0,15	600	0,8**

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS und ggf. temperaturabhängiger Materialeigenschaften sowie Quellennachweise s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

5.4.3 Ergebnisse

Im ersten Schritt der Validierungsstudie zum Poolfeuer werden die Ergebnisse aus den Wärmefreisetzungsraten vorgestellt. Sofern Wärmefreisetzungsraten aus einzelnen Simulationsvarianten nicht mit dem Ergebnis aus dem Brandversuch übereinstimmen, werden diese aus den weiterführenden Untersuchungen ausgeschlossen. Die nachfolgend zum Vergleich herangezogenen Messgrößen der Temperaturen, der Wärmestromdichte und der visuell beobachteten Flammenausbildungen aus dem Brandversuch beschränken sich auf die vorliegenden Versuchsergebnisse aus ([110], [144]).

5.4.3.1 Wärmefreisetzungsrate

Der Auswertung der Wärmefreisetzungsrates des Poolfeuers kommt aufgrund der Verwendung des Pyrolysemodells aus FDS in der Simulation einer besonderen Bedeutung zu. Durch die komplexe Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates in Abhängigkeit der definierten Eingabeparameter wird die Wahrscheinlichkeit einer möglichen fehlerhaften Simulation erhöht. Auf der anderen Seite zeigen die Ergebnisse aus dem Rechenmodell eine deutliche Näherung zum realen Verbrennungsprozess aus dem Brandversuch an, sodass insbesondere im Zuge einer Parameterstudie geänderte Umgebungseinflüsse unmittelbar in die Verbrennung einfließen können.

Die Abbildung 5-52 stellt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrates aus der Simulation mit dem Ergebnis aus dem Brandversuch gegenüber. Für die Simulation mit einer Gitterzellengröße

von 20 cm wird keine plausible Wärmefreisetzungsrate in FDS simuliert. Aus diesem Grund werden keine Ergebnisse aus den Simulationen mit dieser Gitterzellengröße vorgestellt.

Die Gitterzellengrößen mit 5 und 10 cm weisen für die Vollbrandphase eine gute Validität auf. Beide Simulationen weisen allerdings einen früheren Eintritt in die Abklingphase gegenüber dem Brandversuch auf, was auf zu geringe Rückstrahlungseffekte aus der Flamme und den Umgebungsbauteilen in die Poolwanne zurückzuführen ist. Der Zeitpunkt der Abklingphase wird bei der Variante mit einer Gitterzellengröße von 10 cm bei ca. 82 % der umgesetzten Masse und bei der Variante mit einer Gitterzellengröße von 5 cm bei ca. 72 % erreicht. Wobei der Verlauf der Abklingkurven zwischen den beiden Gitterzellengrößen differiert und die Variante mit einer Gitterzellengröße von 10 cm einen deutlich steileren Abfall aufzeigt.

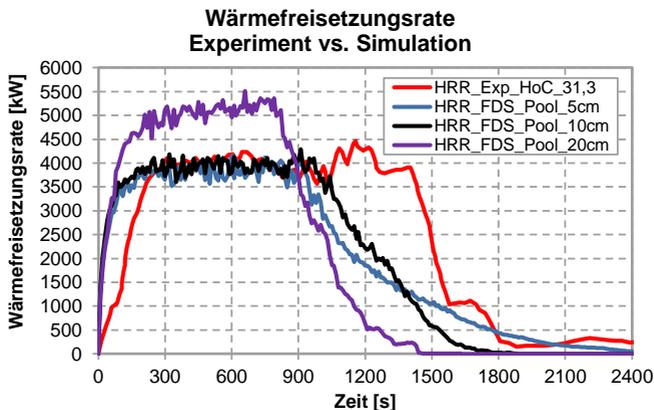


Abbildung 5-52: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate für die drei untersuchten Gitterzellengrößen 5, 10 und 20 cm sowie Darstellung der Wärmefreisetzungsrate aus dem Experiment

Eine Brandausbreitung auf der Oberfläche des Flüssigkeitspools wird in FDS über den Anfangswert des Volumenstroms des Flüssigkeitsdampfes beeinflusst, sodass bei hohen Anfangswerten, kurz nach Simulationsbeginn die vollständige Oberfläche im Verbrennungsprozess steht. Der Zeitpunkt bis zum Erreichen der Vollbrandphase lässt sich neben diesem Parameter durch den Absorptionskoeffizienten steuern. Definiert wird der Absorptionskoeffizient als das Eindringen der Strahlung in die Tiefe der Flüssigkeit. Der Absorptionskoeffizienten ist abhängig von dem Wellenlängenspektrum der einwirkenden Strahlung (Strahlungsspektrum u. a. temperaturabhängig) und kann dadurch bei unterschiedlichen Einwirkungen deutlich differieren. In der Literatur werden für brennbare Flüssigkeiten Angaben in den Grenzen 52 für Methanol bis 1534,3 für Ethanol benannt ([14], [15], [16], [124]). Für Isopropanol konnten keine Angaben recherchiert werden.

Die Abbildung 5-53 stellt die Simulationsergebnisse bei einer berücksichtigten Gitterzellengröße von 10 cm zu unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten mit den Werten zwischen 30 und 1600 im Zusammenhang mit dem Einfluss auf den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate dar. Mit zunehmendem Betrag für den Absorptionskoeffizienten wird die Vollbrandphase grundsätzlich schneller erreicht, da die Wärmestrahlung tiefer in die Flüssigkeit eindringt und somit das Isopropanol höher beansprucht wird. Hinsichtlich des Verlaufs der Abklingkurve hat der Absorptionskoeffizient keinen maßgebenden Einfluss.

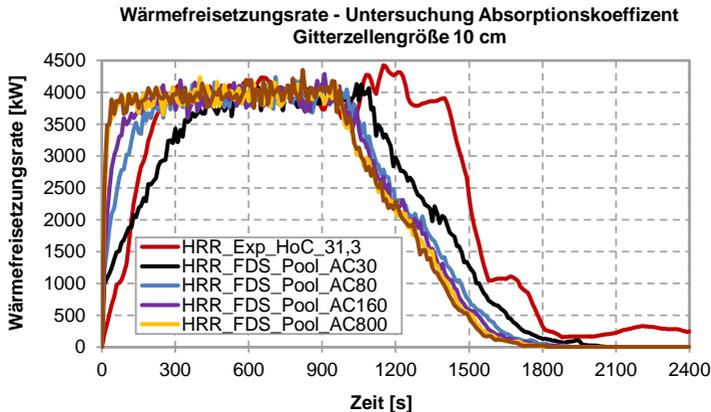


Abbildung 5-53: Verlauf der Wärmefreisetzungsrate unter Berücksichtigung unterschiedlicher Absorptionskoeffizienten

Für die weiteren Untersuchungen wird ein Absorptionskoeffizient von 160 als ausreichend plausibel angesehen, da insbesondere der Temperaturverlauf zu Brandbeginn im Bereich der Plume im Zuge der numerischen Untersuchungen bei dieser Annahme eine gute Übereinstimmung mit dem experimentellen Brandversuch aufgezeigt hat. Der spätere Eintritt der Abklingphase aus dem Verlauf der Wärmefreisetzungsrate im Brandversuch kann zum einen mit den Erläuterungen gemäß Abschnitt 5.4.2.3. begründet werden. Des Weiteren ist anzunehmen, dass die Abklingphase in der Simulation grundsätzlich zu früh eintritt. Ein Steuerungsparameter dafür ist beim Pyrolysemodell in FDS jedoch nicht vorhanden.

5.4.3.2 Temperaturen und Wärmestromdichten

Im Rahmen der Simulation wurde unabhängig der Gitterzellengröße festgestellt, dass die Anordnung des Poolfeuers im Eckbereich des Prüfstandes Einfluss auf die Flammenausbildung entlang der Prüfwand hat. Dies führt dazu, dass die Flammenachse in der Simulation näher an die Eckwand rückt, so dass die hauptbeanspruchte Achse im Simulationsmodell von Achse C in die Achse B übergeht. Der Grund hierfür liegt darin, dass

durch die Eckausbildung im Bereich zwischen Prüffeuern und Prüfstand sich weniger Umgebungsluft in die Flamme einmisch, weshalb die Strömungsgeschwindigkeiten dort gegenüber dem vorderen Bereich höher sind und durch den entstehenden Unterdruck die Flammen in der beschriebenen Form umgelenkt werden. Dieser Effekt stellt sich im Brandversuch mit hoher Wahrscheinlichkeit weniger deutlich ein, da dem Unterdruck aufgrund der erzeugten Zwangsströmung durch die Abluftanlage entgegengewirkt wird.

Die dargestellten Temperaturverläufe entlang der Flammenachse und der darüber liegenden Auftriebsplume gemäß Abbildung 5-54 sowie auf der Rückwand gemäß Abbildung 5-55 zeigen unabhängig der Gitterzellengröße bis zur Abklingphase eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.

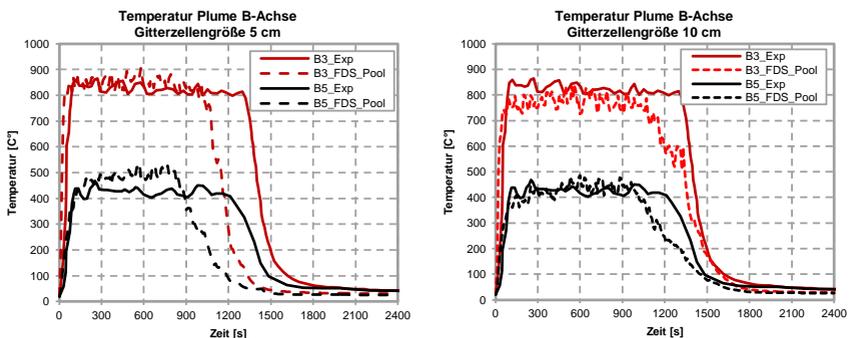


Abbildung 5-54: Temperaturverlauf oberhalb der Poolwanne im Abstand 0,7 zur Rückwand für die Messstellen B3 und B5

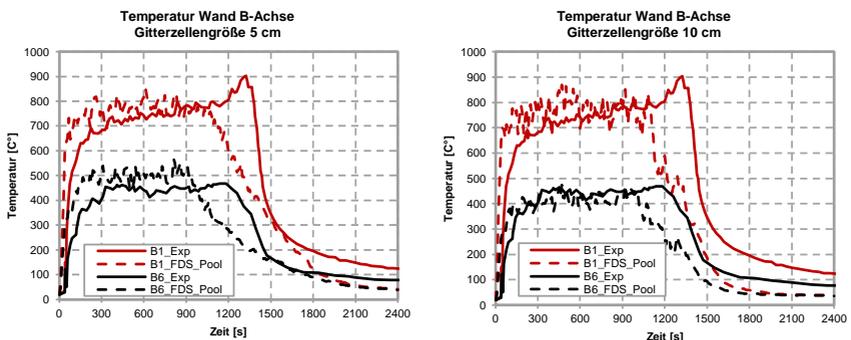


Abbildung 5-55: Temperaturverlauf an der Rückwand für die Messstellen B1 und B6

Bei den Wärmestromdichten am Messpunkt B2 gemäß Abbildung 5-56 liegen die Simulationsergebnisse ca. 25 kW/m^2 unterhalb von den Messergebnissen aus dem Brandversuch. Die Wärmestromdichten am Messpunkt B4 zeigen wiederum eine gute

Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation. Unter zusätzlicher Betrachtung der übereinstimmenden Temperaturverläufe am angrenzenden Messpunkt B1, lässt sich ableiten, dass die über Thermoelemente gemessenen Temperaturen den konvektiven Anteil aus der Flamme in diesem Bereich ausreichend genau simulieren.

Somit könnte der Effekt aufgrund der geänderten Flammenachse und ggf. einer geänderten Flammenausbildung in diesem Bereich zu einer Unterschätzung der Strahlungswirkung in der Simulation führen, woraus sich die Differenz rein aus der Strahlungswirkung der Flamme erklären lässt. Unter Betrachtung der möglichen Unsicherheiten gemäß Abschnitt 4.3.2.1 für die Ausgangsparameter der Wärmestromdichten aus dem Simulationsmodell von 0,2 (vgl. Tabelle 4-1) kann selbst der Verlauf am Messpunkt B2 als noch ausreichend valide betrachtet werden.

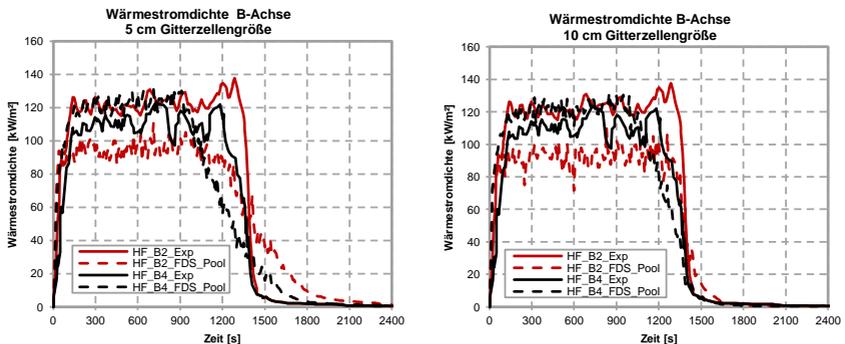


Abbildung 5-56: Verlauf der Wärmestromdichten an der Rückwand für die Messstellen B2 und B4

5.4.3.3 Flammenbild

Die Abbildung 5-57 stellt die Flammenausbildung der Simulation mit den drei untersuchten Gitterzellengrößen sowie dem Flammenbild aus dem Brandversuch gegenüber. Mit der Visualisierung werden der Eckeinfluss und die Verlagerung der Flammenachse in Richtung der Eckwand nochmal veranschaulicht. Darüber hinaus ist die visuell wahrzunehmende Flamme in der Simulation höher als im Brandversuch, was im Wesentlichen mit der geringeren Umgebungsluftbeimischung im Eckbereich und der resultierenden höheren Auftriebsgeschwindigkeit zusammenhängt. In der Simulation stellt sich die Flamme als stark pulsierender Körper da, was zu einem wechselhaften Flammenbild führt, sodass nur schwer eine ständige Flammenhöhe im Simulationsmodell nachzuweisen ist.

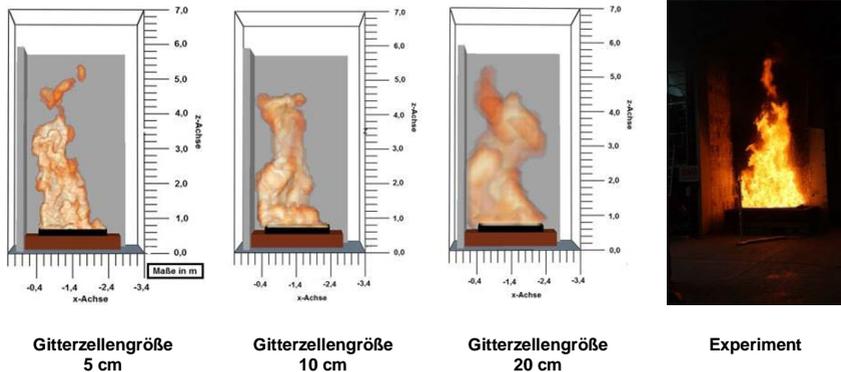


Abbildung 5-57: Gegenüberstellung der Flammenausbildung zwischen Experiment [110] und Simulation

5.4.4 Fazit

Für die Simulation des Poolfeuers mit dem Brennstoff Isopropanol ist es in diesem Abschnitt gelungen, das in FDS zur Verfügung gestellte Pyrolysemodell auf Grundlage der Übereinstimmung der Temperatur- und Wärmestromverläufe sowie dem Verlauf der Wärmefreisetzungsrate während der Vollbrandphase erfolgreich an einem Brandversuch zu validieren. Jedoch zeigte sich auch die mit hoher Wahrscheinlichkeit aufgetretene Einflussnahme einer mechanischen Abluft hinsichtlich der Flammenausbildung, welche bei Brandsimulationen bei ausreichender Kenntnis der Anlage berücksichtigt werden sollte. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass die Simulationsergebnisse mit einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm konvergieren. Der Ansatz zur Bestimmung einer ausreichenden Gitterzellengröße für die Simulation gemäß Abschnitt 4.2.2 konnte auch für das Poolfeuer mit Isopropanol sowie bei gleichzeitiger Anwendung des integrierten Pyrolysemodells in FDS nachgewiesen werden.

5.5 Zusammenfassung

Im Kapitel 5 wurden die drei Prüffeuertypen für Brandprüfungen von Außenwandbekleidungen experimentell und numerisch untersucht. Dabei zeigten die Prüffeuern mit Kompakt-Gasbrenner und Poolfeuer im Brandversuch einen stabilen Abbrand und einen konstanten Verlauf für die Wärmefreisetzungsrate während der Vollbrandphase auf. Bei den Brandversuchen mit Holzkrippen im Fassadenprüfstand waren die Abbrand- bzw. die Wärmefreisetzungsraten deutlich inkonstanter. Die mit zunehmender Branddauer stark abnehmende Krippenstabilität wirkte sich hinsichtlich der Reproduzierbarkeit zusätzlich ungünstig auf die Temperaturverläufe an der Prüfwand aus und kann je nach Versagensbild der Holzkrippe zu deutlichen Abweichungen bei den Messergebnissen zwischen den einzelnen Brandversuchen führen.

Hinsichtlich der numerischen Untersuchungen konnte für die drei Prüffeuertypen jeweils ein valides numerisches Modell für die Simulation bestimmt werden. Die Wärmefreisetzungsraten wurden bei den untersuchten numerischen Modellen durch das Berechnungsprogramm richtig implementiert und umgesetzt, sodass die Brandeffekte numerisch valide gegenüber den untersuchten experimentellen Brandversuchen simuliert werden konnten. Besonders deutlich wurde der Zusammenhang zwischen der Wärmefreisetzungsrate und den Verläufen der Temperaturen und Wärmestromdichten.

Bei den Simulationen zeigte sich der Ansatz mit $D^*/dx \geq 14$ unter Berücksichtigung von Gleichung Gl. (4-7) als ausreichender Simulationsansatz für groß skalierte Brandversuche bei der Überprüfung einer ausreichenden Validierung. Am Beispiel der Sockelbrandprüfung konnte festgestellt werden, dass die geometrischen Einflüsse der Umfassungsbauteile und der natürlichen Lüftungsbedingungen bei ausreichender Dimensionierung keinen signifikanten Einfluss auf die thermische Beanspruchung des Prüfstandes im groß skalierten Brandversuch hat. Als ausreichende Dimensionierung sind die Randbedingungen der Fassadenprüfhalle am Prüfstand C gemäß Abschnitt 5.3 bei einer mittleren Wärmefreisetzungsrate von ca. 2,5 MW des Prüffeuers während der Vollbrandphase zu betrachten.

6 Experimentelle und numerische Untersuchung von groß skalierten Brandversuchen

6.1 Einführung

Auf Grundlage der durchgeführten Validierungsuntersuchungen für die drei Prüffeuertypen Gasbrenner, Holzkrippe und Poolfeuer zwischen Experiment und Simulation in Kapitel 5 werden die Simulationsmodelle für die Prüffeuere in diesem Kapitel unter einer veränderten Prüfstandsgeometrie untersucht. Die Auswahl der groß skalierten Brandversuche erfolgte im Abschnitt 2.4. Dabei werden folgende Prüfstände untersucht:

- BS 8414-1 [32] (Holzkrippe in Brandkammer),
- LEPIR 2 [115] (Holzkrippe in Brandraum),
- SP FIRE 105 [120] (Poolfeuer in Brandkammer),
- ISO 13785-2 [71] (Gasbrenner in Brandraum).

Die Validierung der Prüffeuertypen an unterschiedlichen groß skalierten Brandversuchen ist erforderlich, um Unsicherheiten durch veränderte Prüffeuereleistungen und geometrischen Randbedingungen zu erfassen oder im günstigsten Fall sogar auszuschließen. Erst nach einer erfolgreichen Validierung mit unterschiedlichen Anordnungen des Prüffeuers und variierender Geometrien des Prüfstands können die einzelnen Simulationsmodelle als geeignet betrachtet werden, um auch alternative Prüffeuergößen und geänderte geometrische Randbedingungen bei groß skalierten Brandversuchen, insbesondere für die Zielstellung dieser Arbeit, anzuwenden.

Zum Ende des Kapitels werden die untersuchten groß skalierten Brandversuche hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Prüfwand quantitativ ausgewertet und gegenübergestellt. Die nationalen Prüfungen für das Raumbrandszenario gemäß DIN 4102-20 [32] und für das Sockelbrandszenario gemäß MVV TB [107] werden in der quantitativen Auswertung zusätzlich untersucht, um einen Vergleich zwischen dem Prüfniveau auf nationaler und europäischer Ebene zu erlangen.

Bei der Darstellung der numerischen Ergebnisse werden bei den Ausgangsparametern der Wärmefreisetzungsraten aus der Simulation, die Ergebnisse nur dann dargestellt, wenn Abweichungen zu den Erkenntnissen gemäß Kapitel 5 auftreten.

6.2 BS 8414-1 [19]

Zur Validierung des Simulationsmodells für den groß skalierten Brandversuch gemäß BS 8414-1 [19] wird ein Kalibrierungsversuch berücksichtigt, welcher am Prüfstand C der MFPA Leipzig durchgeführt worden ist. Die Ergebnisse zu dem Brandversuch wurden in Auszügen in [78] vorgestellt. Die Randbedingungen für den Brandversuch werden im Rahmen der Validierung durch die Erkenntnisse zum Prüfstand C aus den Kalibrierungsversuchen aus Abschnitt 5.3 sinnvoll ergänzt. Aufgrund der begrenzten Angaben aus dem Brandversuch, beschränkt sich die Validierung ausschließlich auf die Untersuchungen zu den maximal auftretenden Temperaturen am Prüfstand im Vergleich zwischen Experiment und Simulation. Aufgrund der erlangten Erkenntnisse in Abschnitt 5.3 zum Prüfstand und des Prüffeuers als Holzkrippe des Sockelbrandversuchs gemäß MVV TB [107] kann eine gute Einschätzung zu einer möglichen Übereinstimmung der einzelnen Simulationsvarianten erzielt werden.

6.2.1 Experimentelle Untersuchung

6.2.1.1 Randbedingungen

Die grundlegenden geometrischen Eigenschaften des Prüfstands und der Prüfhalle entsprechen den Angaben der experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 5.3 und werden durch die angepassten Angaben zu den angenommenen klimatischen Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur von $T = 20\text{ °C}$ und relative Luftfeuchte von $\phi = 50\%$), den Angaben zur Brandkammer und der Holzkrippe zusammenfassend in der Tabelle 6-1 dargestellt. Ergänzend sind in der Abbildung 6-1 und der Abbildung 6-2 die geometrischen Randbedingungen auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Grundrisse und Ansichten nach [93] veranschaulicht abgebildet. Die Beanspruchungszeit wird in [78] mit 35 Minuten angegeben. Die Abmessungen der Brandkammer mit einer Länge von 1,5 m, gemessen von der Vorderkante des Brandkammersturzes bis zur Rückwand der Brandkammer, entspricht grundsätzlich nicht den Anforderungen gemäß BS 8414-1 [19] mit einer darin vorgegebenen Länge von 1,0 m.

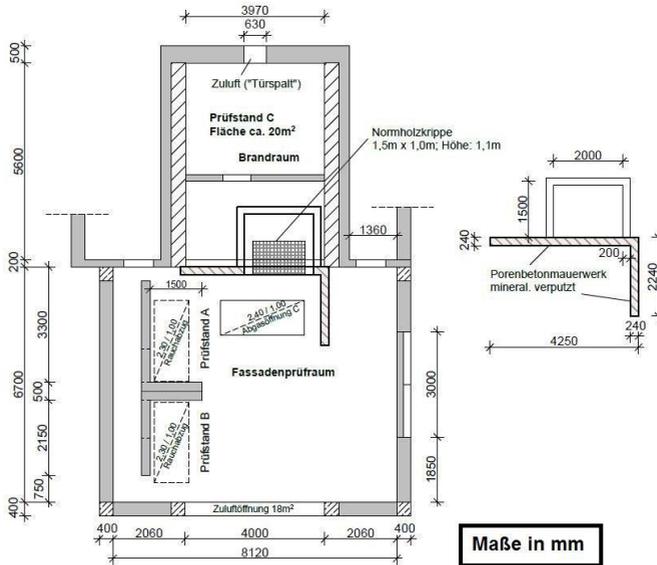


Abbildung 6-1: Grundriss des Prüfstands für die Prüfung näherungsweise gemäß BS 8414-1 [19] der MFPA Leipzig

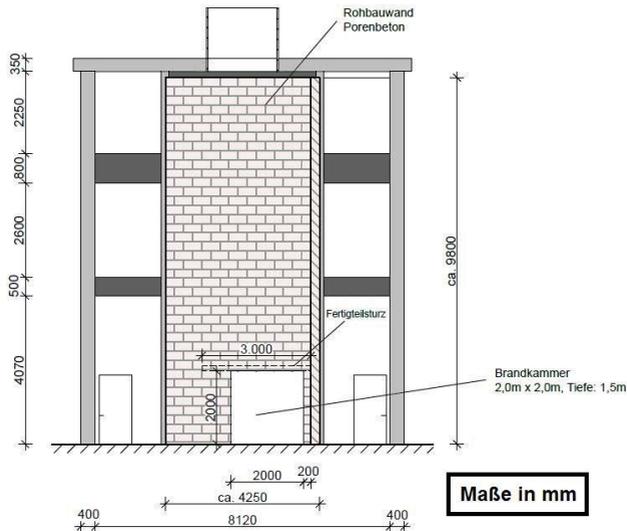


Abbildung 6-2: Ansicht des Prüfstands für die Prüfung näherungsweise gemäß BS 8414-1 [19]

Tabelle 6-1: Versuchsrandbedingungen des Kalibrierungsversuch BS1

Klimatische Randbedingungen						
Versuch	Temperatur [°C]		Relative Luftfeuchte [%]		Wind	
	Innen	Außen	Innen	Außen	Außen	
BS	20	20	50	50	keine Angaben	
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen						
Bauteil		Innenmaße [m]	Material			
Prüfstand	Rückwand B x H	4,0 x 9,8	Porenbetonmauerwerk mineralisch verspachtelt			
	Eckwand B x H	2,0 x 9,8				
Prüfhalle	Grundfläche B x L	6,7 x 8,12	Stahlbeton und Kalksandsteinmauerwerk			
	Höhe H	10,0				
Brandkammer	Grundfläche B x L	2,0 x 1,5	Porenbeton			
	Höhe H	2,0				
Lüftungsbedingungen	Zuluft B x H	4,0 x 4,5	-			
	Abluft B x L	1,0 x 2,4				
Prüffeuer						
	Maße Krippe b x l x h _c [m]	Maße Stab D x B x l [m]	Masse [kg]	Stab / Luft	H _{u,eff} [MJ/kg]	Zündinitial
Holzkrippe (Fichte)	1,5 x 1,0 x 1,1	0,05 x 0,05 x 1,5 und 0,05 x 0,05 x 1,0	400 kg	1/1	17,28	6 x Stahlwanne mit jeweils ca. 200 ml Isopropanolwanne
Beanspruchungszeit Kalibrierungsversuch						
35 Minuten						

6.2.1.2 Prüffeuer

Die Holzkrippe im Brandversuch wies eine Masse von ca. 400 kg auf und wurde mit den Stababmessungen $D \times B \times l = 0,05 \times 0,05 \times 1,0$ [m] und $0,05 \times 0,05 \times 1,5$ [m] kreuzweise im Stab-Luft-Verhältnis 1:1 mit einer Höhe von ca. 1,1 m hergestellt. Die 400 kg Holzkrippe entspricht näherungsweise den normativen Vorgaben gemäß BS 8414-1 [19]. Genauere Angaben zu den Vorgaben aus der Norm sind der Anlage A zu entnehmen.

Zur Verbesserung der Ventilationsbedingungen in der Holzkrippe wurde diese auf drei Steinreihen aufgeständert. Die Abbildung 6-3 veranschaulicht die in der Brandkammer bündig zur Vorderkante der Rückwand positionierte Holzkrippe.

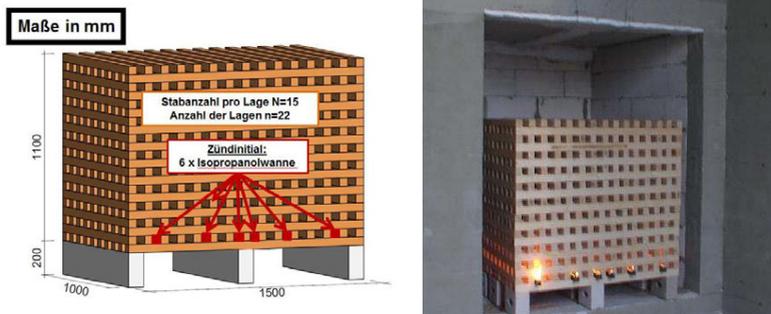


Abbildung 6-3: 400 kg Holzkrippe im Kalibrierungsversuch mit einer zusätzlichen Aufständering auf Mauerwerkssteinen [78]

Die Abbildung 6-4 stellt den Verlauf der 400 kg Holzkrippe aus dem Brandversuch dar. Die Vollbrandphase im Brandversuch wurde unmittelbar nach der 300. Prüfsekunde erreicht. Die gemittelte Wärmefreisetzungsrate zwischen der 300. bis 1.860. Prüfsekunde beträgt ca. 3.100 kW in der Vollbrandphase. Für die maximale Wärmefreisetzungsrate wurden ca. 4.100 kW und für die minimale Wärmefreisetzungsrate ca. 2.700 kW gemessen.

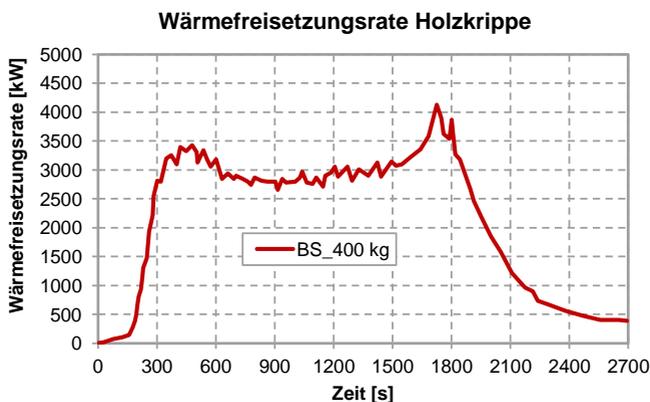


Abbildung 6-4: Wärmefreisetzungsrate der 400 kg Holzkruppen im Fassadenprüfstand für den Kalibrierungsversuch BS mit einer Geometrie von $b \times l \times h_c = 1,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}$

Aus dem Verlauf der Wärmefreisetzungsrate ist anzunehmen, dass zum Ende der Vollbrandphase die Holzkrippe deutlich an Stabilität verloren hat und aufgrund dessen nach Erreichen der max. Wärmefreisetzungsrate in die Abklingphase übergegangen ist. Die umgesetzte Masse zu Beginn der Abklingphase beträgt unter Berücksichtigung eines effektiven Heizwerts von $H_{u,eff} = 17,28 \text{ MJ/kg}$ ca. 73 %.

6.2.1.3 Messdaten

In der Abbildung 6-5 ist der Messstellenplan für den Brandversuch am Fassadenprüfstand C dargestellt [93]. Die Temperaturen unmittelbar am Prüfstand wurden im Versuch gemäß Abbildung 6-5 in einem Abstand von 2 cm vor der Prüfwand erfasst. Als Messinstrumente wurden dabei NiCr-Ni Mantelthermoelemente Typ K gemäß JEC 584 Teil 1, mit einem Thermodrahtdurchmesser von 0,37 mm und einem Manteldurchmesser von 3 mm verwendet und online mit einem Messsystem TUM 99-2 registriert. Die Flammenhöhen wurden visuell durch Abgleich mit Messmarken am Prüfstand aufgezeichnet. Die experimentellen Messwerte wurden im Zeitintervall von 10 Sekunden aufgenommen. In der Simulation wurden alle Messwerte an den ausgewiesenen Messstellen unabhängig der fehlenden Einzeldaten aus dem Brandversuch bestimmt, um dadurch die max. Temperaturen für jeden Messpunkt bestimmen zu können.

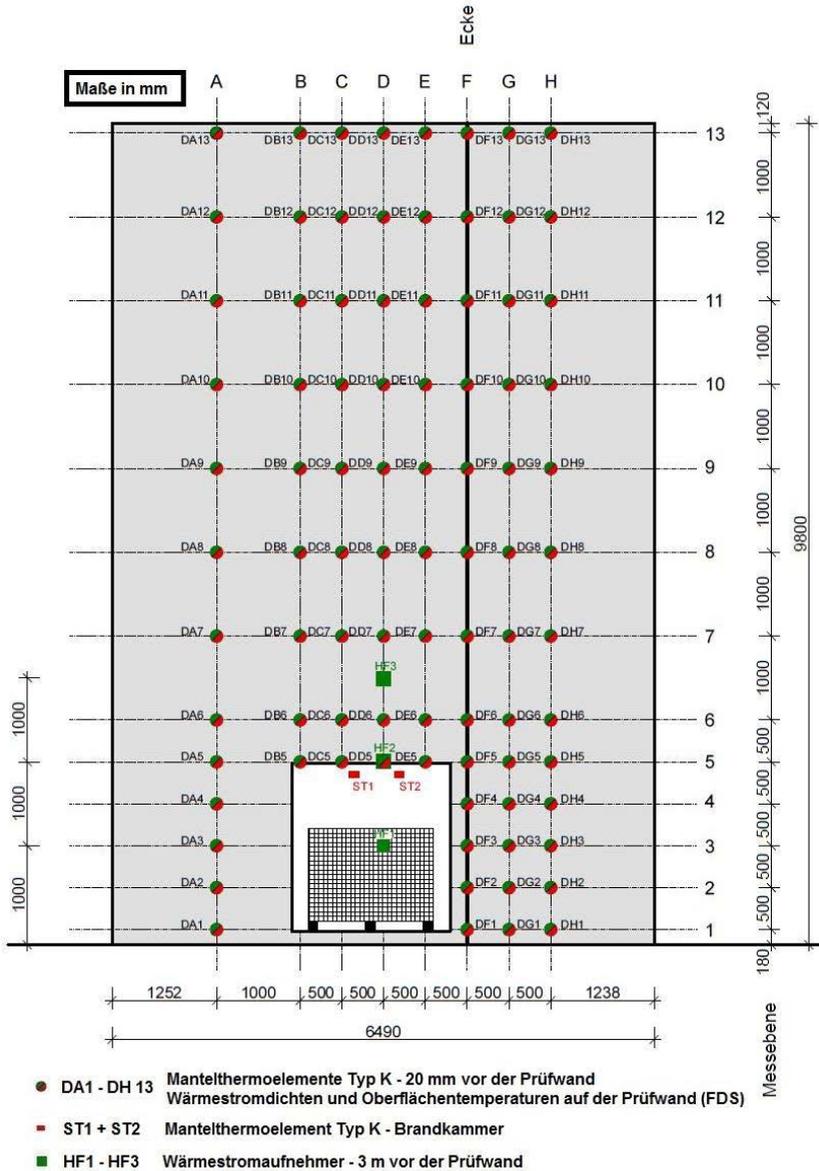


Abbildung 6-5: Messstellenplan des Kalibrierungsversuchs BS mit Darstellung der ergänzende Messpunkte für die weiterführenden Untersuchungen mit FDS

6.2.2 Numerische Untersuchung

6.2.2.1 Geometrie

Der Prüfstand wurde in FDS auf Grundlage der experimentellen Vorgaben entsprechend der Abbildung 6-1 und der Abbildung 6-2 sowie der Tabelle 5-1 implementiert. In Abbildung 6-6 ist das Simulationsmodell, ohne Berücksichtigung der Fassadenprüfhallen, dargestellt.

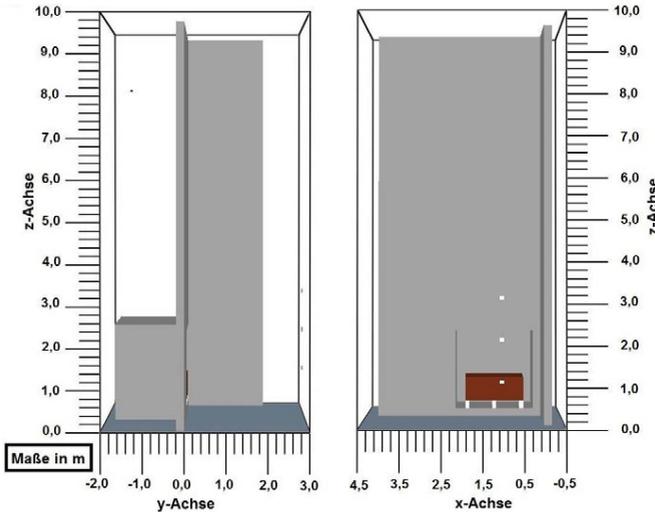


Abbildung 6-6: Geometrische Darstellung des Brandversuchs an der MFPA Leipzig in FDS ohne Berücksichtigung der Prüfhalle

6.2.2.2 Gitternetz

Für den charakteristischen Branddurchmesser D^* ergibt sich bei einer mittleren Wärmefreisetzungsrate von ca. 3,1 MW in der Vollbrandphase ein Wert von $D^* = 1,51$.

Tabelle 6-2: Zusammenfassung der relevanten Parameter der Gitterzellengrößen auf Grundlage des charakteristischen Branddurchmessers D^*

Gitterzellengröße [cm]	Rechengebiet B x L x H [m]	Gesamtanzahl Zellen	Netzberechnung D^*/dx
ohne Berücksichtigung der Prüfhalle			
20	4,8 x 5,0 x 10	30.000	7,5
10	5,0 x 5,0 x 10	250.000	15,1
5	5,0 x 5,0 x 10	2.000.000	30,2

Die Tabelle 6-2 fasst die wesentlichen Kenngrößen der Gitternetzstruktur des Simulationsmodells zusammen. Auf Basis der Erkenntnisse gemäß Abschnitt 4.2.2 und Kapitel 5 ist bei einem Verhältnis $D^*/dx = 15,1$ unter Berücksichtigung einer Gitterzellengröße von 10 cm eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zu erwarten. Unabhängig davon, werden im Rahmen der Untersuchungen die Gitterzellengrößen 5, 10 und 20 cm in der Konvergenzstudie berücksichtigt.

6.2.2.3 Simulation Prüffeuer

Die vier Varianten für das Prüffeuer werden analog zu den Untersuchungen für die Holzkrippe der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] in Abschnitt 5.3 entsprechend Abbildung 6-7 simuliert.

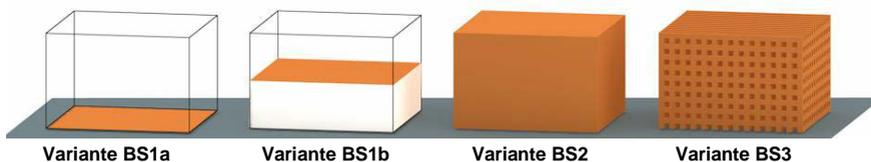


Abbildung 6-7: Darstellung der Modellierungsvarianten für den Ansatz der Wärmefreisetzungsrates in FDS

Die Tabelle 6-3 stellt die geometrischen Randbedingungen und die dazugehörigen angesetzten flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrates für die Varianten der Holzkrippe bei unterschiedlicher Gitterzellengröße zusammen. Die Bestimmung der Eingabedaten entspricht der Herangehensweise aus den Untersuchungen zum Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] nach Abschnitt 5.3.

Tabelle 6-3: FDS Eingabedaten der maximalen, flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrates der unterschiedlichen Simulationsvarianten auf Grundlage des Kalibrierungsversuch BS

BS1	Variante 1a und 1b			Variante 2			Variante 3		
	A_{grund} [m ²]	qaG [kW]	HRRPUA [kW/m ²]	$A_{\text{oben+Seite}}$ [m ²]	qaA [kW/m ²]	HRRPUA [kW/m ²]	A_{stab} [m ²]	qaG [kW]	HRRPUA [kW/m ²]
20 cm	1,6	4.131	2.582	7,84	527	130%:685 70 %: 369	27,25	4.131	151,6
10 cm	1,4		2.951	6,68	618	130%:803 70 %: 433			
5 cm	1,5		2.754	7,0	590	130%: 767 70 %: 413			

Alle Eingabeparameter für die Verbrennung von Holz in der Simulation gemäß Tabelle 6-4 werden aus dem Validierungsversuch der Holzkrippe aus Kapitel 5 entnommen.

Der Strahlungsanteil (RADIATIVE_FRACTION) für die Wärmefreisetzung der Holzkrippe wird mit $\chi_r = 0,25$ festgelegt.

Tabelle 6-4: Eingabeparameter in FDS für das Verbrennungsprodukt Holz

	Wert	Einheit	Quelle
Chemische Formel	$C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}$	[-]	[84]
Heat of Combustion H_c	17,28	[MJ/kg]	vgl. Tabelle 2-7
RADIATIVE_FRACTION χ_r	0,25	[-]	vgl. Tabelle 2-7
CO-Yield Y_{CO}	0,005	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7
Soot-Yield $Y_{Ruß}$	0,015	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7

6.2.2.4 Verwendete Materialien

Die verwendeten Materialien gemäß Tabelle 6-5 beziehen sich auf die Erkenntnisse der Kalibrierungsversuche aus ([94], [95]) und wurden für die Simulation des BS 8414-1 [19] wiederholt angesetzt. Die Zuweisung der Materialien in FDS erfolgt auf Grundlage der Angaben gemäß Tabelle 6-1. Die Eingabedateien mit Angabe der instationären Eigenschaften der Materialien kann der Anlage F entnommen werden.

Tabelle 6-5: Materialspezifische Eigenschaften für die Eingabe in FDS

Material	Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m ³]	Emissionsgrad [-]
Stahl*	0,45	54	7.850	0,7**
Beton*	0,9	1,64	2.100	0,7**
Porenbeton*	1,05	0,15	600	0,8**

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS und ggf. temperaturabhängiger Materialeigenschaften sowie Quellennachweise s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

6.2.3 Ergebnisse

6.2.3.1 Allgemein

Bei den Untersuchungen zum Brandversuch gemäß BS 8414-1 [19] konnte für die Gitterzellengröße von 20 cm keine Validität festgestellt werden. Die einwirkenden Temperaturen auf den Prüfstand aus der Simulation lagen deutlich unter den Temperaturen aus dem Brandversuch. Dabei erreichten die Flammen oberhalb der Brandkammer eine Höhe von max. 1 m über dem Brandkammersturz. Die Ergebnisse für die Temperaturen und die Wärmestromdichten aus diesen Simulationsvarianten werden somit nicht weiter aufgeführt.

Für die Untersuchungen mit einer Gittergröße von 10 cm erzielte die Variante BS1b die größte Validität zwischen Experiment und Simulation. Bei einer Gitterzellengröße von 5 cm konnte für alle Varianten eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erreicht werden. Zur Darstellung der Validität zwischen Experiment und Simulation werden im Folgenden die Ergebnisse aus der Variante BS1b mit einer Gitterzellengröße von 10 cm vorgestellt. Anhand der Auswertungen der einwirkenden Wärmestromdichte für das Flächenintegral der beanspruchten Prüfwandfläche werden zum Abschluss der Ergebnisdarstellung die Übereinstimmungen der Varianten untereinander für die verschiedenen Gitterzellengrößen dargestellt.

Die Auswertung der Simulation beschränkt sich auf eine Prüfzeit von 2.400 Sekunden, da zu diesem Zeitpunkt das Plateau der Abklingkurve erreicht worden ist, die Krippenkonstruktion vollständig versagt hat sowie ca. 85 % der eingesetzten Masse verbrannt sind.

6.2.3.2 Temperaturen

Die Abbildung 6-8 stellt die maximalen Temperaturen als Isothermen für den Brandversuch über die gesamten Prüfzeit von 2.700 Sekunden in einem Abstand von 20 mm vor der Prüfwand dar. Auf Grundlage der Ergebnisse zeigt sich, dass Temperaturen von 500 °C an der Prüfwand bis ca. 3,5 m über den Brandkammersturz im Brandversuch erreicht wurden.

Die beobachteten durchschnittlichen Flammenhöhen in den Brandversuchen wurden zwischen 2,5 m und 3,5 m und die maximale Flammenhöhen mit 4,0 m angegeben [78]. Dabei deuten die Flammerscheinungen aufgrund der maximalen Temperaturen darauf hin, dass diese nicht im Bereich der Messstellen aufgetreten sind. Unter Betrachtung der Wärmefreisetzungsrate gemäß Abbildung 6-4 sind die maximalen Temperaturen und maximale Flammenhöhen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Beginn und zum Ende der Vollbrandphase erreicht worden.

Der Vergleich der Temperaturverläufe aus der Simulation in Achse DD gemäß Abbildung 6-9 gegenüber den maximalen Temperaturen gemäß Abbildung 6-8 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.

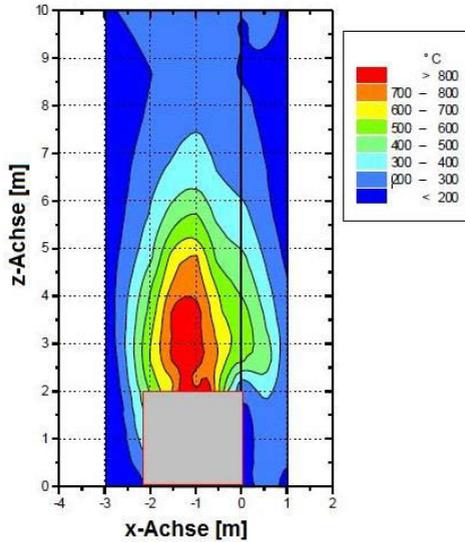


Abbildung 6-8: Darstellung der maximalen Temperaturen als Isothermen über die Prüfzeit 2.700 Sekunden aus dem Experiment [78]

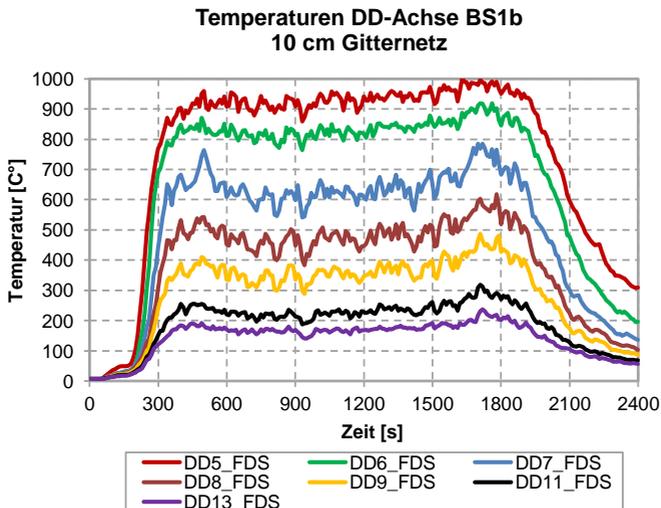


Abbildung 6-9: Temperaturverläufe für ausgewählte Messstellen an der hauptbeanspruchten Achse DD für die Simulation der Variante BS1b

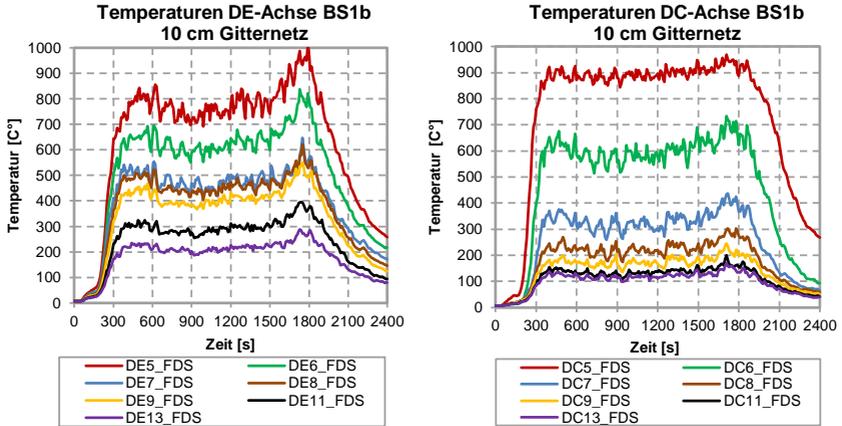


Abbildung 6-10: Temperaturverläufe für ausgewählte Messstellen an den Achsen DC und DE für Simulation der Variante BS1b

Unter Betrachtung der Temperaturverläufe im Bereich der Achsen DE und DC in Abbildung 6-10 wird ersichtlich, dass sich der Eckeinfluss in der Simulation gegenüber dem Experiment deutlicher auswirkt und zu einer Verschiebung der Flammenachse in die Prüfstandecke führt. Der Bereich bis max. ca. 1 m oberhalb des Brandkammersturzes ist entlang der Brandkammer in der Simulation höher beansprucht als im Brandversuch, was auf eine größere Auffächerung der aus der Brandkammer schlagenden Flamme in der Simulation hindeutet.

6.2.3.3 Flammenausbildung

In der Abbildung 6-11 wird die Flammenausbildung während der Vollbrandphase in der Simulation gegenüber dem Experiment dargestellt. Dabei wurden für die Simulationsvarianten BS1b mit einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm und die BS1a mit einer Gitterzellengröße von 20 cm berücksichtigt.

Die durchschnittliche Flammenhöhe über dem Sturz beträgt bei der Variante BS1b zwischen 2,5 m bis 3,5 m und zeigt somit eine gute Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der Simulation auf. Für die Variante BS1a wird lediglich eine durchschnittliche Flammenhöhe von ca. 1 m über Sturz während der Simulation erreicht, was nochmals verdeutlicht, warum die Varianten mit einer Gitterzellengröße von 20 cm bei Brandversuchen mit der Ausbildung einer kompakten Brandkammer nicht ausreichend valide sind.

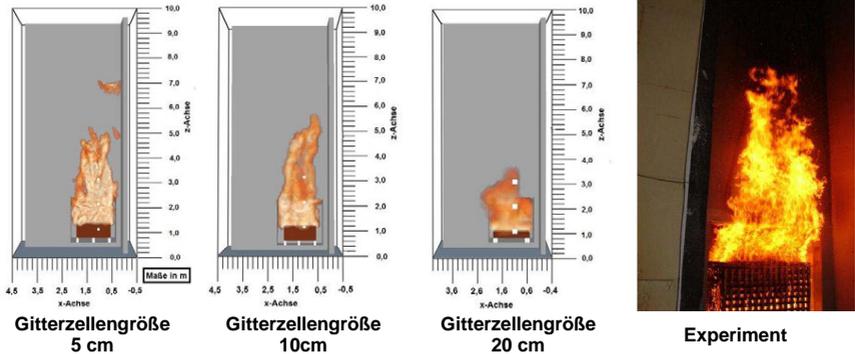


Abbildung 6-11: Gegenüberstellung der Flammenausbildung zwischen Experiment und der Simulationsvariante BS1b

6.2.3.4 Wärmestromdichten

In der Abbildung 6-12 wird die einwirkende Wärmestromdichte auf den Prüfstand als Flächenintegral für die Varianten BS1b, BS2 und BS3 bei einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm gegenübergestellt. Dabei wird ersichtlich, dass nur die Variante BS1b mit einer Gitterzellengröße von 10 cm mit den Varianten der Gitterzellengröße von 5 cm konvergiert. Die Varianten BS2 und BS3 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm sind nicht ausreichend valide und haben daher auch bei der Auswertung der Temperaturkurven über die Höhe des Prüfstandes eine deutlich höhere Temperaturabnahme gegenüber den Ergebnissen aus dem Experiment gezeigt.

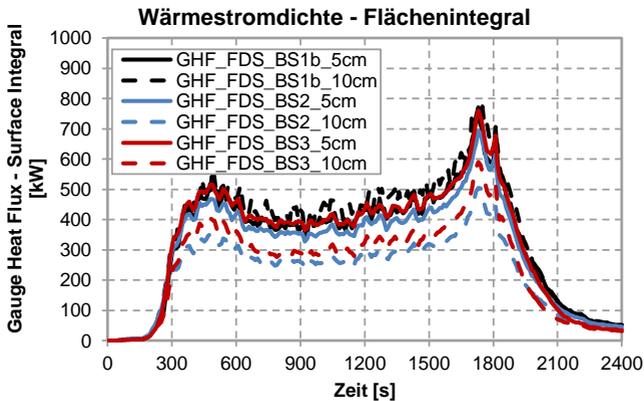


Abbildung 6-12: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) der beanspruchten Prüfwand für die untersuchten Varianten

6.2.4 Fazit

Mit der Simulation des groß skalierten Brandversuchs, näherungsweise gemäß dem BS 8414-1 [19], konnte die Prüffeuervariante BS1b sowohl für eine Gitterzellengröße von 5 cm als auch mit 10 cm unter Berücksichtigung einer kompakten Brandkammer erfolgreich validiert werden. Bei den übrigen Varianten zeigte sich bei den Simulationen, dass das Strömungsverhalten in der Brandkammer und der daraus resultierenden Flammenausbildung nur rechenaufwändig realitätsnah abgebildet werden kann. Aus diesem Grund sind Gitterzellengrößen von 20 cm im groß skalierten Brandversuch mit kompakter Brandkammer als ungeeignet zu bewerten. Aber auch die näherungsweise, wirklichkeitsnahen geometrischen Abmessungen der Holzkrippe gemäß BS3 erreichen bei der Simulation in einer kompakten Brandkammer ihre Grenzen und können erst bei einer sehr „feinen“ geometrischen Diskretisierung mit einer Gitterzellengröße von 5 cm ausreichend valide Ergebnisse bei den Temperaturverläufen zwischen Experiment und Simulation erzielen.

6.3 LEPIR 2 [115]

Zur Validierung der Simulationsmodelle für den Brandversuch gemäß LEPIR 2 [115] werden zwei Kalibrierungsversuche von Efectis France, die durch Dréan in ([46], [47]) veröffentlicht worden sind, verwendet. Die Brandprüfung des LEPIR 2 wird in einem Erlass von 1970 in [115] beschrieben und ist grundsätzlich dann anzuwenden, wenn Außenwandbekleidungen von den technischen Regeln gemäß [6] abweichen. Für den Prüfstand des LEPIR 2 [115] gibt es keine Anforderungen an eine Prüfhalle für den Witterungsschutz. Dadurch ist eine Versuchsdurchführung im Freien möglich, welche dadurch besonders windanfällig ist. Bei ungünstigen Witterungsverhältnissen, wie z. B. Regen oder Schnee, darf der Brandversuch grundsätzlich nicht durchgeführt werden.

In den Veröffentlichungen gemäß ([46], [47]) wurde eine Validierung mit FDS an den Ergebnissen aus den Brandversuchen durchgeführt. Dabei beschränkte sich die Simulation auf eine Simulationsvariante, ähnlich zu den bisher durchgeführten Varianten der Versuchsreihe Var2 gemäß Abschnitt 5.3 und BS2 gemäß Abschnitt 6.2. Eine Konvergenzstudie zur Untersuchung der Gitterzellengrößen wurde in den benannten Veröffentlichungen nicht betrachtet. Aus diesem Grund wird die Validierung der Brandversuche in diesem Kapitel mit der bisherigen Herangehensweise für Holzkippen mittels der Varianten Var1 bis Var3 gemäß Abschnitt 5.3 und Gitterzellenabmessungen von 5, 10 und 20 cm durchgeführt. Die Untersuchungen zum Brandversuch gemäß LEPIR 2 [115] vervollständigen die bisher durchgeführten Simulationen für die Holzkippe gemäß Abschnitt 5.3 und 6.2 durch die Berücksichtigung der Umfassungsbauteile des Prüffeuers als Brandraum für die möglichen Prüfstands-ausbildungen von groß skalierten Brandversuchen zur Prüfung von Außenwandbekleidungen.

6.3.1 Experimentelle Untersuchung

6.3.1.1 Randbedingungen

Die experimentellen Randbedingungen sind, wie bereits zuvor beschrieben, aus den Veröffentlichungen gemäß ([46], [47]) entnommen. Die klimatischen Bedingungen während der Prüfung sind nicht genau bekannt und wurden deshalb mit einer Temperatur $T = 20 \text{ °C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit $\phi = 50 \text{ %}$ angenommen. Gemäß ([46], [47]) wurde beim Brandversuch LPB ein stark böiger Wind beschrieben, welcher deutliche Unterschiede bei den gemessenen Temperaturverläufen gegenüber dem Brandversuch LPA aufweist. Die wesentlichen Versuchsrandbedingungen zu den zwei Brandversuchen LPA und LPB sind in der Tabelle 6-6 dargestellt.

Tabelle 6-6: Versuchsrandbedingungen der Kalibrierungsversuche LPA und LPB ([46], [47])

Klimatische Randbedingungen						
Versuch	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Wind			
LPA	20	50	keine Angaben			
LPB			stark böiger Wind			
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen						
Prüfstand	Position	Innenmaße [m]	Material			
EG	Grundfläche B x L	4,85 x 2,85	Stahlbeton			
	Höhe H	2,5				
	2 x Fenster B x H	1,0 x 1,5	-			
1. OG	Grundfläche B x L	4,85 x 2,85	Stahlbeton			
	Höhe H	2,5				
	2 x Fenster B x H	0,8 x 1,4	Einfachverglasung			
2. OG	Grundfläche B x L	4,85 x 2,85	Stahlbeton			
	Höhe H	1,3				
Lüftungsbedingungen	Zuluft EG B x H	2,8 x 0,3	-			
Prüffeuere						
Holzkrippe (Kiefer)	Maße Krippe b x l x h _c [m]	Maße Stab D x B x l [m]	Masse [kg]	Stab / Luft	H _{u,eff} [MJ/kg]	Zündinitial
Schicht 1	1,0 x 1,0 x 0,63	0,06 x 0,07 x 1,0	2 x 300 kg	1 / 4,17	17,28	Stahlwannen mit einem Heptan- und Ölgemisch
Schicht 2	1,0 x 1,0 x 0,8	0,06 x 0,04 x 1,0		1 / 3,3		
Schicht 3	1,0 x 1,0 x 0,391	0,1 x 0,023 x 1,0		1 / 1,67		
Beanspruchungszeit Kalibrierungsversuche						
30 Minuten						

Im Brandraum des Erdgeschosses sowie in dem darüber liegenden Raum des ersten Obergeschosses sind in der Fotodokumentation gemäß ([46], [47]) Zugangstüren dargestellt. Bei dem vorliegenden Grundriss, der Ansicht und dem Schnitt sind diese nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund werden die zwei Bauwerksöffnungen im Simulationsmodell vernachlässigt, da diese bei geschlossenen Türen einen zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Die Abbildung 6-13 veranschaulicht den Prüfstand als 3D-Visualisierung und stellt die wesentlichen Außenmaße des Prüfstandes dar.

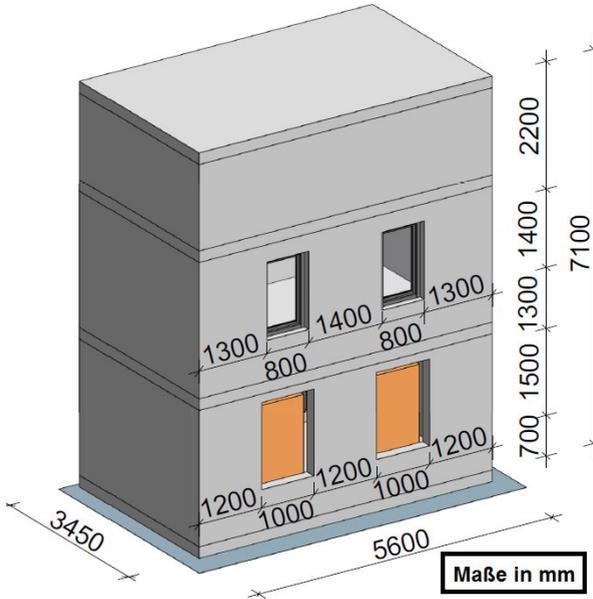


Abbildung 6-13: 3D-Ansicht des Prüfstands gemäß LEPIR 2 [115] mit der Angabe zu den wesentlichen geometrischen Rohbaumaßen

6.3.1.2 Prüffeuer

Das Prüffeuer im Brandversuch wurde durch zwei Holzkrippen mit einer Gesamtmasse von 300 kg pro Krippe gewährleistet. Die Entzündung der Holzkrippen erfolgte durch ein Heptan-Ölgemisch unterhalb der aufgeständerten Krippen. Eine Besonderheit der Holzkrippen im Brandversuch gemäß LEPIR 2 [115] sind die drei unterschiedlichen ausgebildeten Schichten über eine Gesamthöhe von ca. 1,8 m. Dabei nimmt die Porosität der Holzkrippe von unten nach oben mit der jeweiligen Schicht ab, sodass nach Entzündung aufgrund des Stab-Luft-Verhältnisses eine schnelle Brandausbreitung innerhalb der Holzkrippe während der Brandentwicklungsphase vorherrschen kann. In Abbildung 6-14 ist die Krippengeometrie mit Angaben zur Anzahl der Lagen sowie der dazugehörigen Stabanzahl der einzelnen Schichten aus dem Experiment dargestellt. Im Brandversuch gemäß LEPIR 2 [115] wird die Holzkrippe, wie bei den Brandversuchen gemäß MVV TB [107] und BS 8414 [19] aufgeständert, um die Zuluft im Krippenkern, zur Gewährleistung einer besseren Verbrennung, zu erhöhen.

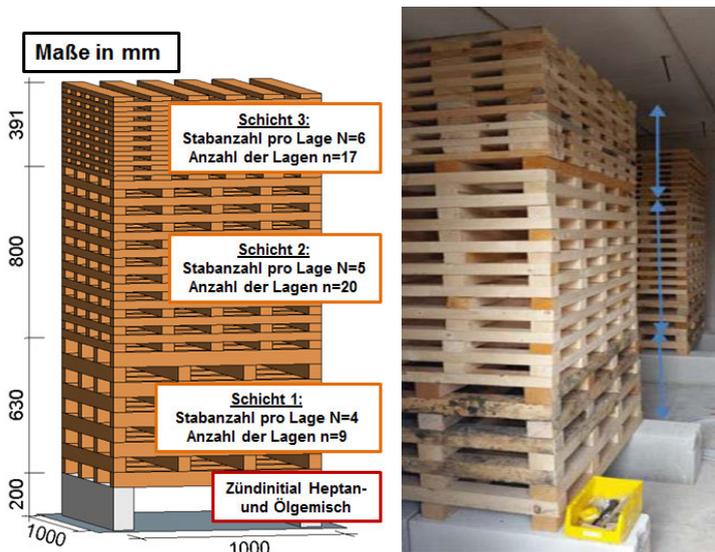


Abbildung 6-14: Darstellung der zwei 300 kg Holzkippen im Brandversuch Exp_LPA und Exp_LPB mit einer zusätzlichen Aufständering auf Mauerwerkssteinen [46]

Bei den Brandversuchen LPA und LPB wurde keine Abbrandwaage zur Messung des Masseverlustes eingesetzt. Äquivalente Messdaten zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates, wie z. B. der Sauerstoffverbrauch oder die Massen- und Volumenströme an der Bauwerksöffnung stehen nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wird ein empirischer Ansatz gemäß Abschnitt 2.5.4 zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates der Holzkippe verwendet. Die Anwendungsgrenzen der vorgestellten Verfahren gemäß Hagen [63] oder BiR ([132], [133]) (vgl. Anlage B) werden, aufgrund der Porosität der Holzkippen, nicht eingehalten, sodass der Berechnungsansatz gemäß SFPE [69] zur Verwendung kommt. In Abbildung 6-15 ist der ermittelte Verlauf der Wärmefreisetzungsrates auf Basis von Anlage B sowie Abschnitt 2.5.4 für eine einzelne 300 kg Holzkippe unter Bestimmung der summierten Wärmefreisetzungsrates für die jeweilige einzelne Schicht der Holzkippe bei einer Branddauer von 1.800 Sekunden dargestellt.

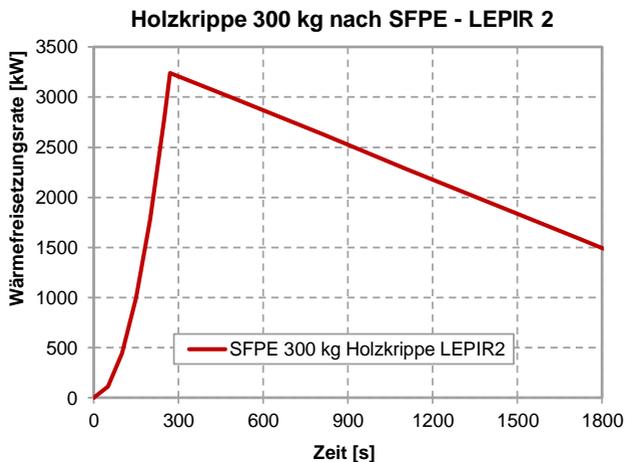


Abbildung 6-15: Wärmefreisetzungsrate der einzelnen Holzkippen im Brandraum des Fassadenprüfstands für die Kalibrierungsversuche LPA und LPB

6.3.1.3 Messdaten

In Abbildung 6-16 ist der Messstellenplan für die Kalibrierungsversuche LPA und LPB vor dem Prüfstand dargestellt. Die Temperaturverläufe vor dem Prüfstand wurden im Brandversuch mit Plattenthermoelementen, gemäß den Ausführungen nach Abschnitt 4.3.1, gemessen. In einem Abstand von 3 m mittig zum Prüfstand wurde durch ein Strahlungsaufnehmer die Strahlungswirkung der Flamme bestimmt. Im Simulationsmodell wurden ergänzend jeweils ein Strahlungsaufnehmer HF1 und HF3 unmittelbar vor den Bauwerksöffnungen vorgesehen. Gemäß ([46], [47]) liegen keine Angaben zum Messintervall vor. Aufgrund der bisherigen Untersuchungen werden diese mit einem Intervall von 10 Sekunden angenommen.

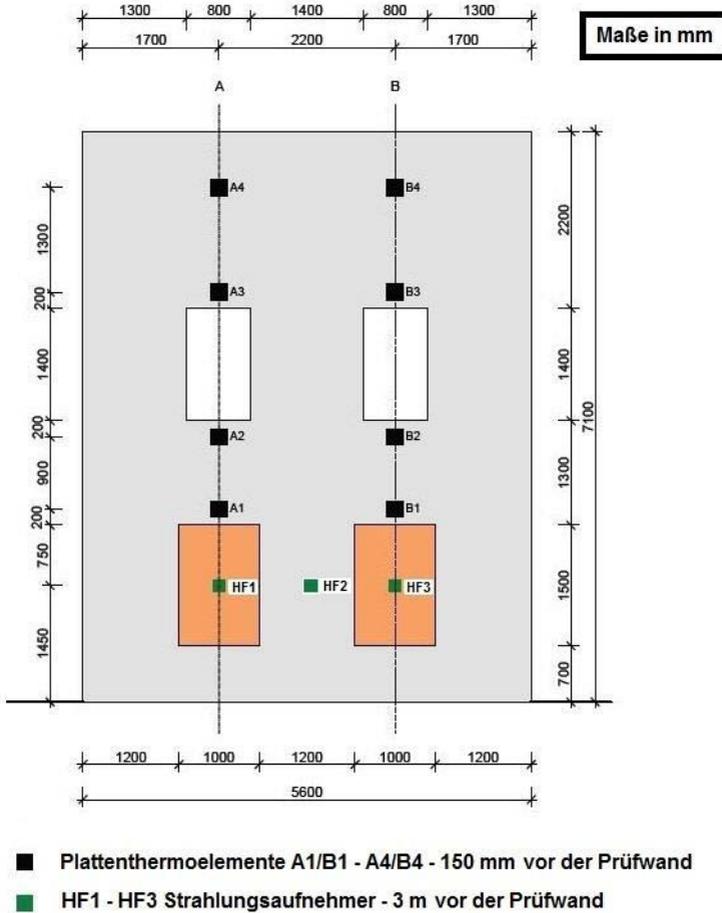


Abbildung 6-16: Messstellenplan der Brandversuche LPA und LPB und für die weiterführenden Untersuchungen mit FDS

6.3.1.4 Versuchsergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse der Temperaturverläufe vor dem Prüfstand an den Messstellen A1/B1-A4/B4 in Abbildung 6-17 differieren zwischen den Brandversuchen LPA und LPB deutlich. In den Versuchen wurden Temperaturunterschiede von bis zu ca. 400 °C gemessen. Beim Brandversuch LPB wurde während des Versuchs ein stark böiger Wind registriert, welcher mit hoher Wahrscheinlichkeit maßgebend für die großen

Temperaturunterschiede bei den Brandversuchen verantwortlich war. Durch die zusätzliche Zuluftöffnung an der Rückseite des Brandraums kann davon ausgegangen werden, dass der Abbrand der Holzkrippe durch eine Querlüftung sowie durch die Flammen oberhalb der Brandraumöffnungen an der Vorderseite des Prüfstands ungünstig beeinflusst wurde.

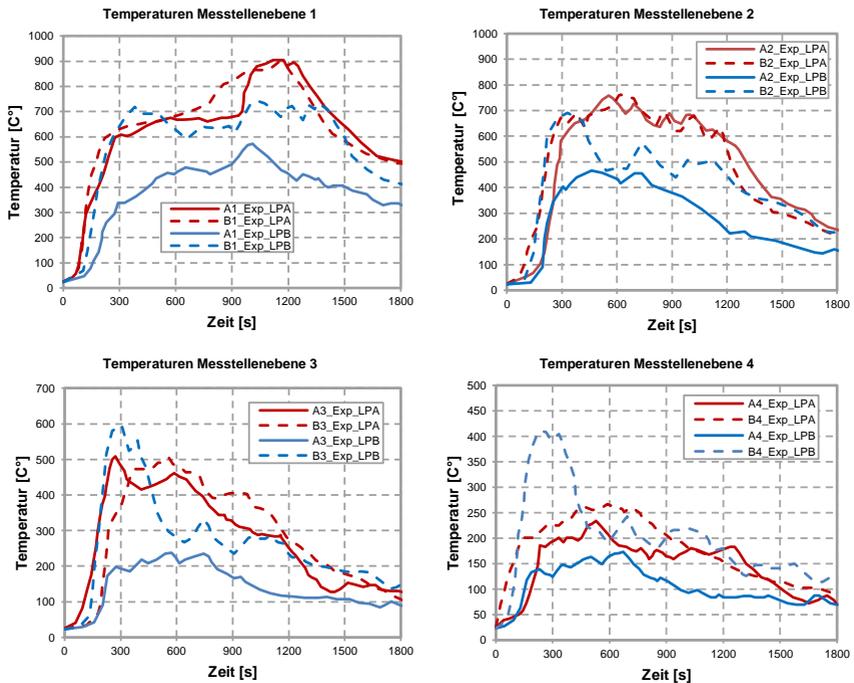


Abbildung 6-17: Gemessene Temperaturverläufe mittels Plattenthermoelementen an den Messebenen 1 bis 4 für die Brandversuche LPA und LPB

Beim Vergleich der Temperaturverläufe zwischen den beiden Brandversuchen wird deutlich, dass sowohl die Holzkrippe als auch die Witterungsbedingungen einen erheblichen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit bei Brandversuchen für Außenwandbekleidungen nehmen können. Hieraus wird ersichtlich, dass die Verwendung einer Holzkrippe als auch der Verzicht auf eine Prüfhalle für den Witterungsschutz hinsichtlich einer notwendigen Reproduzierbarkeit der Brandversuche in Frage zu stellen ist.

Für die Validierung des Simulationsmodells in FDS kann der Brandversuch LPB, aufgrund der vorangegangenen Feststellungen, nicht als Referenzversuch berücksichtigt werden und wird daher aus den nachfolgenden Untersuchungen ausgeschlossen.

In Abbildung 6-18 ist der Verlauf der Wärmestromdichte infolge Strahlung am Messpunkt HF2 für den Brandversuch LPA dargestellt. Ergebnisse zu dieser Messstelle für den Brandversuch LPB sind in den zugrunde gelegten Veröffentlichungen ([46], [47]) nicht aufgeführt.

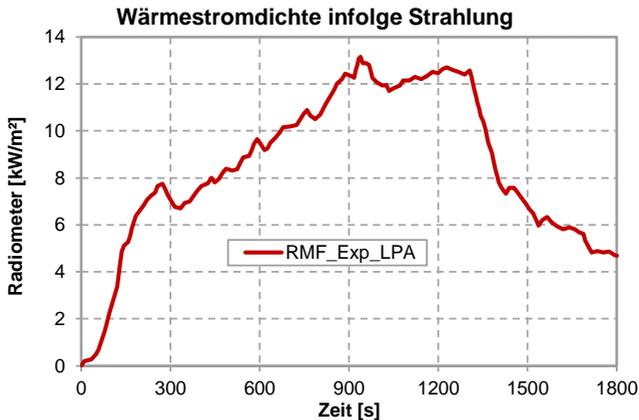


Abbildung 6-18: Gemessene Wärmestromdichten infolge Strahlung über Strahlungsaufnehmer HF2 im Abstand 3 m vor der Prüfwand mittig zwischen den jeweiligen Bauwerksöffnungen im EG bei einer Höhe von ca. 1,45 m

Der Verlauf zeigt, wie in den Auswertungen zu den Brandversuchen gemäß MVV TB [107] in Kapitel 5.3 bereits festgestellt, dass mit zunehmender Branddauer die Brandintensität infolge Strahlung deutlich zunimmt. Gleichzeitig nimmt die bestimmte Wärmefreisetzungsrate nach Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate ab ca. der 300 Prüfsekunde kontinuierlich wieder ab. Die ausführliche Begründung dazu kann den Abschnitten 2.5 und 5.3 entnommen werden.

6.3.2 Numerische Untersuchung

6.3.2.1 Geometrie

Der Prüfstand wird in FDS auf Grundlage der experimentellen Vorgaben, entsprechend der Abbildung 6-13 sowie der Tabelle 6-6, modelliert und ist in Abbildung 6-19 dargestellt.

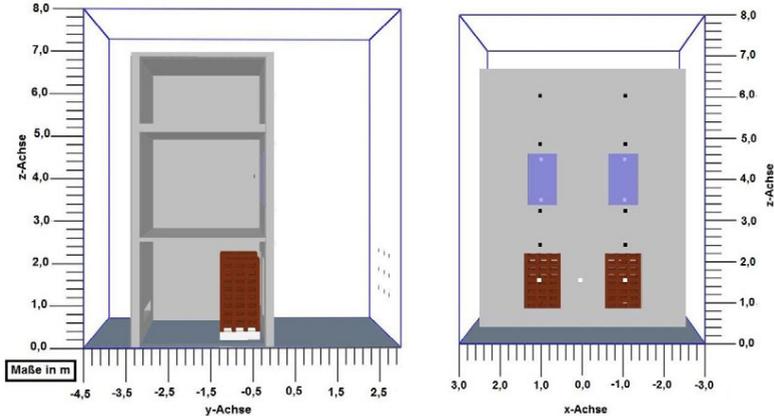


Abbildung 6-19: Geometrische Darstellung der Brandversuche LPA und LPB in FDS

6.3.2.2 Gitternetz

Die mittlere Wärmefreisetzungsrate während der Vollbrandphase ab der 270. bis zur 1.500. Prüfsekunde beträgt 2.611 kW pro Holzkrippe. Der Ansatz, die insgesamt im Brandraum freigesetzte Wärmefreisetzungsrate zur Bestimmung des charakteristischen Branddurchmessers D^* heranzuziehen, ist für die Simulation aufgrund der großen Abstände der Holzkippen untereinander sowie der notwendigen lokalen Diagnostik oberhalb der jeweiligen Brandraumöffnungen nicht zielführend. Somit wird der charakteristische Branddurchmesser D^* unter Betrachtung einer einzelnen Holzkrippe mit $D^* = 1,41$ bestimmt.

Die Tabelle 6-7 fasst die wesentlichen Kenngrößen der Gitternetzstruktur des Simulationsmodells zusammen. Auf Basis der Erkenntnisse gemäß Kapitel 4 und 5 ist bei einem Verhältnis $D^*/dx = 14,1$ mit einer Gitterzellengröße von 10 cm näherungsweise eine ausreichende Validität zwischen der Simulation und dem Experiment zu erwarten. Eine Konvergenzstudie mit den Gitterzellengrößen 5, 10 und 20 cm wird unabhängig von dieser Erkenntnis durchgeführt.

Tabelle 6-7: Zusammenfassung der relevanten Parameter der Gitterzellengrößen auf Grundlage des charakteristischer Branddurchmesser D^* für den Brandversuch nach LEPIR2

Gitterzellengröße [cm]	Rechengebiet L x B x H [m]	Gesamtanzahl Zellen	Netzberechnung D^*/dx
20	6,0 x 7,4 x 8,0	44.400	7,1
10	6,0 x 7,5 x 8,0	360.000	14,1
5	6,0 x 7,5 x 8,0	2.880.000	28,2

6.3.2.3 Simulation Prüffeuier

Die vier Varianten für das Prüffeuier werden entsprechend der Abbildung 6-20 analog den Untersuchungen für die Holzkrippe der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] in Abschnitt 5.3 simuliert. Hieraus sollen die notwendigen Erkenntnisse zum Einfluss der Brandraumgeometrie auf das Prüffeuier bzgl. der unterschiedlichen Prüffeuieransätze erzielt werden.

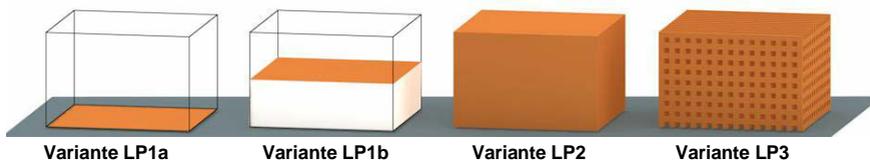


Abbildung 6-20: Darstellung der Modellierungsvarianten für den Ansatz der Wärmefreisetzungsrate in FDS

Die Tabelle 6-8 stellt die geometrischen Randbedingungen und die dazugehörigen angesetzten flächenbezogenen Wärmefreisetzungsraten für die Varianten der Holzkrippe zusammen. Die Bestimmung der Eingabedaten entspricht der Herangehensweise aus den Untersuchungen zum Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] in Abschnitt 5.3.

Aufgrund der Umfassungsgeometrie der Holzkrippe mit den Abmessungen $b \times l \times h_c = 1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$ unterscheiden sich die Eingabedaten bei den unterschiedlich angesetzten Gitterzellengrößen untereinander nicht.

Die Variante LP3 ist aufgrund der geometrischen Randbedingungen der Holzkrippengeometrie für eine Gitterzellengröße von 20 cm nicht anwendbar. Für die Gitterzellengrößen von 5 und 10 cm werden die Geometrien der einzelnen Stäbe an die Gittergrößen angepasst.

Als Eingabeparameter für die Verbrennung von Holz werden die Daten in Abschnitt 5.3 aus der Tabelle 5-9 verwendet. Der Strahlungsanteil der Wärmefreisetzungsrate (RADIATIVE_FRACTION) wird mit $\chi_r = 0,25$ festgelegt.

Tabelle 6-8: FDS Eingabedaten der maximalen, flächenspezifischen Wärmefreisetzungsraten der unterschiedlichen Simulationsvarianten für den Brandversuch LPA

Gitterzellen- größe	Variante LP1a/-b			Variante LP2			Variante LP3		
	A _{grund} [m ²]	Max. qaG [kW]	Max. HRRPUA [kW/m ²]	A _{oben+Seite} [m ²]	Max. qaA [kW/m ²]	Max. HRRPUA [kW/m ²]	A _{stab} [m ²]	Max. qaG [kW]	Max. HRRPUA [kW/m ²]
20 cm	1,00	3239	3239	8,2	395	130%:514 70 %: 277	–		
10 cm							24,6	3239	131,5
5 cm									

6.3.2.4 Verwendete Materialien

Die materialspezifischen Angaben für die Eingabe in FDS können der Tabelle 6-9 entnommen werden. Für das Glasbauteil wird der Emissionsgrad der Heißbemessungsnorm gemäß EC 1-1-2 [37] angesetzt. In Tabelle 6-6 sind alle Materialzuweisungen für die einzelnen Bauteile dargestellt.

Tabelle 6-9: Materialspezifische Eigenschaften für die Eingabe in FDS

Material	Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m ³]	Emissions- grad [-]
Beton*	0,9	1,64	2.100	0,7**
Glasbauteil*	1,0	0,75	2.500	0,8**
Plattenthermoelement*	0,44	14,9	8.470	0,85***
Wärmedämmung Plattenthermoelement*	1,13	0,06	128	0,9***

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS und ggf. temperaturabhängiger Materialeigenschaften sowie Quellennachweise s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

*** Emissionsgrad - Empfehlung für die Simulation von Plattenthermoelementen gemäß FDS-USER Forum - Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS s. Anlage F

6.3.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der einzelnen Varianten im Vergleich zum Brandversuch LPA vorgestellt. Dabei werden die Temperaturen an den ausgewiesenen Messstellen gemäß Abbildung 6-16 untersucht. Die Flammene Ausbildung und das Flächenintegral der einwirkenden Wärmestromdichte auf den Prüfstand werden ergänzend für die Validierungsstudie zum Nachweis berücksichtigt. Auf die Darstellung der Ergebnisse der Variante LP1b wird im Folgenden zur besseren Übersicht verzichtet, da diese weitestgehend mit den Ergebnissen der Variante LP1a übereinstimmen.

6.3.3.1 Temperaturen

Beim Nachweis der Temperaturen wurde, aufgrund der zum Teil sehr ähnlichen Simulationsergebnisse, insbesondere zur Variante LP2 und LP3, für die quantitative Differenzierung die L_2 -Norm-Methodik als nachvollziehbares und vor allem als übersichtliches Hilfsmittel zur Auswertung angewendet. In der Tabelle 5-8 sind die Ergebnisse für die Varianten LP1a, LP2 und LP3 bei einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm an den Messstellen A1-B1/A4-B4 unter Berücksichtigung der Abweichungen zum Brandversuch LPA zusammengefasst. Auf die Darstellung der Ergebnisse aus den Simulationen mit einer Gittergröße von 20 cm wird, aufgrund der großen Abweichungen, verzichtet. Ergänzend zum Einzelnachweis der Messstellen wurde für jeden Simulationsversuch der Mittelwert aus den Ergebnissen für die L_2 -Norm der gesamten Messstellen als Referenzwert ermittelt.

Tabelle 6-10: Auswertungen der Messstellen der Messebene 1 bis 4 zwischen den experimentellen Ergebnissen aus dem Brandversuch LPA und den Simulationsergebnissen der Variante LP1a, LP2 und LP3 mittels L_2 -Norm-Methodik

	L_2-Norm – Vergleich zwischen Exp_Mittel und Simulation Beanspruchungszeit 0 bis 1.800 Sekunden				
	Achse A1+B1	Achse A2+B2	Achse A3+B3	Achse A4+B4	Σ Mittelwerte
FDS_LP1a_5cm	0,27	0,30	0,38	0,35	0,32
FDS_LP1a_10cm	0,27	0,26	0,32	0,36	0,30
FDS_LP2_5cm	0,15	0,16	0,16	0,29	0,19
FDS_LP2_10cm	0,14	0,24	0,14	0,38	0,23
FDS_LP3_5cm	0,24	0,15	0,10	0,40	0,22
FDS_LP3_10cm	0,23	0,17	0,13	0,37	0,23

Die Auswertung zur L_2 -Norm zeigt eine deutliche Übereinstimmung zwischen den Simulationsvarianten LP2 und LP3 unter Betrachtung der Mittelwerte untereinander auf, wobei die Simulationsergebnisse der Variante LP1a hinsichtlich der Mittelwerte im Vergleich dazu deutlicher abweichen.

Entscheidend neben dem Mittelwert ist vor allem die lokale Diagnostik an den Messebenen 1 und 2, da in diesen Bereichen die höchsten Temperaturen gemessen wurden und somit auch die am höchsten beanspruchten Bereiche der Prüfwand liegen. Dabei wird in Messebene 1 eine größere Validität durch die Variante LP2 und dem gegenüber in Messebene 2 eine größere Validität durch die Variante LP3 zwischen Experiment und Simulation erreicht. Problematisch bei der quantitativen Auswertung nach der L_2 -Norm ist die nur schwer daraus abzuleitende qualitative thermische Beanspruchung der Prüfwand über die Prüfzeit im Vergleich zwischen Experiment und Simulation. Aus diesem Grund werden im

zweiten Schritt die bestimmten Mittelwerte aus den Temperaturverläufen für die einzelnen Messstellen aus den Simulationsvarianten den Ergebnissen aus dem Experiment in Tabelle 6-11 gegenübergestellt. Zusätzlich wurde der Mittelwert der einzelnen Versuche zusammenfassend für alle Messstellen des jeweiligen Versuchs bestimmt.

Tabelle 6-11: Mittelwerte der Temperaturbeanspruchung für die Ergebnisse aus Experiment und Simulation für eine Beanspruchungszeit von 0 bis 1.800 Sekunden

	Mittelwert T [°C] Beanspruchungszeit 0 bis 1.800 Sekunden				
	Achse A1+B1	Achse A2+B2	Achse A3+B3	Achse A4+B4	Σ Mittelwerte
Exp_Mittel	636	486	284	160	392
FDS_LP1a - 5 cm	524	354	175	116	292
FDS_LP1a - 10 cm	518	371	189	116	299
FDS_LP2 - 5 cm	604	515	251	159	382
FDS_LP2 - 10 cm	597	526	296	187	402
FDS_LP3 - 5 cm	519	474	293	177	366
FDS_LP3 - 10 cm	531	474	274	169	362

Aus den Ergebnissen gemäß Tabelle 6-11 wird deutlich, dass eine deutliche Übereinstimmung durch die Simulationsvariante LP2 mit dem Experiment erzielt wird. Dabei werden die vorherrschenden gemittelten Temperaturen bei einer Gitternetzgröße von 5 cm um 10 °C unterschätzt und bei einer Gitternetzgröße von 10 cm um 10 °C überschätzt.

Insgesamt betrachtet sind die Ergebnisse der Variante für beide Gitterzellengrößen als ausreichend valide im Bezug zum Experiment zu bewerten, wobei mit einer Gitterzellengröße von 10 cm und einer Rechendauer von ca. 120 Stunden deutlich verkürzte Rechenzeiten gegenüber der Variante mit einer Gitterzellengröße von 5 cm und einer Rechendauer von ca. 2496 Stunden bei Verwendung der OpenMP-Version von FDS erzielt wurden.

Insgesamt wird für die Simulation des Brandversuchs gemäß LEPIR 2 [115] die Variante LP2 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm als ausreichend valide angesehen und die erhöhte Temperaturbeanspruchung gegenüber dem Experiment auf der sicheren Seite liegend betrachtet. Die Abbildung 6-21 zeigt die Ergebnisse für die Temperaturverläufe für den Simulationsversuch LP2 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm gegenüber den Temperaturverläufen des Brandversuch LPA.

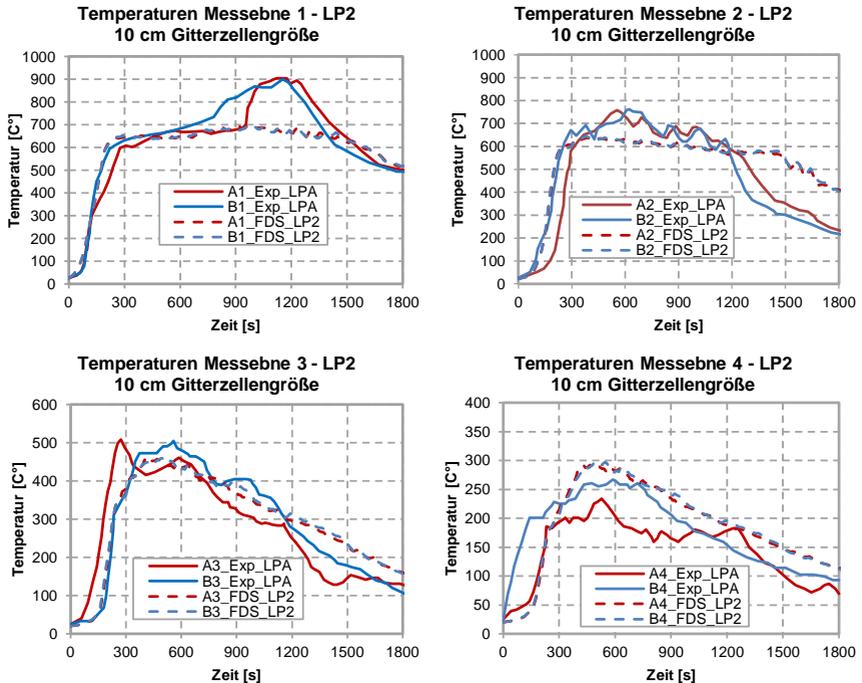


Abbildung 6-21: Temperaturverläufe gemessen mittels Plattenthermoelemente in den Messebenen 1 bis 4 für den Brandversuch LPA und der Simulationsvariante LP2 bei einer Gitterzellengröße von 10 cm

6.3.3.2 Flammenausbildung

Die Abbildung 6-22 stellt die Flammenausbildung der Simulationsvariante LP2 für die untersuchte Gitterzellengröße der zu erwartenden Flammenausbildung beim Brandversuch gemäß LEPIR 2 [115] gegenüber. Im Experiment sowie in der Simulation der Varianten LP2 und LP3 erreichen die Flammen zu Beginn der Vollbrandphase eine Höhe über den Braundraumsturz von ca. 3,0 m.

Bei der Auswertung zu den Flammenbildern zeigten sich keine wahrnehmbaren Unterschiede zwischen der Variante LP2 und LP3. Zwischen den einzelnen Gitterzellengrößen differierte die Darstellung der Flammenauflösung, jedoch hatte dies keine Auswirkung auf die Flammenhöhe und nur sehr geringfügige Auswirkungen auf die Temperaturverläufe. Bei der Variante LP1a und LP1b konnte bei der Simulation beobachtet werden, dass die Flamme gegenüber den Varianten LP2 und LP3 von der Prüfwand weiter abrückt, weshalb geringere Temperaturverläufe an den einzelnen Messstellen auftraten.

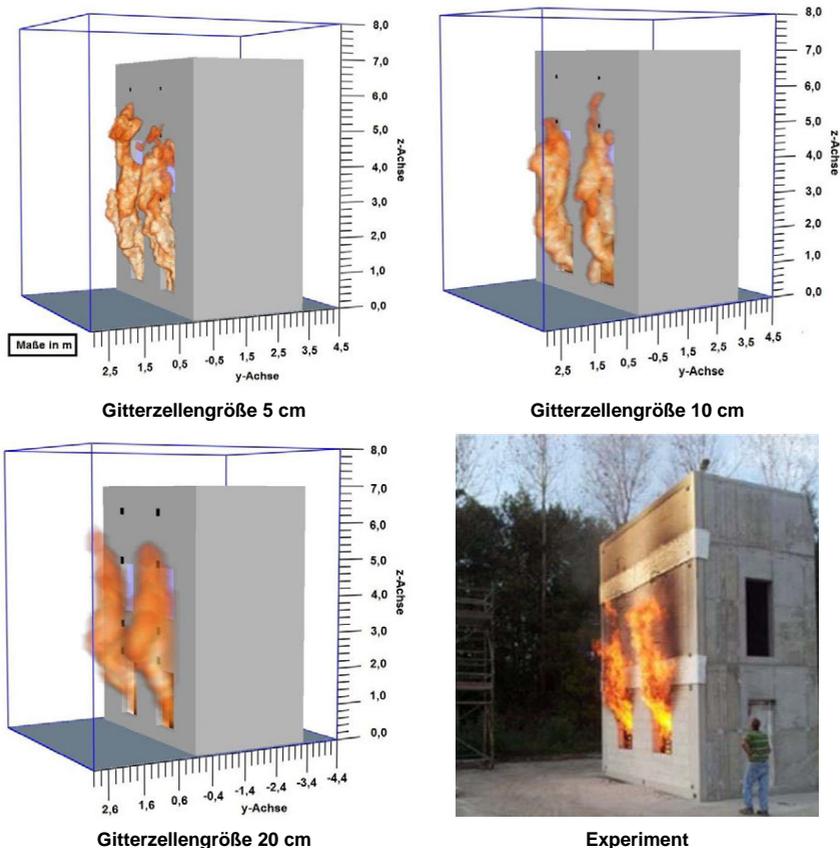


Abbildung 6-22: Darstellung der Flammenausbildung während ca. der 300. Prüfsekunde der Simulationsvariante LP2 mit einer Gitterzellengröße von 5, 10 und 20 cm gegenüberstellt dem Flammenbild aus einen Brandversuch gemäß LEPIR 2 [115] veröffentlicht in [47]

6.3.3.3 Wärmestromdichten

Als letztes Untersuchungsmerkmal für die Validierung werden die einwirkenden Wärmestromdichten infolge Strahlung und Konvektion auf die Prüfwand auf Grundlage des Flächenintegrals der Varianten LP1a, LP2 und LP3 für die Gitterzellengrößen 5 und 10 cm ausgewertet. Die Abbildung 6-23 stellt den Verlauf über eine Prüfzeit von 1.800 Sekunden dar. Der ausgewiesene Kurvenverlauf berücksichtigt nicht die Wärmestromdichte in der Ebene der Bauwerksöffnungen im ersten Obergeschoss, da die Bestimmung nur auf Oberflächen von Bauteilen für den Wärmestrom infolge Strahlung und Konvektion ermittelt

werden kann. Die Berücksichtigung der einwirkenden Wärmestromdichte auf die Fensterflächen ist grundsätzlich auch nicht repräsentativ für die Einwirkung auf eine zu prüfende Außenwandbekleidung im Brandversuch.

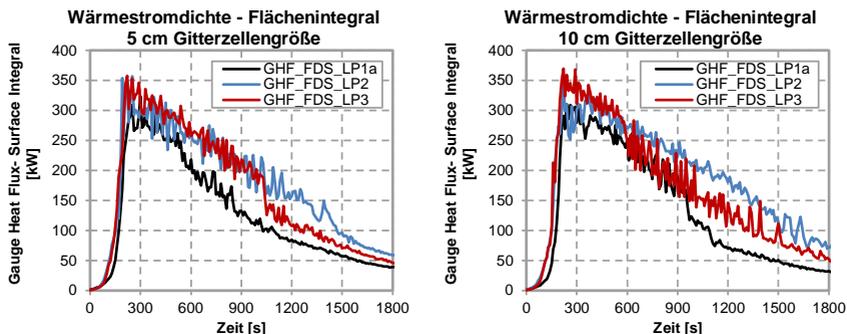


Abbildung 6-23: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) der beanspruchten Prüfwand für die Variante LP1a, LP2 und LP3

Die Verlaufskurven bestätigen die bisherigen Ergebnisse aus den Temperatúrauswertungen. Demnach erfolgt der höchste Energieeintrag in die vertikale Fläche der Prüfwand von 345,4 MJ durch die Variante LP2 mit einer Gitterzellengröße von 10 cm unter Berücksichtigung einer Beanspruchungszeit von 1.800 Sekunden.

6.3.4 Fazit

Bei der Validierungsstudie zum Brandversuch gemäß LEPIR 2 ist es gelungen, auf Grundlage des empirischen Berechnungsverfahrens zur Bestimmung der Wärme-freisetzungsrates von Holzkrippen gemäß SFPE-Handbook [69] ausreichend valide Simulationsmodelle zu bestimmen. Dabei konnte sowohl unter Berücksichtigung der Simulationsvariante LP2 als auch bei der Variante LP3 für Gitterzellengrößen von 5 und 10 cm eine ausreichende Übereinstimmung zwischen dem Experiment und der Simulation unter Berücksichtigung der Anordnung der Holzkrippen in einem Brandraum erzielt werden.

Die experimentellen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass ungünstige Windströmungen wesentlichen Einfluss auf die thermische Beanspruchung der Außenwand nehmen können. Hieraus wird deutlich, dass auch bei groß skalierten Brandversuchen eine Strömungseinwirkung auf den Fassadenprüfstand infolge Wind zur Gewährleistung einer ausreichenden Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit zu vermeiden ist.

6.4 SP FIRE 105 [120]

Der zugrunde gelegte Brandversuch gemäß SP FIRE 105 [120] für die nachfolgenden numerischen Untersuchungen ist der Brandversuchsreihe von Evergren et al. [54] entnommen worden. Ergänzende Hinweise zum Brandversuch finden sich in der numerischen Untersuchung zum Brandversuch aus der Validierungsstudie von Nilsson [109]. Diese werden im Zuge der Untersuchungen zusätzlich berücksichtigt.

Der groß skalierte Brandversuch gemäß SP FIRE 105 [120] dient zur Prüfung von Außenwandbekleidungen und soll das Brandszenario eines Raumbrandes, analog den Erläuterungen in Abschnitt 2.2.1, abdecken.

6.4.1 Experimente Untersuchung

6.4.1.1 Randbedingungen

Der Brandversuch gemäß [54] wurde in einer witterungsunabhängigen, ausreichend dimensionierten Prüfhalle durchgeführt. Dabei wurde der Brandrauch während der Prüfung durch einen Industriekalorimeter maschinell abgeführt und messtechnisch analysiert.

Der dem Brandversuch zugrunde gelegte Prüfstand gemäß SP FIRE 105 [120] berücksichtigt repräsentativ drei simulierte Geschosse eines Gebäudes und ist in der Abbildung 6-24 dargestellt. Das untere Brandgeschoss wird skaliert als Brandkammer mit einer horizontalen Brandkammeröffnung und einem Sturz abgebildet. Zur Konzentration der ausströmenden Heißgase ist die Brandkammeröffnung seitlich gegenüber der gesamten Brandkammerbreite verjüngt. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Luftzufuhr zur Verbrennung des Brennstoffs Heptan ist im Bodenbereich rückseitig des Prüffeuers zusätzlich eine horizontale Zuluftöffnung angeordnet.

Über der Brandkammer befinden sich zwei repräsentative Vollgeschosse mit einer Höhe von 2 x 2,7 m Höhe und jeweils einer ausgesparten Öffnung zur Simulation einer Fensteröffnung. Als oberer Abschluss des Prüfstandes dient eine Stahltragplatte zur Simulation einer Traufe eines Gebäudes. (vgl. Abbildung 6-24). Die Tabelle 6-12 fasst die wesentlichen Randbedingungen des Brandversuchs zusammen. Aufgrund der fehlenden Angaben zum Raumklima wurden eine Umgebungstemperatur von $T = 20 \text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchte von $\phi = 50 \text{ %}$ angenommen.

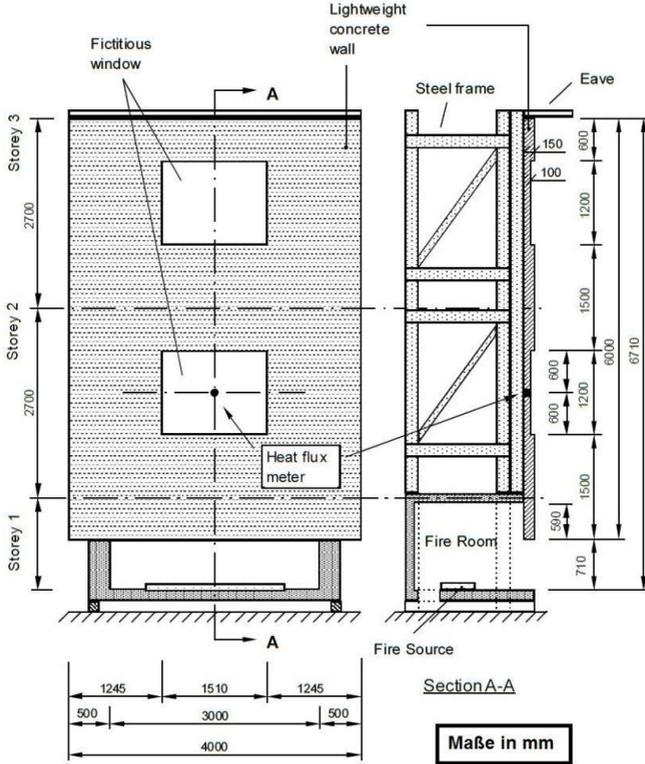


Abbildung 6-24: Ansicht und Schnitt des Prüfstands gemäß SP FIRE 105 [120]

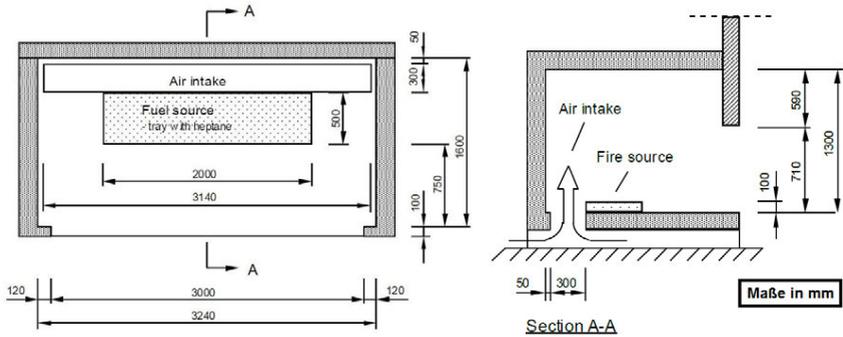


Abbildung 6-25: Draufsicht und Schnitt der Brandkammeröffnung gemäß SP FIRE 105 [120]

Bei dem hier betrachteten Brandversuch gemäß Evergren et. al. [54] wurde die Prüfwand aus Leichtbeton zusätzlich mit einer 10 mm dicken Kalziumsilikatplatte bekleidet, sodass die Öffnungen des Prüfstands gemäß SP FIRE 105 [120] oberhalb der Brandkammeröffnung während der Prüfung vollständig verschlossen waren.

Tabelle 6-12: Zusammenfassung Versuchsrandbedingungen des Brandversuch gemäß Evergren et al. [54]

Klimatische Randbedingungen				
Versuch	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Wind	
SP	20	50	Keine Angaben	
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen				
Bauteil		Innenmaße [m]	Material	
Brandkammer	Grundfläche B x L	3,24 x 1,6	Leichtbeton	
	Höhe H	1,3		
	Öffnung B x H	3,0 x 1,3	-	
Prüfwand	Untergrund B x H	4,0 x 6,0	Leichtbeton	
	Bekleidung B x H	3,75 x 6,0	Kalziumsilikatplatten	
Lüftungsbedingungen	Zuluft (horizontal von unten) B x L	3,14 x 0,3	-	
	Abluft Kalorimeter	ohne Angabe	-	
Prüffeuer				
	B x L [m]	Volumen [Liter]	H_{u,eff} [MJ/kg]	Zündinitial
Poolfeuer (Heptan)	2 x (1,0 x 0,5)	60	44,56	Pilotflamme
Beanspruchungszeit Brandversuch				
15 Minuten				

In der Abbildung 6-26 ist der Brandversuch vor und nach der Prüfung dargestellt. Auf den Bildern ist zu erkennen, dass am Prüfstand beim Brandversuch keine Traufe als oberer Abschluss des Prüfstands vorgesehen wurden.

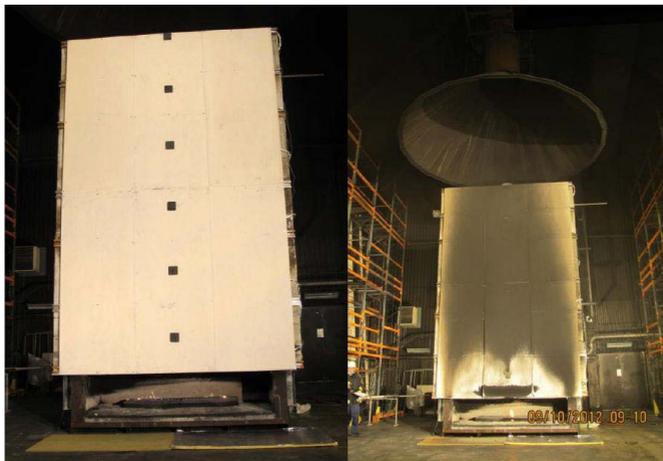


Abbildung 6-26: Ansicht des Prüfaufbaus vor dem Brandversuch links und nach dem Brandversuch rechts [109]

6.4.1.2 Prüffeuere

Das Prüffeuere im Brandversuch wurde durch zwei mit jeweils 30 Litern Heptan gefüllte Stahlwannen mit den jeweiligen Abmessungen $B \times L \times H = 1,0 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$ in der Brandkammer platziert. Bevor die Befüllung mit Heptan erfolgte, wurden die Wannen jeweils mit ca. 10 Liter Wasser befüllt. Die Befüllung mit zusätzlichem Wasser dient gemäß [120] zur Anhebung des Heptans unterhalb des Lochgitters sowie als Ausgleich von Bodenunebenheiten. Auf das Wasser und den insgesamt 60 Liter Heptan wurde als oberer Abschluss der Wannen jeweils ein Lochblech mit einer Dicke von 20 mm vorgesehen (vgl. Abbildung 6-27).

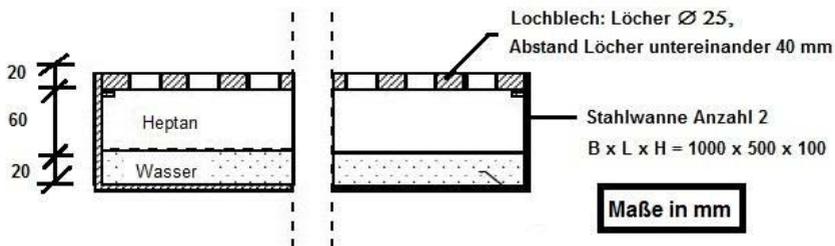


Abbildung 6-27: Poolfeuerausführung als Prüffeuere im Brandversuch gemäß Evergren et al. [54]

Die Abbildung 6-28 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate während der Brandprüfung. Aus den Erkenntnissen gemäß Abschnitt 2.5.5 und dem Brandversuch gemäß Abschnitt 5.4

zeigt sich ein deutlich veränderter Verlauf hinsichtlich der Brandentwicklungs- und der Vollbrandphase.

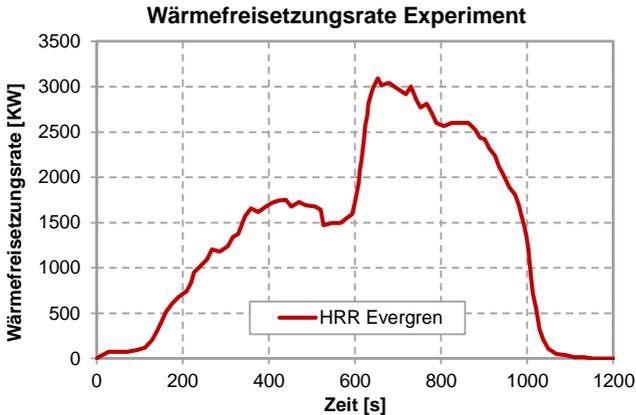


Abbildung 6-28: Wärmefreisetzungsrate der Poolfeuers während des Brandversuchs [54]

In [54] wird der Flashover ab ca. der 600 Prüfsekunde mit dem Sieden des Heptans begründet. Des Weiteren sind die Abdeckung durch die Lochbleche der jeweiligen Wannen sowie die unzureichende Kühlung weitere Begründungen für das Auftreten des veränderten Verlaufs für die Wärmefreisetzungsrate. Der deutlich geringere Anstieg der Wärmefreisetzungsrate während der Brandentwicklungsphase gegenüber den bisher vorgestellten Poolfeuern (z. B. nach Abschnitt 2.5.5) lässt sich hauptsächlich durch die Abdeckung der Wannen mit dem Lochblech und den daraus resultierenden reduzierten Rückstrahlungseffekten der Flamme gegenüber einer offenen Wanne begründen.

6.4.1.3 Messdaten

Beim Brandversuch wurden insgesamt sechs Plattenthermoelemente oberhalb der Brandkammer entlang Achse A angeordnet. Die Plattenthermoelemente mit den Abmessungen $B \times H = 0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ wurden bündig in die applizierte Kalziumsilikatplatte positioniert. Zusätzlich wurde im Abstand von 0,05 m zu den einzelnen Plattenthermoelementen jeweils ein Thermoelement vom Typ K mit einem Durchmesser von 0,5 mm angeordnet. Der Abstand der Thermoelemente zur Prüfwand beträgt 0,05 m. Die Abbildung 6-29 stellt die genaue Anordnung der Temperaturmessstellen dar. Durch den Industriekalorimeter oberhalb des Prüfstandes wurde durch Analyse des Sauerstoffverbrauchs und der Volumenströme die Wärmefreisetzungsrate bestimmt. Die Temperaturen im Bereich des Prüfstands wurden in einem Messintervall von 30 Sekunden gemessen.

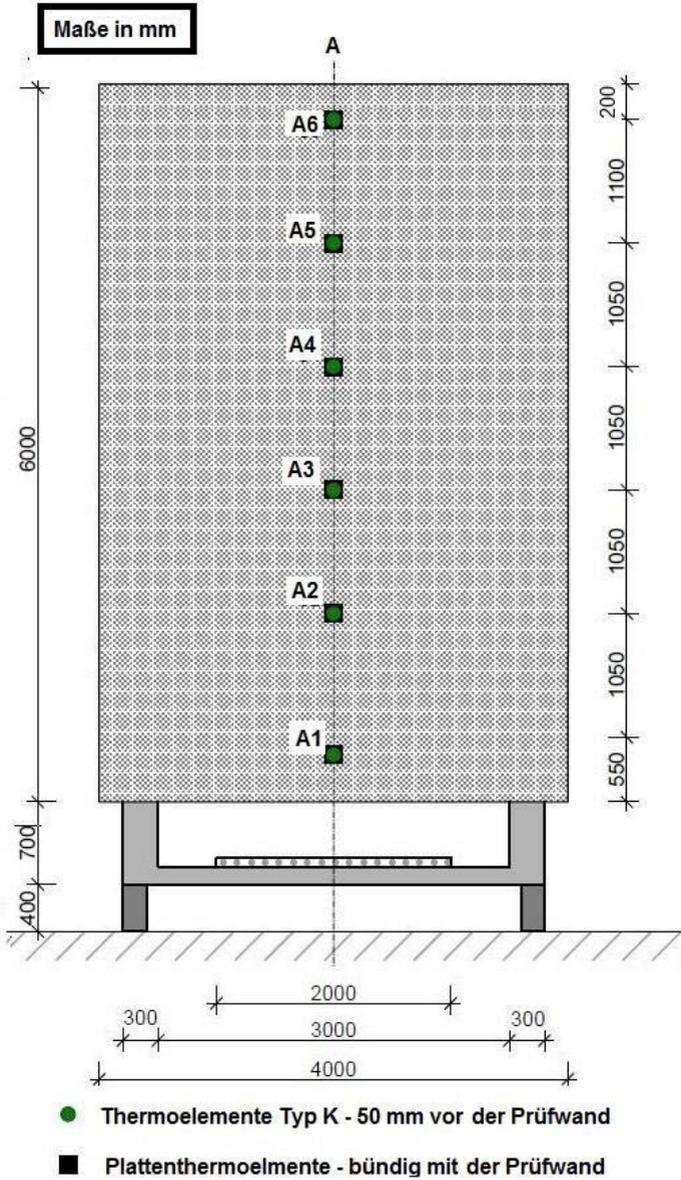


Abbildung 6-29: Messstellenplan für den Brandversuch gemäß Evergren [54]

6.4.1.4 Versuchsergebnisse

Die Abbildung 6-30 stellt die Temperaturverläufe der Plattenthermoelemente und der Thermoelemente Typ K aus dem Brandversuch gegenüber. Dabei zeigen die Temperaturverläufe der Thermoelemente gegenüber den Plattenthermoelementen zum Teil höhere sowie grundsätzlich inkonstantere Werte über die Zeit auf. Bei den Thermoelementen wurde die Messung der Temperaturen an der Messstelle A1 ab der ca. 800. Prüfsekunde und bei der Messstelle A2 ab der ca. 1.000. Prüfsekunde abgebrochen.

Die Temperaturen nähern sich sowohl bei den aufgenommenen Messdaten aus den Plattenthermoelementen als auch bei den Thermoelementen mit zunehmender Höhe dem qualitativen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate an.

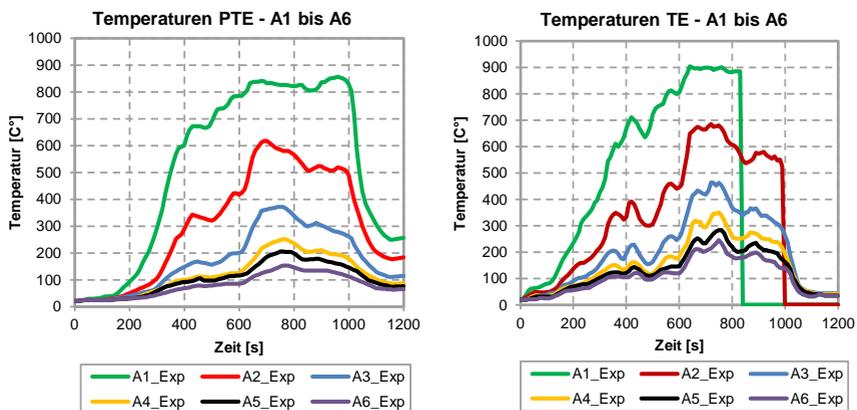


Abbildung 6-30: Temperaturverläufe an den Messstellen für die Plattenthermoelemente (PTE) links und der Thermoelemente (TE) rechts aus dem Brandversuch gemäß Evergren et al. [54]

6.4.2 Numerische Untersuchung

6.4.2.1 Geometrie

Der Prüfstand wird in FDS auf Grundlage der experimentellen Vorgaben, entsprechend der Abbildung 6-24 und der Abbildung 6-25 sowie der Tabelle 5-1, modelliert und ist in Abbildung 6-31 dargestellt.

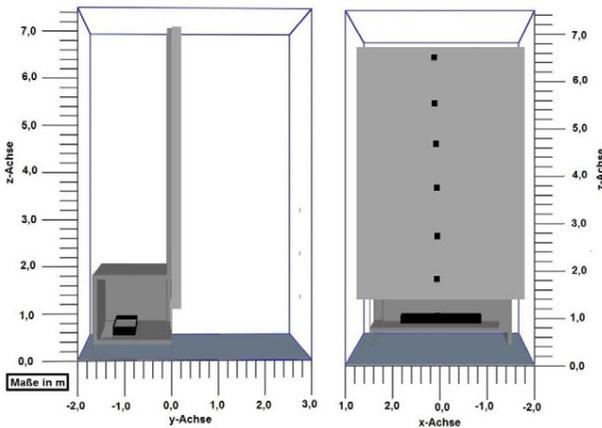


Abbildung 6-31: Geometrische Darstellung des Brandversuchs in FDS ohne Berücksichtigung der Prüfhalle

6.4.2.2 Gitternetz

Die Vollbrandphase beim Brandversuch lässt sich gemäß Abbildung 6-28 in zwei Brandphasen aufteilen. Dabei wird die erste Brandphase mit Beginn der Vollbrandphase in der 300. Prüfsekunde bis zum Eintreten des Flashovers zur 600. Prüfsekunde berücksichtigt. Hierbei beträgt die mittlere Wärmefreisetzungsrate für die erste Brandphase 1.593 kW. Die zweite Brandphase berücksichtigt den Zeitpunkt zwischen der 600. bis 900. Prüfsekunde. Während des Zeitintervalls beträgt die mittlere Wärmefreisetzungsrate in dieser Brandphase 2.713 kW. Der ermittelte charakteristische Branddurchmesser ergibt sich für die Brandphase 1 somit zu $D^* = 1,16$ und für die Brandphase 2 zu $D^* = 1,43$.

Die Tabelle 6-13 fasst die wesentlichen Kenngrößen der Gitternetzstruktur des Simulationsmodells zusammen. Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse aus den Validierungsversuchen ist für die Brandphase 1 bei einem Verhältnis $D^*/dx = 11,6$ mit einer Gitterzellengröße von 10 cm ggf. eine nicht ausreichende Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment zu erwarten. Aus diesem Grund können die Temperaturen bei dieser Gitterzellengröße höher abweichen als gegenüber der Variante mit einer

Gitterzellengröße von 5 cm. Die Konvergenzstudie wird grundsätzlich nach dem bisherigen Vorgehen bei den Validierungsuntersuchungen mit den Gitterzellengrößen 5, 10 und 20 cm durchgeführt.

Tabelle 6-13: Zusammenfassung der relevanten Parameter der Gitterzellengrößen auf Grundlage des charakteristischen Branddurchmessers D^* für den Brandversuch gemäß SP FIRE 105 [120]

Gitterzellengröße [cm]	Rechengebiet B x L x H [m]	Gesamtanzahl Zellen	Netzberechnung D^*/dx Brandphase 1 300 s bis 600 s	Netzberechnung D^*/dx Brandphase 2 600 s bis 900 s
20	4,2 x 5,0 x 7,6	19.000	5,8	7,2
10	4,2 x 5,0 x 7,6	152.000	11,6	14,3
5	4,2 x 5,0 x 7,6	1.216.000	23,2	28,6

6.4.2.3 Simulation Prüffeuers

Die Geometrie des Prüffeuers gemäß SP FIRE 105 [120] ist aufgrund des komplizierten Aufbaus in FDS mit der bisher verwendeten geometrischen Diskretisierung der Gitterzellengröße ≥ 5 cm nicht modellierbar. Dies liegt insbesondere an dem feinmaschigen Lochblech mit einem runden Lochdurchmesser von $d = 25$ mm, einem Lochabstand von 40 mm sowie einer Aufbauhöhe von $h = 20$ mm. Aus diesem Grund wird für die Modellierung des Prüffeuers, unter Berücksichtigung der Einflussnahme der Brandkammer, das erfolgreich validierte Prüffeuersmodell Var2 für die Simulation des Gasbrenners gemäß Abschnitt 5.2 herangezogen. Als Eingangsgrößen für die Simulation werden die in Tabelle 6-14 ausgewiesenen Parameter verwendet.

Tabelle 6-14: Eingabeparameter in FDS für das Verbrennungsprodukt Heptan

	Wert	Einheit	Quelle
Chemische Formel	C_7H_{16}	[-]	vgl. Tabelle 2-7
Heat of Combustion H_c	44,56	[MJ/kg]	vgl. Tabelle 2-7
RADIATIVE_FRACTION χ_r	0,4	[-]	vgl. Tabelle 2-7
CO-Yield Y_{CO}	0,001	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7
Soot-Yield $Y_{Ruß}$	0,037	[g/g]	vgl. Tabelle 2-7

Heptan ist in FDS ein vordefinierter Brennstoff, sodass die explizite Eingabe der Verbrennungswärme (Heat of Combustion) nicht zwangsläufig erforderlich ist. Die bei der Wärmefreisetzungsrate anteilig freigesetzte Strahlung beträgt gemäß den Voreinstellungen

in FDS für Heptan $\chi_f = 0,4$ und ist somit deutlich höher als bei den bisherigen untersuchten Brennstoffen in dieser Arbeit.

6.4.2.4 Verwendete Materialien

Alle materialspezifischen Angaben für die Eingabe in FDS können der Tabelle 6-15 entnommen werden. Die Zuweisung der Materialien zu den einzelnen Bauteilen entspricht den Angaben nach Tabelle 6-12.

Tabelle 6-15: Materialspezifische Eigenschaften für die Eingabe in FDS

Material	Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m³]	Emissionsgrad [-]
Stahl*	0,45	54	7.850	0,7**
Beton*	0,9	1,64	2.100	0,7**
Leichtbeton*	0,84	0,76	600	0,7**
Kalziumsilikatplatte*	0,975	0,175	870	0,8**
Plattenthermoelement*	0,44	14,9	8.470	0,85***
Wärmedämmung Plattenthermoelement*	1,13	0,06	128	0,9***

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS sowie Quellenangaben s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

*** Emissionsgrad - Empfehlung für die Simulation von Plattenthermoelementen gemäß FDS-USER Forum - Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS s. Anlage F

6.4.3 Ergebnisse

Bei der Auswertung der Ergebnisse aus der Simulation wird auf die Darstellung der Varianten mit einer Gitterzellengröße von 20 cm verzichtet, da die Ergebnisse aus diesen Simulationsvarianten keine Übereinstimmung aufzeigten.

6.4.3.1 Temperaturen

Die Temperaturverläufe des Brandversuchs und der Simulationen sind für die Messstellen A1 bis A6 der Plattenthermoelemente in der Abbildung 6-32 und für die Thermoelemente in der Abbildung 6-33 dargestellt. Der Vergleich zwischen Experiment und Simulation zeigt für die gegenübergestellten Temperaturverläufe der Plattenthermoelemente sowohl für die dargestellte Gitternetzgröße von 5 cm als auch für eine Gitternetzgröße von 10 cm eine gute Übereinstimmung in der ersten und zweiten Brandphase. Lediglich am Messpunkt A1 sind deutlichere Abweichungen festzustellen. Des Weiteren werden die Temperaturen in der Simulation ab der Messstelle A3 grundsätzlich geringfügig überschätzt.

Eine ähnliche Analyse kann bei der Auswertung der Temperaturverläufe aus den Thermoelementen getroffen werden. Jedoch werden hier ab der Messstelle A4 die

Temperaturverläufe aus der Simulation deutlicher überschätzt als bei den Verläufen der Temperaturen für die Plattenthermoelemente.

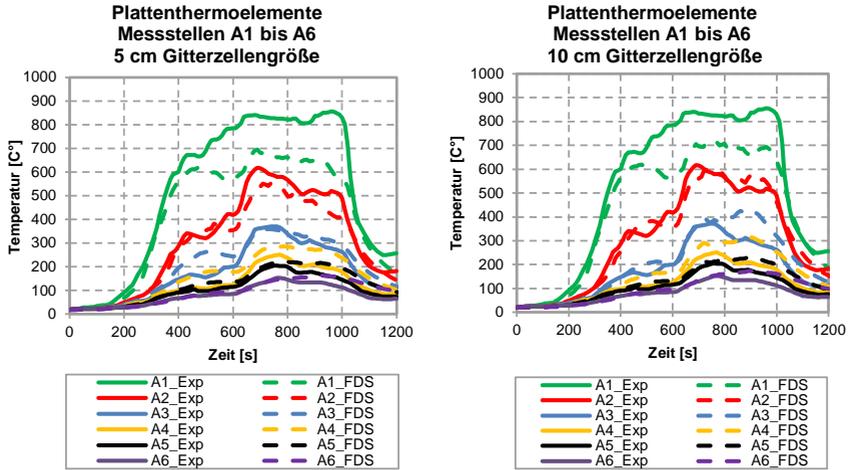


Abbildung 6-32: Temperaturverläufe an den Messstellen A1 bis A6 für die Plattenthermoelemente des Brandversuchs SP_Exp und den Simulationsvarianten SP_FDS_5cm und SP_FDS_10cm

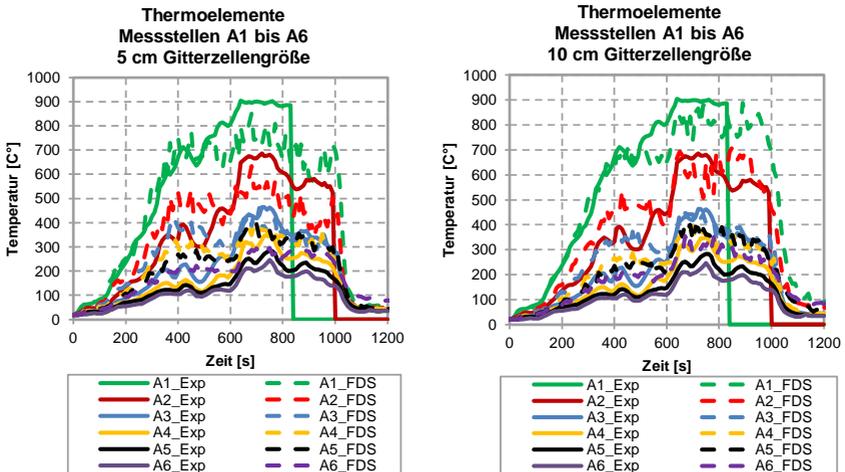


Abbildung 6-33: Temperaturverläufe an den Messstellen A1 bis A6 für die Thermoelemente des Brandversuchs SP_Exp und den Simulationsvarianten SP_FDS_5cm und SP_FDS_10cm

Bei der Auswertung der gegenübergestellten Temperaturverläufe zwischen Experiment und Simulation lässt sich eine ausreichende Validität nicht unmittelbar aus den qualitativen Verlaufskurven ableiten. Im Folgenden wird aus diesem Grund in einer ersten quantitativen Untersuchungsstufe die L_2 -Norm-Methodik für die einzelnen Messstellen angewendet. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6-16 zusammenfassend dargestellt.

Bei der Auswertung wird deutlich, dass die Temperaturverläufe aus den Thermoelementen beginnend mit der Messstelle A3 zunehmende Abweichungen aufzeigen. In den Temperaturverläufen aus den Messungen der Plattenthermoelemente ist eine höhere Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erkennbar. Unter Berücksichtigung der Temperaturmittelwerte der Plattenthermoelemente gemäß Tabelle 6-17 als zweite quantitative Auswertungsmethodik sind die Temperaturabweichung über alle Messstellen betrachtet als geringfügig zu bewerten. Daher sind die Simulationen für beide untersuchten Gitterzellengrößen von 5 und 10 cm als ausreichend valide zu bewerten.

Tabelle 6-16: Auswertungen der Messstellen A1 bis A6 zwischen den experimentellen Ergebnissen aus dem Brandversuch SP_Exp und den Simulationsergebnissen der Variante SP_FDS mittels L_2 -Norm

	L_2-Norm – Vergleich zwischen Experiment und Simulation Beanspruchungszeit 0 bis 1.200 Sekunden						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Σ Mittelwerte
SP_FDS_5cm_TE	0,15	0,25	0,34	0,45	0,61	0,58	0,40
SP_FDS_10cm_TE	0,11	0,19	0,28	0,36	0,59	0,63	0,36
SP_FDS_5cm_PTE	0,21	0,12	0,16	0,29	0,23	0,25	0,21
SP_FDS_10cm_PTE	0,18	0,09	0,22	0,32	0,25	0,28	0,22

Die Mittelwertbetrachtungen der Temperaturen in der Tabelle 6-17 zeigen deutlich, dass die thermische Einwirkung auf die Prüfwand mit beiden Simulationsvarianten ausreichend abgedeckt wird. Die Simulationsmodelle sind auf Grundlage der Temperaturverläufe somit insgesamt als ausreichend valide zu betrachten.

Tabelle 6-17: Mittelwerte der Temperaurbeanspruchung für die Ergebnisse aus Experiment und Simulation der Messstellen A1 bis A6

	Mittelwert T [°C] Beanspruchungszeit 0 bis 1.200 Sekunden						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Σ Mittelwerte
SP_Exp_TE	559	376	205	153	129	109	255
SP_FDS_5cm_TE	515	366	243	214	204	175	286
SP_FDS_10cm_TE	524	414	245	206	204	179	295
SP_Exp_PTE	515	306	175	120	104	81	217
SP_FDS_5cm_PTE	417	282	199	157	124	92	212
SP_FDS_10cm_PTE	433	305	205	159	124	96	220

6.4.3.2 Flammenausbildung

Die Abbildung 6-34 stellt die Flammenausbildung der Simulationsversuche SP_FDS_5cm und SP_FDS_10cm für die Brandphase 2 in der ca. 650. Prüfsekunde dem Flammenbild aus dem Experiment gegenüber. Der visuelle Vergleich zeigt deutlich, dass die Flammenausbildung aus den Simulationsmodellen sowohl für die Variante mit einer Gitterzellengröße von 5 cm als auch mit 10 cm ähnlich der Flammenausbildung aus dem Experiment ist.

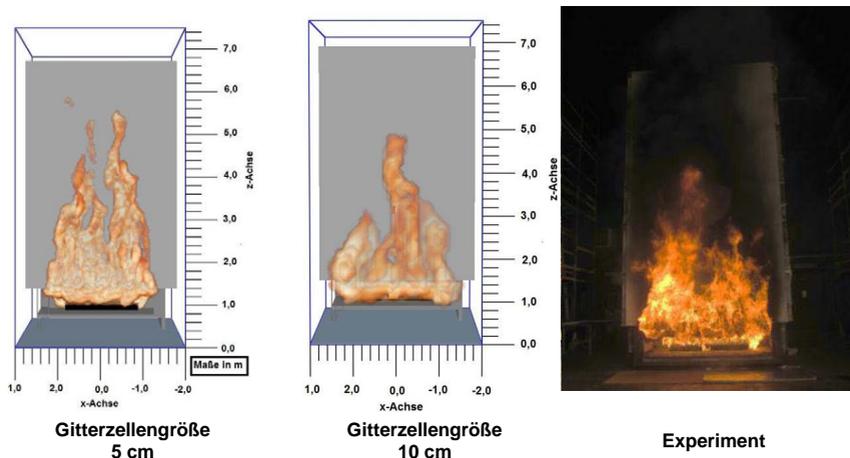


Abbildung 6-34: Darstellung der Flammenausbildung während der ca. 650. Prüfsekunde der Simulationsvarianten SP_FDS_5cm (links) und SP_FDS_10cm (mitte) gegenüberstellt der Flammenausbildung aus dem Experiment in der Brandphase 2 [109]

6.4.3.3 Wärmestromdichten

Die Temperaturentwertungen entlang der Achse A haben für beide dargestellten Gitterzellengrößen ähnliche valide Ergebnisse aufgezeigt. Um die thermische Beanspruchung beider Varianten vergleichen zu können, sind in Abbildung 6-35 die Messergebnisse für das Flächenintegral der einwirkenden Wärmestromdichte auf die Prüfwan (Gauge Heat Flux - GHF) gegenübergestellt.

Die gute Übereinstimmung der Verlaufskurven zeigt, dass hinsichtlich der thermischen Einwirkung beide Varianten nahezu gleiche quantitative Ergebnisse für die Einwirkungsgröße der Wärmestromdichte über die Gesamtfläche der Prüfwan erzielen.

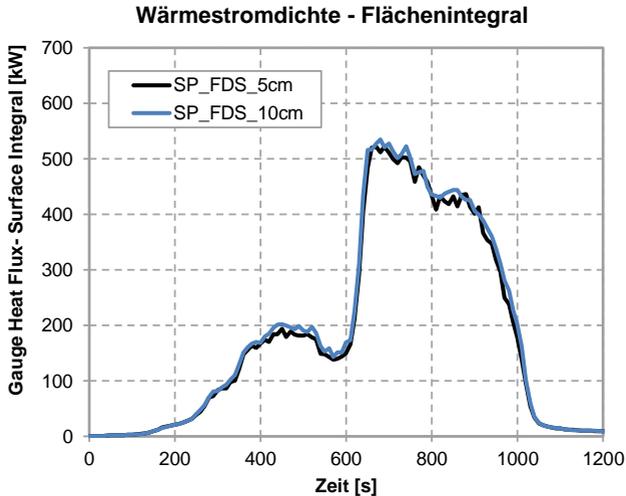


Abbildung 6-35: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) der beanspruchten Prüfwanne für die Varianten SP_FDS_5cm und SP_FDS_10cm

6.4.4 Fazit

Mit der Simulation der Brandprüfung gemäß SP FIRE 105 [120] ist es im groß skalierten Brandversuch gelungen, das Prüffeuermodell bei der Vorgabe der Wärmefreisetzungsrate aus dem mittel skalierten Brandversuch gemäß Abschnitt 5.2 erfolgreich an dem groß skalierten Brandversuch gemäß SP FIRE 105 [120] aus Evergren et al. [54] zu validieren. Aufgrund der komplexen Geometrie der Prüffeuerwannen konnte das Pyrolysemodell aus Abschnitt 5.4 nicht angewendet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Brandversuch sind unabhängig davon, als sehr hilfreich zu betrachten, da insbesondere die Strömungs- und Flammenbilder aus und in der Brandkammer bei einem auf dem Brandkammerboden befindlichen Poolfeuer auf Grundlage der Brandprüfung gemäß Evergren et al. [54] analysiert werden konnten.

6.5 ISO 13785-2 [71]

Für die Validierung des Brandversuchs gemäß ISO 13785-2 [71] werden in der Norm für die notwendigen Kalibrierungsversuche einzuhaltende Mittelwerte für Temperaturen und Wärmestromdichten an definierten Messstellen am Prüfstand vorgegeben. Die Anforderungen an den Kalibrierungsversuch aus dem Normenwerk der ISO 13785-2 [71] berücksichtigen insgesamt drei einzuhaltende Temperaturmessstellen sowie vier Messstellen von Wärmestromdichten für diverse Positionen am Prüfstand. Aufgrund der verteilten Anordnung der Messstellen auf dem Prüfstand ist von einer ausreichenden Grundlage für die Validierung zwischen den Vorgaben für den Kalibrierungsversuch und den Simulationsmodellen auszugehen.

In der ISO 13785-2 [71] sind als Prüffeuertypen die Varianten Rohrleitungs-Gasbrenner, Holzkrippen und Poolfeuer möglich. Dabei wird die Variante Rohrleitungs-Gasbrenner für die Validierungsstudie herangezogen, um die Untersuchungen an unterschiedlichen Prüfstandsgeometrien mit dem Prüffeuertyp des Gasbrenners an einem groß skalierten Brandversuch zu komplettieren. Weitere Angaben zu den alternativen Prüffeuern sind der Anlage A zu entnehmen.

6.5.1 Numerische Untersuchung - Modellierung

Die folgenden Abschnitte beschreiben die normativen Vorgaben an den Prüfstand, das Prüfffeuer sowie die weiteren relevanten Prüfrandbedingungen zur Umsetzung eines geeigneten numerischen Modells. Des Weiteren wird die numerische Umsetzung der Vorgabe für ein geeignetes Validierungsmodell in FDS ausführlich beschrieben.

6.5.1.1 Geometrie und Randbedingungen

Die Abbildung 6-36 zeigt den Prüfstand für die Variante mit Rohrleistungs-Gasbrenner gemäß ISO 13785-2 [71] zur Prüfung von Außenwandbekleidungen im groß skalierten Brandversuch. Normativ werden Mindestanforderungen an die Abmessungen der Rück- und Eckwand und zur Länge der Brandkammer gestellt. Zudem werden die Abmessungen der Brandkammeröffnung definiert.

Darüber hinaus ist in der Norm das zulässige Volumen der Brandkammer mit 20 m³ bis 100 m³ vorgeschrieben. Das Volumen der Brandkammer beeinflusst unmittelbar die notwendige Leistung des Prüffeuers, welches schlussendlich durch die einzuhaltenden Mindestwerte für Temperaturen und Wärmestromdichten an den Messebenen 1 bis 3 kalibriert wird. Für das Simulationsmodell wird eine Breite der Brandkammer von 4,0 m angesetzt und das Prüfffeuer hinsichtlich der notwendigen Leistung untersucht.

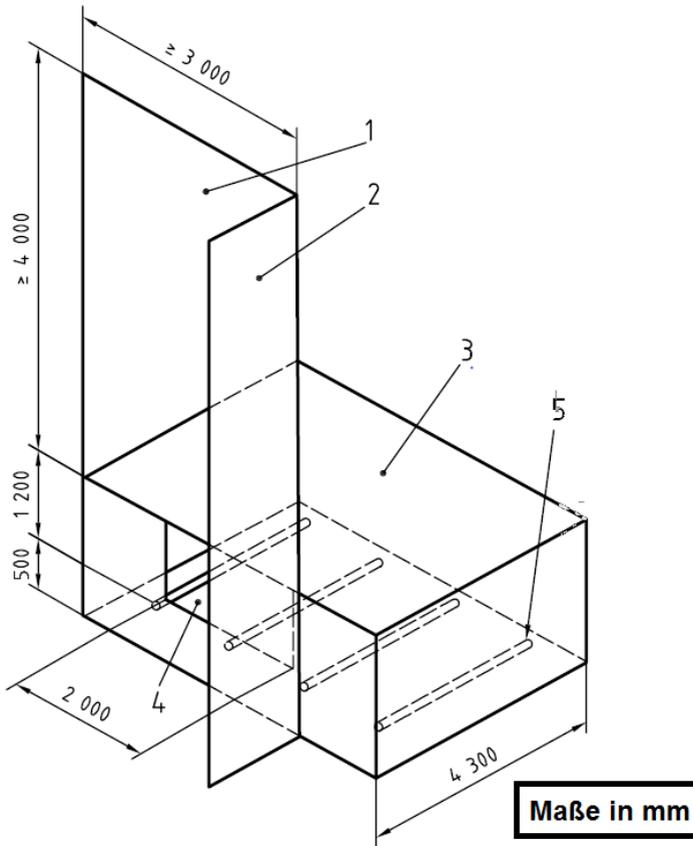


Abbildung 6-36: Ansicht Prüfstand mit Gasbrenner als Prüffeuer gemäß ISO 13785-2 [71]

- 1 - Rückwand
- 2 - Eckwand
- 3 - Brandkammer (20 m³ bis 100 m³)
- 4 - Brandkammeröffnung
- 5 - Rohrleitungs-Gasbrenner (4 x $\varnothing = 100$ mm und 3.700 mm lang, bekleidet mit 25 mm Keramikvlies Isolierung)

Gemäß ISO 13785-2 [71] werden Anforderungen an die maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit mit ≤ 2 m/s vor dem Prüfstand und an die Umgebungstemperaturen während der Prüfung mit -5 °C bis 40 °C gestellt. Für das Simulationsmodell wird die Umgebungstemperatur mit $T = 20$ °C und eine relative Luftfeuchte mit $\phi = 50$ % angesetzt. Die Tabelle 6-18 fasst die normativen Angaben im Zusammenhang mit der Modellausführung in FDS zusammen.

Tabelle 6-18: Versuchsrandbedingungen für die Simulationsmodelle ISO1, ISO2 und ISO3

Klimatische Randbedingungen					
Versuch	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchte [%]	Wind		
ISO1+ISO2*ISO3	20	50	-		
Geometrische und materialspezifische Randbedingungen					
Bauteil		Innenmaße [m]	Material		
Prüfstand	Rückwand B x H	3,0 x 5,7	Porenbetonwand (Annahme) + Keramikfaserplatte		
	Eckwand B x H	1,2 x 5,7			
Brandkammer	Grundfläche B x L	4,0 x 4,3	Stahlbeton + Keramikvlies Isolierung innenseitig		
	Höhe H	1,7			
Prüffeuer					
Rohrleitungs- Gasbrenner	Maße Rohrleitung Durchmesser x L [m]	Gasdurchsatz [g/s]	H_{u,eff} [MJ/kg]	Zündinitial	
ISO1	4 x Ø 0,25 x 3,7	97	46,36	unbekannt	
ISO2		108			
ISO3		119			
Beanspruchungszeit Kalibrierungsversuch					
15 Minuten Vollbrandphase + 5 Minuten Vor- und Nachlaufzeit					

Die Varianten ISO1 bis ISO3 variieren in der Simulation hinsichtlich der Leistung des Prüfegers. Genauere Erläuterungen sind dem folgenden Abschnitt 6.5.1.2 zu entnehmen. Als reine Prüfzeit werden insgesamt 25 Minuten angesetzt, wobei eine Vorlaufzeit von 5 Minuten bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate und eine Nachlaufzeit von 5 Minuten zur vollständigen Abschaltung des Brenners zu berücksichtigen sind.

In der Abbildung 6-37 ist die Umsetzung des Brandversuchs gemäß ISO 13785-2 [71] unter Berücksichtigung des Prüfegerstyps als Rohrleitungs-Gasbrenner dargestellt. Das Leitungssystem des Gasbrenners wird analog Abbildung 6-36 unmittelbar über dem Brandkammerboden positioniert. Die Anordnung der vier Rohrleitungen innerhalb der Brandkammer erfolgt in Anhängigkeit der gewählten Grundfläche der Brandkammer im gleichen Abstand untereinander.

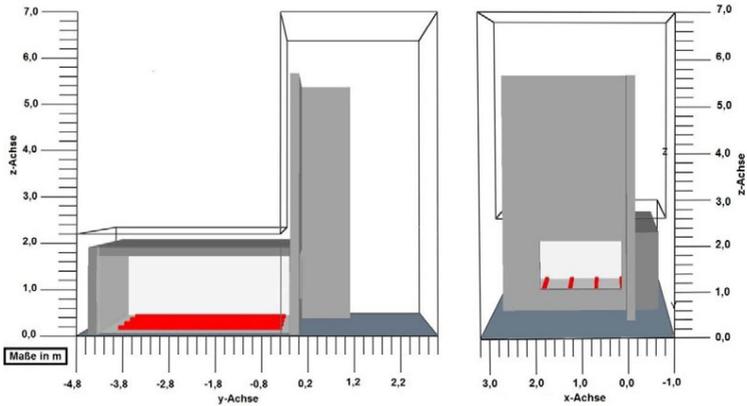


Abbildung 6-37: Geometrische Darstellung des Simulationsmodells in FDS auf Grundlage der normativen Vorgaben gemäß ISO 13785-2 [71]

6.5.1.2 Simulation Prüffeuier

Da die Brandkammer normativ lediglich in Längsrichtung mit 4,3 m definiert ist, wurde auf Basis von Erkenntnissen zur Optimierung der Wärmeabgabe und der Ausbildung des Heißgasstroms an der Brandkammeröffnung auf Basis numerische Voruntersuchungen des Verfassers die Breite mit 4,0 m und die Höhe mit 1,7 m festgelegt. Daraus ergibt sich für die Brandkammer ein Volumen von 29,24 m³. Auf Grundlage der drei unterschiedlichen Gasdurchsätze beim Prüffeuier für die Varianten ISO1 bis ISO3 werden die Anforderungen an die einzuhaltenen Temperaturen und Wärmestromdichten an den Messebenen 1 bis 3 im Simulationsmodell untersucht.

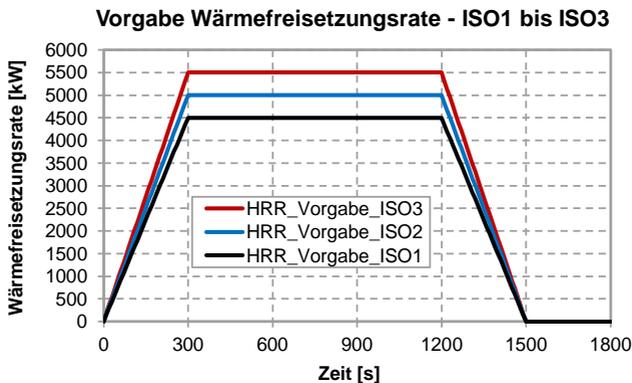


Abbildung 6-38: Wärmefreisetzungsrate HRR für die Varianten ISO1 bis ISO3

In der Abbildung 6-38 ist der Verlauf der vorgegebenen Wärmefreisetzungsrate der einzelnen Varianten gegenübergestellt. Ziel der Untersuchungen mit unterschiedlichen Varianten ist die Bestimmung der maximalen, notwendigen Wärmefreisetzungsrate, unter Berücksichtigung der definierten Brandkammergeometrie, um die Anforderungen an den Messstellen an einen Kalibrierungsversuch gemäß 13785-2 [71] einzuhalten.

Die Simulation des Prüffeuers erfolgt analog dem erfolgreich validierten Prüffeuermodell gemäß Abschnitt 5.2 für die Variante Var2 und den dort angegebenen Eigenschaften des Brennstoffes Propan. Der Heizwert wird gemäß Tabelle 6-18 mit $H_{u,eff} = 46,36$ MJ/kg angesetzt.

Somit wird die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate in der Einheit kW/m² in Abhängigkeit der Variante ISO1 bis ISO3 auf die simulierten Brennerflächen projiziert. Der zeitliche Verlauf wird über den Steuerbefehl &Ramp in FDS gesteuert.

6.5.1.3 Gitternetz

Die Wärmefreisetzungsrate während der Vollbrandphase für die Varianten ISO1 bis ISO3 nach Abbildung 6-38 betragen 4,5 MW, 5 MW und 5,5 MW. Der charakteristische Branddurchmesser D^* ergibt sich unter Betrachtung der einzelnen Varianten für ISO1 $D^* = 1,75$, für ISO2 $D^* = 1,83$ und für ISO3 mit $D^* = 1,9$.

Tabelle 6-19: Zusammenfassung der relevanten Parameter der Gitterzellengrößen auf Grundlage des charakteristischen Branddurchmessers D^* für die Simulationsvarianten ISO1 bis ISO3

Gitterzellengröße [cm]	Rechengebiet L x B x H [m]	Gesamtanzahl Zellen	Netzberechnung D^*/dx		
			4,5 MW	5,0 MW	5,5 MW
20	4,2 x 7,8 x 7,0	28.665	8,75	9,15	9,5
10	4,2 x 7,8 x 7,0	229.320	17,5	18,3	19
5	4,2 x 7,8 x 7,0	1.834.560	35	36,6	38

Die Tabelle 6-19 fasst die wesentlichen Kenngrößen der Gitternetzstruktur der Simulationsmodelle zusammen. Für alle drei Varianten ist eine ausreichende Gitterzellengröße bei 10 cm für eine erfolgreiche Validierung zu erwarten. Die Simulationsvarianten werden für die drei angegebenen Gitterzellengrößen, unabhängig davon, durchgeführt.

6.5.1.4 Verwendete Materialien

Alle materiaspezifischen Angaben für die Eingabe in FDS können der Tabelle 6-20 entnommen werden. Die Materialien sind gemäß Tabelle 6-18 den Bauteilen des Prüfstandes zugewiesen.

Tabelle 6-20: Materialspezifische Eigenschaften für die Eingabe in FDS

Material	Wärmespeicher- kapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m³]	Emissionsgrad rad [-]
Stahl*	0,45	54	7.850	0,7**
Beton*	0,9	1,64	2.100	0,7**
Porenbeton*	1,05	0,15	600	0,8**
Keramikfaserplatte*	0,975	0,242	1.000	0,8**
Keramikvlies Isolierung*	1,13	0,06	128	0,8**
Plattenthermoelement*	0,44	14,9	8.470	0,85***
Wärmedämmung Plattenthermoelement*	1,13	0,06	128	0,9***

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS sowie Quellenangaben s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

*** Emissionsgrad - Empfehlung für die Simulation von Plattenthermoelementen gemäß FDS-USER Forum - Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS s. Anlage F

6.5.1.5 Messdaten

Beim Brandversuch gemäß ISO 13785-2 [71] sind bei der Kalibrierung in den Messebenen 1 bis 3 Temperaturen und Wärmestromdichten zu messen. Die Anordnung der Messstellen für die Brandprüfung kann der Abbildung 6-39 entnommen werden. Dabei können die Temperaturen entweder durch Mantelthermoelemente oder geschweißte Thermoelemente gemessen werden. Mantelthermoelemente sind aus NiCr vom Typ K mit einem Thermo-drahtdurchmesser von 0,3 mm und einem Manteldurchmesser von $1,5 \pm 0,1$ mm zu verwenden. In den nachfolgenden numerischen Untersuchungen wurden dem entsprechend Mantelthermoelemente berücksichtigt. Bei der Messung der Wärmestromdichten können Wärmestromaufnehmer verwendet werden, welche eine Messtoleranz von max. ± 3 % aufweisen.

Das Intervall der Messdatenaufnahme muss für beide Messgrößen max. 20 Sekunden betragen. Um mögliche Schwankungen bzw. Ungenauigkeiten der Verlaufskurven zu reduzieren, sind die Messdaten bei der Auswertung in einem Intervall von einer Minute zu mitteln. Die Messdaten der Ebene 4 und 5 haben keine Relevanz für den Kalibrierungs-versuch, wurden jedoch in der Simulation mit FDS zusätzlich berücksichtigt. Das Messintervall in der Simulation wurde mit 10 Sekunden gewählt.

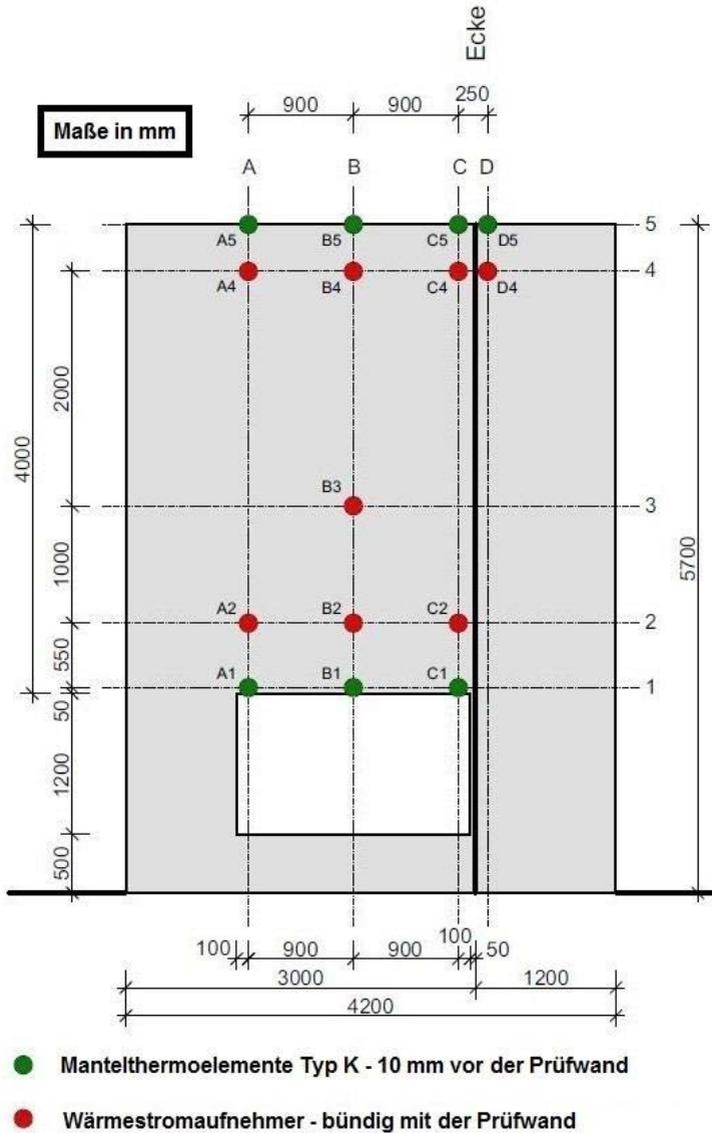


Abbildung 6-39: Messstellenplan für den Brandversuch gemäß ISO 13785-2 [71] und den mit FDS simulierten Kalibrierungsversuchen

6.5.2 Numerische Untersuchungen - Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus den numerischen Untersuchungen vorgestellt. Für die Validierung werden die einzuhaltenden gemittelten Mindestwerte für die Temperaturen und die Wärmestromdichten aus den Anforderungen für die Kalibrierungsversuche gemäß ISO 13785-2 [71] herangezogen. Die gemittelten Temperaturen der drei Messstellen A1, B1 und C1 müssen in der Vollbrandphase des Prüffeuers von der 300. Prüfsekunde bis zur 1.200. Prüfsekunde mindestens 800 °C betragen. Somit können Unterschreitungen des Grenzwertes an einzelnen Messpunkten durch die übrigen Messstellen aufgewogen werden.

Für die Wärmestromdichten, gemessen an den Messstellen A2, B2 und C2, müssen die gemittelten Wärmestromdichten für alle drei Messstellen mindestens $50 \pm 5 \text{ kW/m}^2$ in der Vollbrandphase des Prüffeuers betragen.

Für die Messstelle B3 gilt der einzuhaltende Mindestwert der Wärmestromdichte von $35 \pm 3 \text{ kW/m}^2$.

Auf Grundlage der einzuhaltenden Mindestwerte für die Temperaturen und Wärmestromdichten wurden die drei Simulationsvarianten ISO1 (4,5 MW), ISO2 (5,0 MW) und ISO3 (5,5 MW) ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass bei Variante ISO1 unter Berücksichtigung eines Brandkammervolumens von 29,24 m³ keine ausreichende thermische Beanspruchung im Bereich der Messebene 1 bis 3 erreicht wurde. Für die Variante ISO3 sind die thermischen Beanspruchungen insgesamt zu hoch ausgefallen. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse für die Varianten ISO1 und ISO3 nicht weiter vorgestellt.

6.5.2.1 Temperaturen und Wärmestromdichten

Nachfolgend werden die Ergebnisse aus der Simulationsvariante ISO2 dargestellt. Die Variante mit einer Gitterzellengröße von 20 cm war nicht ausreichend valide und wird aus diesem Grund nachfolgend nicht weiter betrachtet.

In Abbildung 6-40 sind die simulierten Temperaturverläufe der Mantelthermoelemente für die Messstellen A1 bis C1 dargestellt. Die Temperaturverläufe an den Messstellen B1 und C1 erreichen bei beiden betrachteten Gitterzellengrößen von 5 und 10 cm zwischen der 300. bis zur 1.200. Prüfsekunde die einzuhaltenden 800 °C gemäß ISO 13785-2 [71] sicher. Lediglich an der Messstelle A1 weichen die Temperaturen mit zunehmender Dauer der Vollbrandphase vom Mindestwert der gemittelten Temperatur ab. Bei gleichzeitiger Abnahme der Temperaturen an der Messstelle A1 nehmen die Temperaturen an den Messstellen B2 und C2 zu, was auf eine zunehmende Verlagerung der Flammenachse in Richtung Prüfstandeindeckung hindeutet.

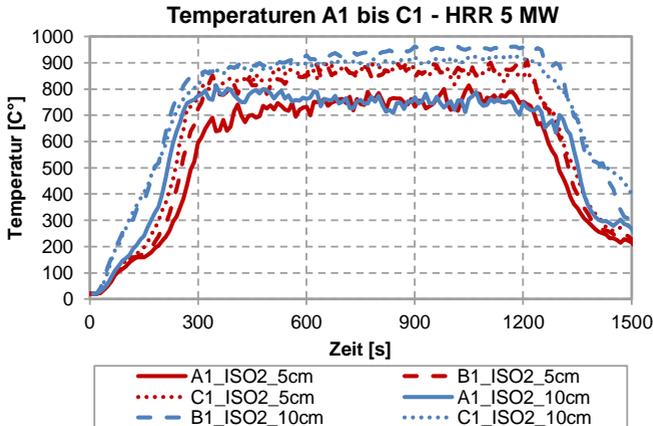


Abbildung 6-40: Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelemente an den Messstellen A1 bis C1 für die Simulationsvarianten ISO2_FDS_5cm und ISO2_FDS_10cm

Zum Nachweis der Übereinstimmung zwischen den Anforderungen gemäß ISO 13785-2 [71] für den Kalibrierungsversuch und den Ergebnissen aus der Simulation sind in der Tabelle 6-21 die Mittelwerte der Temperaturen für die betrachteten Messstellen ermittelt worden. Unter Betrachtung der gesamten Messstellen erreichen beide Simulationsvarianten jeweils die erforderlichen 800 °C.

Tabelle 6-21: Mittelwerte der Temperaturbeanspruchung für die Ergebnisse aus der Simulation der Variante ISO2 an den Messstellen A1 bis C1

	Mittelwert T [°C] Beanspruchungszeit 300 bis 1.500 Sekunden			
	A1	B1	C1	Mittelwert
Min. Temperaturen ISO13785-2	800	800	800	800
ISO2_5cm	741	842	861	815
ISO2_10cm	755	918	876	850

Durch den nachweislich vorhandenen ECKEINFLUSS auf die Ausbildung des Heißgasstroms vor der Brandraumöffnung wäre eine Erhöhung der Wärmefreisetzungsrate zur Einhaltung des Mittelwerts der Temperatur an der Messstelle A1 nicht zielführend, da gleichzeitig die Temperaturen auf Grundlage der Erkenntnisse aus Simulationsvariante IOS3 an den Messstellen B1 und C1 deutlich ansteigen. Dadurch käme es zu einer Überschätzung der thermischen Beanspruchung auf die Prüfwand.

Bei der qualitativen Auswertung der Wärmestromdichten in Messebene 2 auf Grundlage der Abbildung 6-41 ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Temperaturverläufen. Während an den Messstellen B2 und C2 die Anforderungen an die gemittelten Wärmestromdichten sicher eingehalten werden, wird die Abweichung an Messstelle A2 bei den Wärmestromdichten sehr viel deutlicher. Damit wird aufgezeigt, dass die aus der Brandkammeröffnung austretende Flamme mit zunehmender Höhe durch den entstehenden Unterdruck im Eckbereich näher an die Eckwand rückt. Wesentlichen Einfluss auf diesen Effekt haben die höheren Auftriebsgeschwindigkeiten nahe dem Eckbereich aufgrund der höheren Temperaturen in der Flamme seitlich zur Mitte der Brandkammeröffnung. Diese wiederum ergeben sich durch die geringere Umgebungsluftmischung seitlich in die Flamme über den Eckbereich.

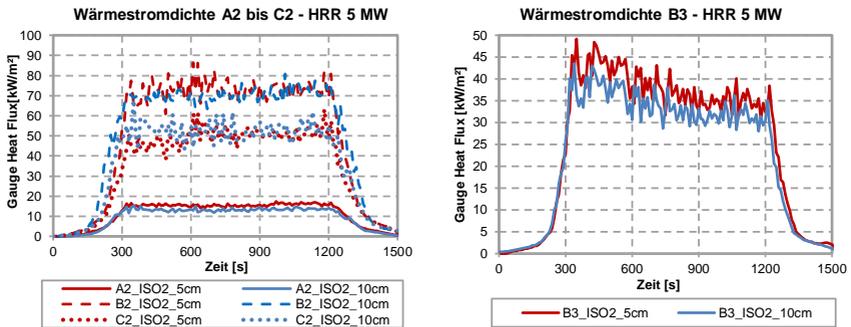


Abbildung 6-41: Wärmestromdichten an den Messstellen A2 bis C2 für die Simulationsvarianten ISO2_FDS_5cm und ISO2_FDS_10cm

Die Tabelle 6-22 stellt die Anforderungen gemäß ISO 13785-2 [71] für die Wärmestromdichten im Kalibrierungsversuch den in FDS bestimmten Ausgangsparametern für die Messstellen A2, B2, C2 und B3 gegenüber.

Tabelle 6-22: Mittelwerte der Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) für die Ergebnisse aus der Simulation der Variante ISO2 an den Messstellen A2 bis C2 und B3

	Mittelwert GHF [°C] Beanspruchungszeit 300 bis 1.500 Sekunden				
	A2	B2	C2	Mittelwert	B3
Min. GHF ISO13785-2	50±5	50±5	50±5	50±5	35±3
ISO2_5cm	15,6	72,7	49,4	46	38
ISO2_10cm	13,32	70,2	52,6	45	34

Unter Betrachtung der summierten Mittelwerte zeigen sowohl die Messstellen an Messebene 2 als auch die Messstelle B3 eine ausreichende Übereinstimmung zwischen den Anforderungswerten gemäß ISO 13785-2 [71] und den Simulationsvarianten. Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Simulationen sind die Varianten mit einer Gitterzellengröße von 5 und 10 cm für die Simulation des Brandversuchs geeignet.

Dass die thermischen Einwirkungen auf den Prüfstand auf Grundlage der gemessenen Wärmeströme auf die beanspruchte Prüfwand zwischen den Simulationsvarianten konvergieren, verdeutlicht die Abbildung 6-42. In der Abbildung ist das Flächenintegral für die Wärmestromdichte dargestellt. Die Verlaufskurven beider Simulationen sind aus qualitativer Sicht nahezu übereinstimmend. Die insgesamt ermittelte einwirkende Wärmeenergie auf die Prüfwandfläche ergibt sich bei der Variante ISO2_5cm zu 581 MJ und bei Variante ISO2_10cm zu 575 MJ. Die Abweichung beträgt somit $\approx 1\%$.

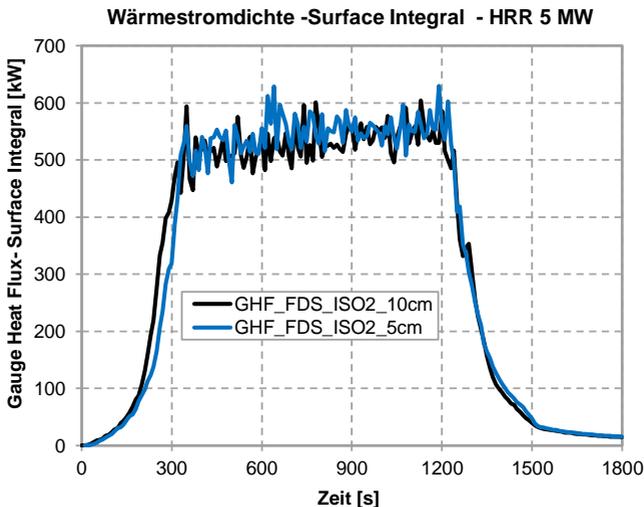


Abbildung 6-42: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) der beanspruchten Prüfwand für die Varianten SP_FDS_5cm und SP_FDS_10cm

6.5.2.2 Flammenausbildung

Zum Abschluss der Validierungsuntersuchung wird die Flammenausbildung in der Abbildung 6-43 der Varianten ISO2_5cm und ISO2_10cm gegenübergestellt. Im Simulationsmodell ergeben sich durchschnittliche Flammenhöhen von ca. 3,5 m. Zudem wird der Eckenfluss in der Abbildung deutlich. Insgesamt betrachtet repräsentieren die Flammenbilder eine gute

Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Temperaturverläufe und den Wärmestromdichten aus der Simulation sowie den Anforderungswerten für die Kalibrierungsversuche gemäß ISO 13785-2 [71].

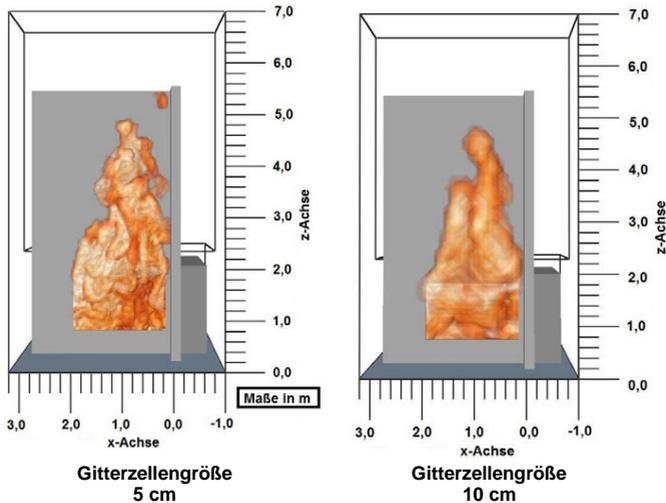


Abbildung 6-43: Darstellung der Flammenausbildung während der ca. 450. Prüfsekunde der Simulationsvarianten ISO2_FDS_5cm (links) und ISO2_FDS_10cm (rechts)

6.5.3 Fazit

Bei den Untersuchungen der Simulationsmodelle auf Grundlage der Anforderungen an Kalibrierungsversuche gemäß ISO 13785-2 [71] konnte die Variante mit dem Prüffeuertyp eines Rohrleistungs-Gasbrenners, sowohl für eine Gitterzellengröße von 5 cm als auch für 10 cm erfolgreich validiert werden. Dabei steht die notwendige Prüffeuereistung zur Gewährleistung der einzuhaltenden thermischen Beanspruchung der Prüfwand im unmittelbaren Zusammenhang mit der Geometrie der Brandkammer. Aus diesem Grund sind die ausgewiesenen Gasdurchsätze für die Rohrleistungs-Gasbrenner von insgesamt 120 g/s bei der untersuchten Brandkammergeometrie mit einem Volumen von ca. 29,24 m³ nicht erforderlich. Zur Einhaltung der Mindestwerte von Kalibrierungsversuchen waren in der Simulation ein Gasdurchsatz von 108 g/s und eine daraus resultierende Wärmefreisetzungsrate von 5,0 MW ausreichend. Beide Simulationsvarianten zeigten zudem, dass diese untereinander konvergieren. Aufgrund der unmittelbaren Anordnung der Eckwand an die Brandkammeröffnung konnte ein deutlicher Einfluss auf die Flammenausbildung entlang der aufgehenden Prüfwand festgestellt werden.

6.6 Vergleich und Bewertung Brandversuche

Nachfolgend werden die bisher untersuchten groß skalierten Brandversuche für Außenwandbekleidungen gemäß BS 8414-1 [19], ISO 13785-2 [71], LEPIR 2 [115] und SP FIRE 105 [120] hinsichtlich der thermischen Beanspruchung der Prüfwand quantitativ ausgewertet, gegenübergestellt und bewertet. Aufgrund der normativen Beschreibung gemäß BS 8414-1/-2 ([19], [20]) und ISO 13785-2 [71] decken diese Brandversuche sowohl einen Brand von innen gemäß Abschnitt 2.2.1 als auch einen Brand von außen gemäß Abschnitt 2.2.2 ab. Welche Brandquellen genau bei einem Brand von außen mit der jeweiligen Prüfung abgedeckt werden können, wird in den Normenwerken nicht explizit benannt.

Die vorgeschriebene Sockelbrandprüfung für Außenwandbekleidungen mit EPS und der bauordnungsrechtlichen Anforderung schwerentflammbar gemäß MVV TB [107] deckt z. B. das Brandszenario eines Müllmischcontainers am Sockel einer Gebäudeecke ab. Um nachzuweisen, ob das erforderliche Sicherheitsniveau für die Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] durch die untersuchten europäischen Prüfverfahren abgedeckt werden kann, wird ergänzend der groß skalierte Brandversuch gemäß MVV TB [107] in die Auswertung einbezogen.

Des Weiteren sind für die Zielstellung dieser Arbeit die Erkenntnisse der quantitativen thermischen Brandbeanspruchung der Prüfwand aus den untersuchten europäischen Prüfverfahren und der nationalen Sockelprüfung im Vergleich von wesentlicher Bedeutung. Bei der Entwicklung eines Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen unter realitätsnahen Naturbrandbeanspruchungen ist eine ausreichende Übereinstimmung der Brandbeanspruchung der Prüfwand im Vergleich zu bestehenden groß skalierten Brandprüfungen innerhalb Europas ein wichtiger Bestandteil zur Anerkennung der Prüfverfahrens auf nationaler und europäischer Ebene.

Zusätzlich wird in den nachfolgenden Abschnitten der mittel skalierte Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] in die Untersuchungen mit einbezogen, um quantitativ einschätzen zu können, welches Prüfniveau mit diesem Prüfverfahren für das skalierte Raumbrandszenario im europäischen Vergleich erreicht werden kann.

6.6.1 Randbedingungen Simulationsvarianten

Bei den quantitativen Vergleichsbewertungen zwischen den benannten Prüfständen werden die normativen Anforderungen zur technischen Umsetzung der zu simulierenden Brandprüfungen unter Berücksichtigung der durchgeführten Validierungsmodelle berücksichtigt. Aufgrund der zum Teil modifizierten geometrischen Prüfstandsgeometrien, in den zugrunde gelegten Brandversuchen aus den Validierungsuntersuchungen, sind für die

Prüfstände des BS 8414-1 [19] und des SP FIRE 105 [120] die geometrischen Implementierungen der Simulationsmodelle anzupassen. Im Weiteren sind teilweise Anpassungen an die allgemeinen Randbedingungen in den Simulationsmodellen notwendig, um diese miteinander quantitativ vergleichen zu können. Dies beinhaltet z. B den Ansatz eines einheitlichen Prüfklimas mit einer Umgebungstemperatur von $T = 20\text{ °C}$ sowie einer relativen Luftfeuchte von $\phi = 50\%$ für die zu vergleichenden Brandversuche. Die weiteren Modifizierungen werden nachfolgend vorgestellt.

In der Abbildung 6-44 ist links der Prüfstand gemäß SP FIRE 105 [120] bzgl. der ergänzenden Anforderungen an die Ausbildung zweier Aussparungen zur Simulation von Fensteröffnungen sowie der vorzusehenden Kragplatte als oberer Abschluss der Prüfwand dargestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung 6-44 ist das implementierte geometrische Modell mit den beiden benannten Anpassungen gegenüber dem Validierungsmodell gemäß Abschnitt 6.4 gegenübergestellt.

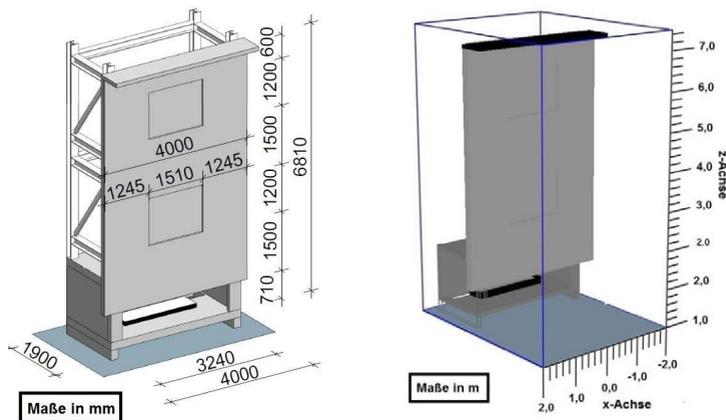


Abbildung 6-44: Prüfstandsgeometrie gemäß SP FIRE 105 [120] (links) sowie geometrische Implementierung in FDS (rechts)

In der Abbildung 6-45 ist der modifizierte Prüfstand gemäß den Anforderungen aus BS 84141 [19] gegenüber dem Validierungsversuch aus Abschnitt 6.2 dargestellt. Die geometrische Implementierung in FDS wurde hinsichtlich der Brandkammergröße, der Berücksichtigung eines Brandkammersturzes, der Höhe des Prüfstandes sowie der Breiten der Rück- und Eckwand modifiziert. Der Ansatz der Wärmefreisetzungsrate für das Prüffeuerelement im BS 8414-1/-2 ([19], [20]) wurde aufgrund der sehr stark variierenden Masseangaben der Holzkrippe (vgl. 2.4) nach den Anforderungen aus der Norm gegenüber dem Validierungsversuch gemäß Abschnitt 6.2 angepasst. Die Wärmefreisetzungsrate der Holzkrippe mit den Abmessungen $b \times l \times h_c = 1,5\text{ m} \times 1,0\text{ m} \times 1,0\text{ m}$ wurde gemäß dem

Berechnungsansatz aus BiR ([132], [133]) (vgl. Anlage B) mit einer mittleren Wärmefreisetzungsrate von 3,13 MW, unter Berücksichtigung der einzuhaltenden umzusetzenden Gesamtwärmeenergie der Holzkrippe von mindestens 4.500 MJ innerhalb der Prüfzeit von 1.800 Sekunden, bestimmt.

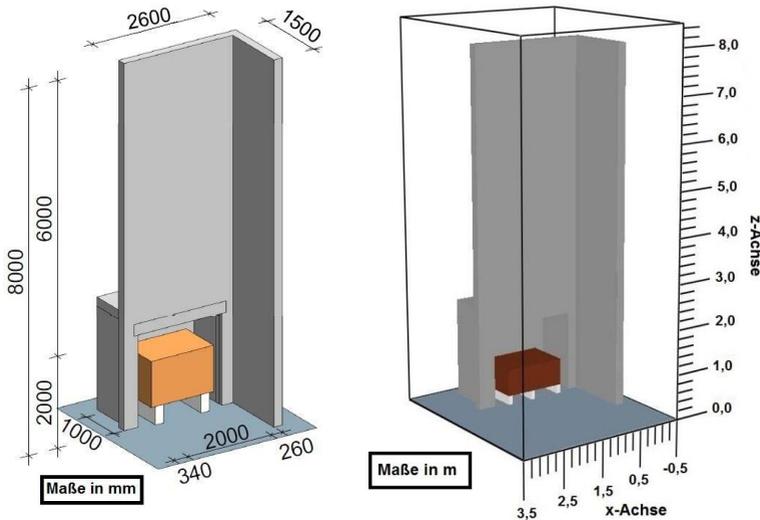


Abbildung 6-45: Prüfstandgeometrie gemäß BS 8414-1 [19] (links) sowie geometrische Implementierung in FDS (rechts)

Grundsätzlich werden für die nachfolgend untersuchten Simulationsmodelle die validen Prüffeuervarianten bei einer Gitterzellengröße von 10 cm berücksichtigt. Ausgenommen ist das Simulationsmodell gemäß DIN 4102-20 [32] mit einer berücksichtigten Gitterzellengröße von 5 cm.

6.6.2 Ergebnisse

Im Folgenden werden die quantitativen Ergebnisse der einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwand für die untersuchten Brandversuche ausgewertet. Die Auswertung erfolgt in drei Untersuchungsstufen. Im ersten Schritt werden die einwirkenden Wärmestromdichten auf die Prüfwandfläche über die Prüfzeit qualitativ analysiert. Auf Grundlage der qualitativen Verläufe kann eine erste Einschätzung zur Einwirkungsgröße der Prüffeuere auf die Prüfwand erfolgen. Im zweiten Schritt wird die Wärmeenergie ermittelt, welche über die gesamte Prüfzeit auf die Prüfwandfläche wirkt. Mit Hilfe dieses Ansatzes lässt sich abwägen, wie intensiv die Brandbeanspruchung über die gesamte Prüfzeit ist. Im dritten Schritt werden anhand der Visualisierungen der einwirkenden

Wärmestromdichten über das Zeitintegral beim Brandversuch die maßgebenden lokalen Beanspruchungsbereiche auf der Prüfwand erfasst und hinsichtlich der Einwirkung bewertet.

Bei den angegebenen Wärmestromdichten wird grundsätzlich nur die Fläche der Prüfwand berücksichtigt, bei der eine Applizierung einer Außenwandbekleidung möglich ist. Somit werden Aussparungen zur Simulation von Fenstern (SP FIRE 105 [120]) oder tatsächlich vorhandenen Fenstern (LEPIR 2 [115]) bei den quantitativen Auswertungen nicht berücksichtigt. Dies beruht auf der Tatsache, dass diese Bereiche bzw. Flächen bei einer Brandprüfung ohne Außenwandbekleidung ausgeführt werden und somit keinen Beitrag zum Brand leisten können.

Die Abbildung 6-46 stellt den zeitlichen Verlauf der einwirkenden Wärmestromdichte der beanspruchten Prüfwand für die untersuchten Prüfstände gegenüber. Die berücksichtigte Brandbeanspruchungszeit ist der Tabelle 2-6 zu entnehmen und orientiert sich an der jeweiligen zugrunde gelegten Norm.

Die einwirkenden Wärmestromdichten auf die Prüfwandfläche für das Flächenintegral bei der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] erreicht im Vergleich zu den übrigen Brandversuchen mit ca. 920 kW den höchsten Betrag. Aufgrund des Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate der Holzkrippe während der Vollbrandphase ist die thermische Beanspruchung veränderlich, sodass nach Erreichen der maximalen, thermischen Beanspruchung diese bis zum Ende der Prüfung kontinuierlich abfällt.

Gemäß den Verlaufskurven für die Brandversuche beträgt der einwirkende Wärmestrom auf die Prüfwandflächen während der Vollbrandphase für den Brandversuch gemäß BS8414-1 [19] ca. 430 kW und für den Brandversuch gemäß ISO 13875-2 [71] ca. 550 kW. Beide Verlaufskurven sind näherungsweise konstant, wobei bei einem Brandversuch mit der Holzkrippe der konstante Verlauf mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht erzielt werden kann.

Durch die Ausbildung der Prüfstände als gerade Wand gemäß den Vorgaben aus LEPIR 2 [115] und aus SP FIRE 105 [120] sowie aufgrund der Anordnung von Fensteröffnungen ist die simulierte Gesamteinwirkung auf die Prüfwandfläche infolge der einwirkenden Wärmestromdichten bei diesen Brandversuchen deutlich geringer.

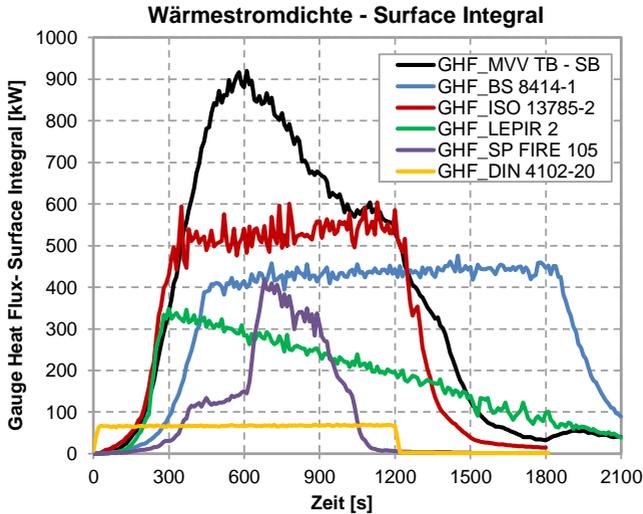


Abbildung 6-46: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) der beanspruchten Prüfwand

Die Auswertung der Gesamteinwirkung auf die Prüfwandfläche der einwirkenden Wärmestromdichten für den Brandversuch gemäß DIN 4102-20 [32] zeigt deutlich auf, warum diese Brandprüfung nicht den groß skalierten Brandversuchen zuzuordnen ist. Die thermische Beanspruchung der Prüfwand ist gegenüber den groß skalierten Brandversuchen unverkennbar geringer, sodass die Abdeckung eines repräsentativen Naturbrandes für das Raumbrandszenario gemäß Abschnitt 2.2.1 nicht gewährleistet werden kann. Eine Beurteilung von brennbaren Außenwandbekleidungen, bzgl. der Begrenzung der Brandausbreitung, ist bei dieser geringen thermischen Beanspruchung dem zufolge als äußerst schwierig zu betrachten.

In der Abbildung 6-47 ist auf Grundlage der Wärmestromverläufe der Abbildung 6-46 die einwirkende Wärmeenergie auf die Prüfwand für den jeweiligen Brandversuch über die angesetzte gesamte Prüfzeit dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass aufgrund der längeren Beanspruchungsdauer im Brandversuch gemäß BS 8414-1 [19] die einwirkende Wärmeenergie gegenüber der Brandprüfung gemäß ISO 13875-2 [71] abgedeckt wird. Unter Berücksichtigung der Vergleichsbetrachtung aus dem Brandversuch gemäß MVV TB [107], können die benannten Brandprüfungen die insgesamt einwirkende Wärmeenergie nicht abdecken.

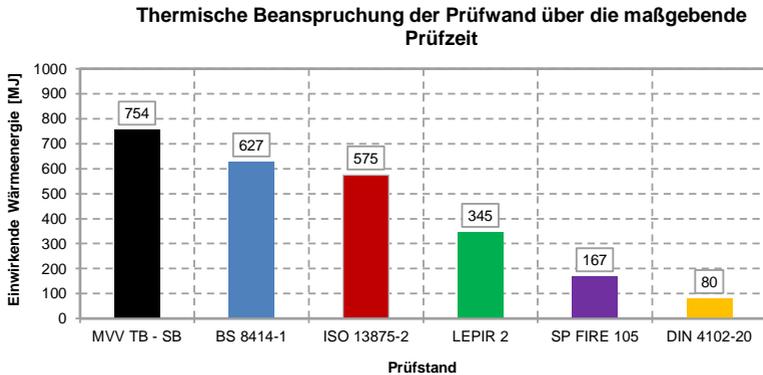


Abbildung 6-47: Integral der einwirkenden Wärmestromdichte (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwandfläche über die Prüfzeit in MJ

Dabei sind Beanspruchungsbereiche zwischen den Brandversuchen ergänzend lokal auf der beanspruchten Prüfwandfläche auszuwerten. In der Abbildung 6-48 ist dazu die lokale einwirkende Wärmeenergie auf die Prüfwandflächen für die Gesamtbeanspruchungszeit der untersuchten groß skalierten Brandversuche visualisiert. Aus dieser lassen sich die nachfolgenden Feststellungen treffen.

Zum einen deckt die Brandprüfung gemäß ISO 13875-2 [71] die lokalen kritischen Brandbeanspruchungen der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] an der Eckwand näherungsweise ab. Zum anderen kann durch den einzuhaltenden Abstand zwischen dem Innenmaß der Eckwand und der Laibung der Brandkammeröffnung von 0,1 m die Beanspruchung der Eckwand auch im Brandversuch mit Außenwandbekleidung näherungsweise gewährleistet werden. Des Weiteren ist die einwirkende Wärmeenergie auf die Prüfwandfläche im Brandversuch gemäß ISO 13875-2 [71] geringer, da die Prüfwand deutlich größer gegenüber der Prüfwand in der Sockelbrandprüfung skaliert ist. Aufgrund der Erkenntnisse kann die Brandprüfung gemäß ISO 13875-2 [71] hinsichtlich der thermischen Brandbeanspruchung näherungsweise als gleichwertig zur Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] betrachtet werden. Aufgrund der zusätzlichen Sturzbeanspruchung im Brandversuch gemäß ISO 13875-2 [71] deckt dieser gegenüber der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] eine zusätzliche kritische lokale Brand-beanspruchung mit ab.

Der Vergleich zwischen BS 8414-1 [19] und der Sockelbrandprüfung in Abbildung 6-48 zeigt, dass die thermische Beanspruchung im Eckbereich des Sockelbrandversuchs deutlich ausgeprägter ist als beim BS 8414-1 [19]. Betrachtet man die Eckwand beim Brandversuch gemäß BS 8414-1 [19] im Nahbereich zur Brandkammer werden in einer Höhe von

1,5 m bis 2,0 m oberhalb OKFF mittlere einwirkende Wärmestromdichten von 31,9 kW/m² bis 34,4 kW/m² erreicht, was zu einer ausreichenden, kritischen thermischen Beanspruchung für typische, brennbare Außenwandbekleidungen im Zusammenwirken mit der Beanspruchung der Rückwand führt. Außerdem berücksichtigt die Brandprüfung gemäß BS 8414-1 [19] gegenüber der Sockelbrandprüfung zusätzlich eine Sturzbeanspruchung und somit ein für viele Außenwandbekleidungen besonders kritisches Prüfzenario. Hinzu kommt, dass bei den Brandprüfungen gemäß BS 8414-1 [19] durch eine zusätzliche Applizierung von Außenwandbekleidungen der Abstand zwischen Außenwandbekleidung und Brandkammerlaibung reduziert wird. Dadurch ergeben sich mit hoher Wahrscheinlichkeit höhere thermische Einwirkungen auf eine Außenwandbekleidung als diese am Rohbau des Prüfstands simuliert wurden. Auf der anderen Seite sind bei den beiden Brandprüfungen inkonstante Wärmefreisetzungsraten zu erwarten, die dazu führen können, dass die thermischen Einwirkungen durchaus weiter auseinander liegen, als in den Simulationen bestimmt. Unter zusätzlicher Betrachtung der insgesamt einwirkenden Wärmeenergie auf die Prüfwand über die gesamte Prüfzeit kann die Brandprüfung gemäß BS 8414-1 [19] nicht ausreichend sicher dahingehend beurteilt werden, ob dieser im Vergleichsnachweis mit der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] hinsichtlich der thermischen Beanspruchung auf die Prüfwand mit einer applizierten Außenwandbekleidung als ausreichend übereinstimmend zu betrachten ist.

Bei den Brandprüfungen gemäß LEPIR 2 [115] und SP FIRE 105 [120] ist die mögliche kritische Eckausbildung bei Gebäuden in der Brandprüfung nicht berücksichtigt. Dadurch kann das erhöhte Risiko der Brandausbreitung in und auf Außenwandbekleidungen in diesem Bereich eines Gebäudes nicht beurteilt werden. Dadurch wird das Risiko der Brandausbreitung, infolge von Gebäudeeckwänden, unterschätzt.

Zusätzlich angeordnete Fensteröffnungen oberhalb der Brandkammer- bzw. Brandraumöffnung verringern in der Brandprüfung die insgesamt einwirkende thermische Beanspruchung einer zu prüfenden Außenwandbekleidung insbesondere im Flammen- und Flammennahbereich. Außerdem sind bei modernen Neubauten oftmals die Fensteröffnungen in einer Lochfassade so individuell gestaltet, dass eine festgelegte Anordnung im Brandversuch keinen allgemeingültigen Regelfall darstellt. Aufgrund der thermischen Einwirkungen durch mögliche Flammen oberhalb von Brandraumöffnungen sind auch die nachgebildeten Konstruktionsanschlüsse an den Fenstern nicht als ungünstiger gegenüber einer geschlossenen Außenwandbekleidung zu bewerten, da die thermische Beanspruchung in diesem Bereich so hoch ist, um unabhängig von lokalen kritischen Anschlussbereichen, eine brennbare Außenbekleidung in der Regel zu entzünden. Des Weiteren werden im Bereich oberhalb und seitlich der Brandkammer- bzw. Brandraumöffnung mögliche

notwendige Sturzkonstruktionen einer Außenwandbekleidung maßgebend beansprucht und geprüft, weshalb daraus abgeleitete brandschutztechnische Maßnahmen für jedes weitere Geschoss übertragen werden müssten.

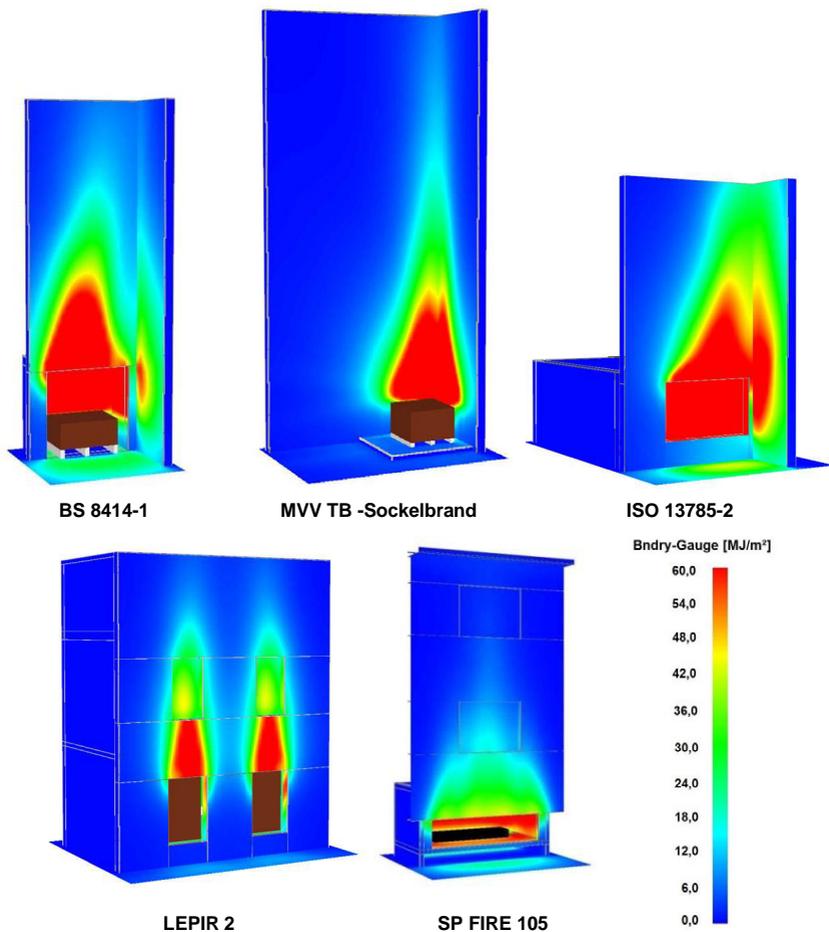


Abbildung 6-48: Visualisierung des Integrals der einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwanfläche über die Zeit in MJ/m^2

6.7 Zusammenfassung

Im Kapitel 6 wurden die vier maßgebenden, europäischen groß skalierten Brandversuche BS 8414-1 [19], ISO 13785-2 [71], LEPIR 2 [115] und SP FIRE 105 [120] zur Prüfung von Außenwandbekleidungen für den Nachweis der Begrenzung der Brandausbreitung infolge des Raumbrandszenarios numerisch untersucht. Dabei konnte für alle Brandversuche auf Grundlage der Erkenntnisse für das Prüffeuer gemäß Kapitel 5 ein ausreichend valides numerisches Modell zur Simulation der unterschiedlichen Prüfstandsgeometrien bestimmt werden. Es zeigte sich, dass unter Berücksichtigung geeigneter Simulationsmodelle für das Prüffeuer sämtliche untersuchten Prüfstandsgeometrien von groß skalierten Brandversuchen mit einer Gitterzellengröße von 10 cm ausreichend valide gegenüber experimentell durchgeführten Brandversuchen simuliert werden konnten. Auf dieser Grundlage sind bei den folgenden Untersuchungen in Kapitel 7 umfangreiche Konvergenzstudien für einzelne Modellvarianten nicht mehr erforderlich.

Die vorangegangenen Untersuchungen sind für die Forschung von groß skalierten Brandversuchen mit numerischen Modellen in FDS als wesentlicher Erkenntnisgewinn zu werten und erweitern die Validierungsgrundlagen gemäß Mcrattan et al. ([83], [85]) für den Ansatz einer ausreichenden geometrischen Diskretisierung von Brandversuchen auf Basis des charakteristischen Branddurchmessers D^* .

Des Weiteren ergeben die Erkenntnisse für die folgenden Untersuchungen in Kapitel 7 die notwendige Sicherheit auf ergänzende experimentelle Voruntersuchungen, zusätzlich zu den bereits herangezogenen Brandversuchen, für die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen zu verzichten und die Modellierungsansätze auf einen neu zu entwickelnden Prüfstand für das Raumbrandszenario in einem numerischen Modell anzuwenden.

Im Abschnitt 6.6 wurde auf Basis der zuvor durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen der groß skalierten Brandversuche eine Vergleichsbetrachtung hinsichtlich der thermischen Brandbeanspruchung der Prüfwandfläche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Ausbildung einer zusätzlichen Eckwand zu einer wesentlich kritischeren Brandbeanspruchung der Prüfwandfläche gegenüber der Ausführung ohne Eckwand führt.

Für den Brandversuch gemäß BS 8414-1 [19] konnte eine Gleichwertigkeit zur Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] nicht abschließend nachgewiesen werden. Für die Brandprüfung gemäß ISO 13785-2 [71] ist wiederum näherungsweise eine Gleichwertigkeit zur Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] gegeben. Sowohl die Brandprüfung gemäß LEPIR 2 [115] als auch gemäß SP FIRE 105 [120] können die

Brandbeanspruchung aus den Brandversuchen gemäß BS 8414-1 [19] und ISO 13785-2 [71] nicht ausreichend abdecken. Die Anordnung von simulierten Fensteröffnungen oberhalb einer Brandkammer- oder Brandraumöffnung sind im Brandversuch für den Nachweis einer Brandausbreitung in und auf Außenwandbekleidungen als nicht zielführend zu betrachten.

7 Numerische Untersuchungen zur Entwicklung eines Prüfverfahrens für Außenwandbekleidungen

7.1 Einführung

Auf Grundlage der Erkenntnisse von Kapitel 5 und 6 werden in den nachfolgenden Abschnitten Untersuchungen zur Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Begrenzung der Brandausbreitung in und auf Außenwandbekleidungen mit Hilfe von numerischen Methoden durchgeführt. Durch die erfolgreichen Validierungsansätze für das Prüfffeuer gemäß Kapitel 5 sowie für die variierenden Prüfstandsgeometrien gemäß Kapitel 6 können die untersuchten und validierten Modellierungsansätze an einem modifizierten Prüfstand mit einem zu bestimmenden Prüfffeuer mit der notwendigen Sicherheit bei der Umsetzung angewendet werden.

Für die Entwicklung des Prüfverfahrens ist es im ersten Schritt notwendig, die thermische Beanspruchung für das maßgebende Raumbrandszenario gemäß Kapitel 3 repräsentativ durch ein skaliertes Prüfffeuer an einem zu definierenden Prüfstand nachzuweisen.

Zur Simulation der zu erwartenden Flammenausbildung an der Brandraumöffnung infolge eines Raumbrandes und zur Gewährleistung einer ausreichenden Sturzbeanspruchung ist die Ausbildung einer Brandkammer oder eines Brandraums zwingend erforderlich. Nur dadurch können das Flammenbild und die thermische Beanspruchung der Prüfwand oberhalb der Öffnung und am Sturzbereich repräsentativ für ein Raumbrandszenario simuliert werden. Um den notwendigen technologischen Aufwand auf das Notwendigste zu reduzieren, muss zur Skalierung des Prüfffeuers eine Geometrie der Brandkammer bestimmt werden, welche es ermöglicht, die thermische Beanspruchung der Prüfwand repräsentativ für das maßgebende Raumbrandszenario zu erreichen, sodass gleichzeitig das Prüfffeuer gegenüber einem Raumbrand skaliert werden kann. Hierzu werden Leistungsstufen durch den Ansatz unterschiedlicher Wärmefreisetzungsraten für das Prüfffeuer untersucht. Die Temperaturverläufe entlang der Prüfwandhöhe aus den Simulationsmodellen werden mit den Ergebnissen aus der Bestimmung des kritischen Raumbrandszenarios gemäß Kapitel 3 auf Validität überprüft.

Als Prüfffeuer werden die Varianten Poolfeuer, Holzkrippe und Kompakt-Gasbrenner untersucht. Die Erläuterungen zur technischen Umsetzung der erforderlichen Wärmefreisetzungsraten durch das jeweilige Prüfffeuer erfolgt in den folgenden Abschnitten. Bei der Bestimmung des Prüfffeuers ist festzuhalten, dass die Vorteile beim Poolfeuer hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und des geringeren technologischen Aufwandes zur Bereitstellung und Umsetzung in der Brandprüfung gegenüber den Prüfffeuern mit einer

Holzkrippe oder einem Kompakt-Gasbrenner insgesamt deutlich überwiegen. Zur Gewährleistung unterschiedlicher Beanspruchungszeiten kann das Poolfeuer durch die Höhe des Füllstands gesteuert werden.

Für die Eignung des Poolfeuers gemäß der vier definierten Anforderungsmerkmale nach Abschnitt 2.5 ist der Nachweis der repräsentativen Brandbeanspruchung für das maßgebende kritische Raumbrandszenario abschließend zu führen. Resultierend aus den Ergebnissen kann darauffolgend das Prüffeuer bestimmt werden.

Auf Grundlage des bestimmten Prüffeuers wird eine Parameterstudie durchgeführt, in der die notwendige Prüfstandsgeometrie (einschließlich Brandkammer) für die Brandprüfung bestimmt wird. Mit der Festlegung der maßgebenden Geometrie für ein realitätsnahes Prüfverfahren werden zum Abschluss der numerischen Untersuchungen die wesentlichen Umgebungseinflüsse während der Durchführung der Brandprüfung untersucht und falls notwendig Empfehlungen für das Prüfverfahren abgeleitet.

7.2 Grundmodell

Die folgenden Untersuchungen dienen zum Nachweis der Übereinstimmung zwischen der thermischen Beanspruchung für das kritische Raumbrandszenario gemäß Kapitel 3 und den numerischen Modellen für die Prüffeuervarianten im Brandversuch. Dabei wurde die thermische Beanspruchung durch das maßgebende kritische Raumbrandszenario, unter Berücksichtigung einer geraden Wand mit einer Brandraumöffnung und den Abmessungen $B \times H = 2,0 \text{ m} \times 1,625 \text{ m}$, bestimmt. Aus diesem Grund wird der Prüfstand im Simulationsmodell zunächst als gerade Wand mit einer Dicke von $0,25 \text{ m}$ modelliert, umso näherungsweise gleichwertige konstruktive Randbedingungen zu gewährleisten. Die Höhe des Prüfstands über der Brandkammer beträgt bei allen Varianten 6 m (näherungsweise zwei Vollgeschosse eines Gebäudes) und die Öffnungsbreite der Brandkammern $B = 2,0 \text{ m}$. Für den Prüfstand einschließlich der Brandkammer (Wanddicken und Deckenhöhe $0,2$) wird konservativ Porenbeton als Baustoff angesetzt, sodass die Wärmeabsorption gegenüber alternativen Baustoffen wie Beton oder Kalksandstein reduziert wird. Die materialspezifischen Kennwerte wurden analog den vorangegangenen Validierungsversuchen gemäß Anlage F verwendet. In Abbildung 7-1 ist der Untersuchungsablauf für das Grundmodell „gerade Wand“ dargestellt.

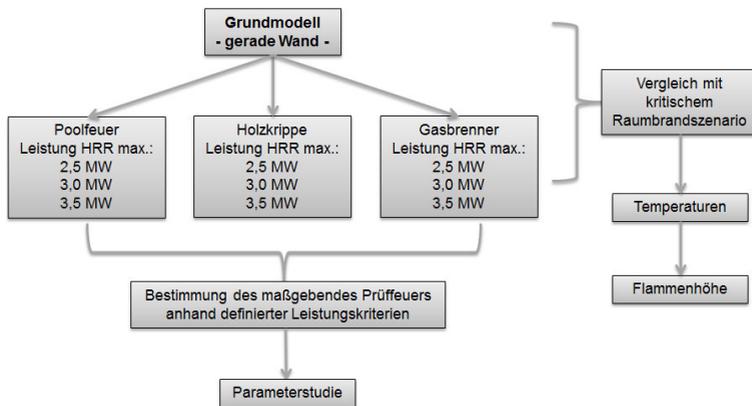


Abbildung 7-1: Darstellung der Untersuchungsschritte zur Bestimmung eines maßgebenden Prüffeuers im Simulationsmodell für das kritische Raumbrandszenarios

Für das Prüffeuere werden insgesamt drei Leistungsstufen mit 2,5, 3,0 und 3,5 MW für die Wärmefreisetzungsrates simuliert. Die Brennstoffparameter für das Poolfeuer mit Isopropanol sind dem Abschnitt 5.4, für die Holzkrippe mit Fichtenholz dem Abschnitt 5.3 und für den Gasbrenner für Propan dem Abschnitt 5.2 zu entnehmen. Der Heizwert für reines Propan wurde mit $H_{u,eff} = 46,36 \text{ MJ/kg}$ berücksichtigt.

7.2.1 Randbedingungen Simulationsmodelle

Der Nachweis zur erforderlichen Brandkammergeometrie des Poolfeuerversuchs im Simulationsmodell wird in Abschnitt 7.3 geführt. Die Geometrien der Brandkammern für das Simulationsmodell mit der Holzkrippe wird gemäß BS 8414-1/-2 ([19], [20]) sowie das mit dem Gasbrenner gemäß DIN 4102-20 [32] aus den Anforderungen der jeweiligen Norm abgeleitet.

Für alle Simulationsmodelle wurde eine Gitterzellengröße von 10 cm gewählt. Auf Basis der Erkenntnisse von Kapitel 5 und Kapitel 6 ist keine Konvergenzstudie mehr erforderlich. Die Simulationszeit des Poolfeuer- und Gasbrennermodells wurde jeweils zu 1.800 Sekunden und die des Holzkruppenmodells zu 2.400 Sekunden festgelegt. Für die Auswertung der maßgebenden thermischen Beanspruchung der Prüfwand ist die Vollbrandphase entscheidend. Diese wurde gemäß den Anforderungen aus Kapitel 2 mit 20 Minuten berücksichtigt. Detaillierte Erläuterungen zu den Prüfueern sind den nachfolgenden Abschnitten zu entnehmen.

7.2.2 Poolfeuer

In Abbildung 7-2 ist die geometrische Implementierung des Simulationsmodells für das Poolfeuer dargestellt. Dabei weist die Brandkammer eine lichte Höhe von 1,5 m auf. Rückseitig ist zur Gewährleistung einer ausreichenden Luftzufuhr für die Verbrennung des Brennstoffs Isopropanol, eine Zuluftöffnung mit den Abmessungen $B \times H = 2,0 \text{ m} \times 0,3 \text{ m}$ vorgesehen. Die Vorderkante der Kühlwanne ist bündig zur Stirnseite des Brandkammersturzes angeordnet.

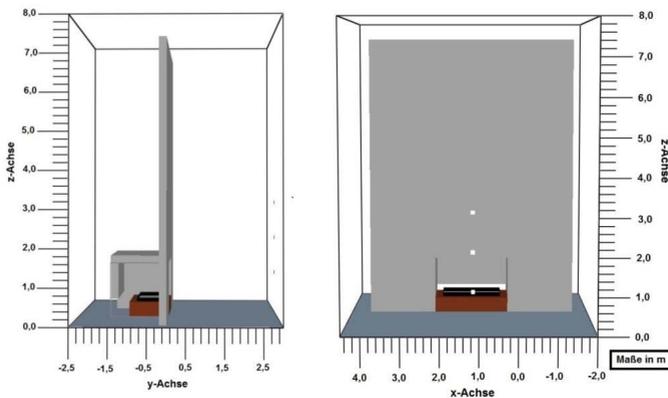


Abbildung 7-2: Geometrische Darstellung des Simulationsmodells des Poolfeuerversuchs in FDS

Der Abstand zwischen der Rückwand der Brandkammer und der Kühlwanne beträgt bei den drei untersuchten Varianten 0,3 m, sodass die Länge der Brandkammer zwischen 1,2 m und 1,4 m variiert.

Die Poolwanne wird mittig in die mit Wasser gefüllte Kühlwanne, mit den Abmessungen gemäß Tabelle 7-1, positioniert und mit einem Abstand von 0,1 m zum Kühlwannenboden aufgeständert sowie mit dieser rückverankert. Unterhalb und seitlich der Poolwanne kann dadurch eine ausreichende Wassermenge die Kühlung gewährleisten, um ein mögliches Sieden des Brennstoffs zu vermeiden. Der skizzierte Aufbau der beschriebenen Poolfeuerkonstruktion kann der Anlage E entnommen werden.

Unterhalb der beiden Wannenkonstruktionen ist zur Messung der Massenverluste über die Zeit eine Abbrandwaage mit einer Aufbauhöhe von ca. 0,2 m vorgesehen. Zum bündigen seitlichen Abschluss zwischen Poolfeuerkonstruktion und Brandkammer können die Hohlräume mit mineralischen Platten aus Steinwolle ausgelegt werden. Dadurch kann auch die Abbrandwaage vor Temperatureinwirkungen geschützt werden. Die Aufbauhöhe der Konstruktion ergibt sich insgesamt zu 0,5 m zuzüglich eines Überstandes der Poolwände von 0,1 m oberhalb der Kühlwanne.

Die Wärmefreisetzungsraten des Poolfeuers mit Isopropanol stehen im unmittelbaren Zusammenhang mit der Grundfläche der Poolwanne. In einer Voruntersuchung wurden die notwendigen Grundflächen im Zusammenwirken mit dem Einfluss der Umfassungsbauteile sowie den Strömungs- und Druckverhältnissen in der Brandkammer numerisch bestimmt, sodass sich die in Tabelle 7-1 dargestellten Abmessungen zur Gewährleistung der notwendigen Wärmefreisetzungsraten erforderlich sind.

Tabelle 7-1: Randbedingungen der Kühlwanne und des Poolfeuers in Abhängigkeit der Simulationsvariante und einer zu gewährleistenden kritischen Brandbeanspruchungsdauer von 1.200 Sekunden

Variante	Kühlwanne B x L x H [m]	Poolwanne B x L x H [m]	Füllhöhe [m]	Volumen Brennstoff [Liter]	Masse Brennstoff [kg]	eff. Heizwert $H_{u,eff}$ [MJ/kg]
Pool_2_5MW	1,9 x 0,9 x 0,3	1,6 x 0,5 x 0,3	0,17	136,0	106,9	31,3
Pool_3_0MW	1,9 x 1,0 x 0,3	1,6 x 0,6 x 0,3		163,2	128,3	
Pool_3_5MW	1,9 x 1,1 x 0,3	1,6 x 0,7 x 0,3		190,4	149,7	

Zur Gewährleistung einer Vollbrandphase von 20 Minuten, sind die ausgewiesenen Massen von Isopropanol für die jeweilige Variante vorzusehen. Das Pyrolysemodell einschließlich der erforderlichen Brennstoffparameter ist, wie bereits zuvor beschrieben, gemäß Abschnitt 5.4 übernommen worden.

Die Abbildung 7-3 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsraten während der simulierten Brandprüfung. Zwischen der 300. und der 1.200. Prüfsekunde wird für die Variante Pool_2_5MW eine mittlere Wärmefreisetzungsrate von 2,57 MW, bei der Variante Pool_3_0MW von 2,98 MW und bei der Variante Pool_3_5MW von 3,47 MW erzielt. Die Abklingphase der Varianten wird erst nach einer umgesetzten Masse bei der Verbrennung von $\geq 90\%$ eingeleitet und zeigt somit ein verlängerte Vollbrandphase gegenüber den Simulationsvarianten gemäß Abschnitt 5.4.

Somit zeigen die gewählten Pyrolyseansätze einschließlich der geometrischen Randbedingungen der Varianten der Poolfeuer eine gute Übereinstimmung mit den zu erzielenden Wärmefreisetzungsdaten während der Vollbrandphase. Im Weiteren wird aus dem simulierten Verlauf der Wärmefreisetzungen mit Hilfe des Pyrolysemodells das konstante Plateau für das Poolfeuer während der Vollbrandphase deutlich. Hieraus lässt sich eine gute Reproduzierbarkeit des Poolfeuers in der Simulation ableiten.

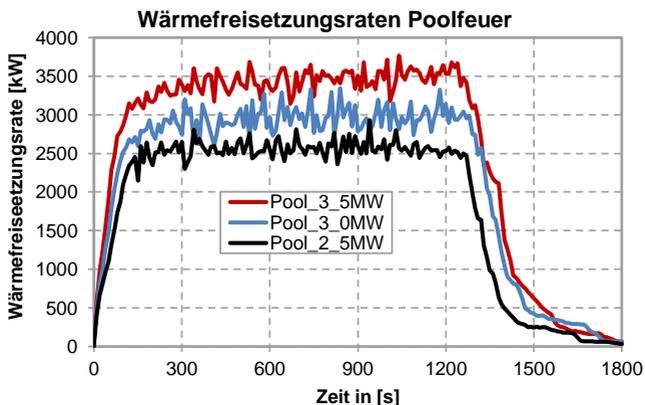


Abbildung 7-3: Modellierte Wärmefreisetzungsdaten auf Grundlage des in FDS implementierten Pyrolysemodells für Flüssigkeitsbrände

7.2.3 Holzkrippe

Das geometrische Simulationsmodell des Brandversuchs mit einer einzelnen Holzkrippe in einer Brandkammer ist in Abbildung 7-4 dargestellt. Die Brandkammer wurde mit den Abmessungen $B \times L \times H = 2,0 \text{ m} \times 1,1 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$ gewählt und orientiert sich an den geometrischen Randbedingungen gemäß BS 8414-1/2 ([19], [20]). Zur besseren Umgebungslufteinmischung in die Holzkrippe wird diese auf drei Linienauflagern, aufgeständert. Die Vorderseite der Holzkrippe wird bündig zur Stirnseite des Brandkammersturzes positioniert. Zur Modellierung des Prüffeuer wurde die Variante BS1b

gemäß Abschnitt 6.2 berücksichtigt, da diese bei der Validierung für den Brandversuch näherungsweise gemäß BS 8414-1 [19] die größte Übereinstimmung bei einer Gitterzellen-größe von 10 cm erzielte.

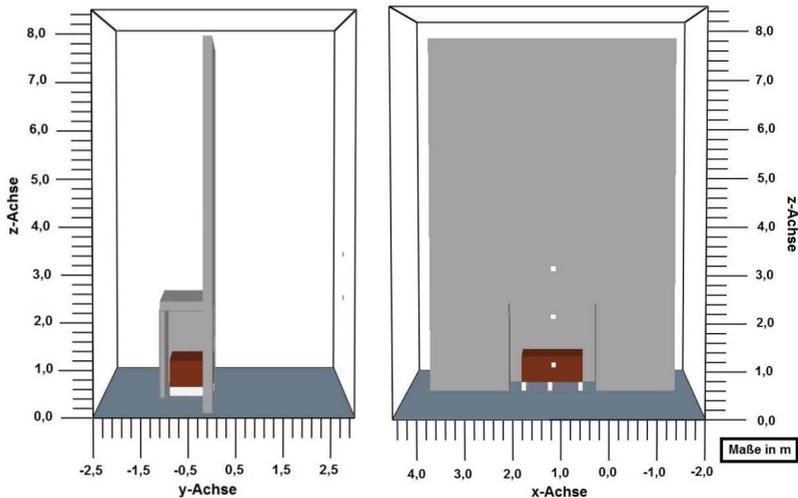


Abbildung 7-4: Geometrische Darstellung des Simulationsmodells des Holzrippenversuchs in FDS

Auf Grundlage der festgelegten Simulationsvarianten sind drei Leistungsstufen für die Wärmefreisetzungsrate vorzusehen. Gemäß Abschnitt 2.5.4 erzielt der empirische Ansatz aus BiR ([132], [133]) bei einer Holzkrippe mit den Abmessungen $b \times l \times h_c = 1,5 \times 1,0 \times 1,1$ m und einer Masse von ca. 400 kg die größte Übereinstimmung zwischen Experiment und Berechnungsansätzen. Aufgrund der ähnlichen Abmessungen und Massen sowie dem analogen Stab-Luft-Verhältnis für die Simulationsvarianten werden die geometrischen Abmessungen der Holzrippen gemäß Gl. (10-2) auf Basis der erforderlichen Wärmefreisetzungsrate ermittelt. Die Bestimmung des Verlaufs für die Brandentstehungs- und Abklingphase erfolgt gemäß dem Ansatz aus Abschnitt 2.5.4. Durch die Festlegung der Brandkammergeometrie kann die Steuerung der Wärmefreisetzungsrate nur über die Anpassung der Höhe der Holzkrippe, auf Grundlage Gl. (10-2), als Variationsmöglichkeit erfolgen.

Die Tabelle 7-2 fasst die notwendigen Abmessungen zur Gewährleistung der Wärmefreisetzungsrate für die Varianten zusammen. Bei der Masse wurde dabei eine Rohdichte von $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$ angesetzt. Der angesetzte effektive Heizwert ergibt sich für Fichtenholz analog den bisher durchgeführten Validierungsuntersuchungen mit Holzrippen und den ergänzenden Erläuterung gemäß Abschnitt 2.5.

Tabelle 7-2: Randbedingungen der Holzrippen in Abhängigkeit der Simulationsvariante

Variante	Maße Krippe b x l x h _c [m]	Maße Stab D x B [m]	Stab / Luft	Masse Brennstoff [kg]	eff. Heizwert H _{u,eff} [MJ/kg]
Holz_2_5MW	1,5 x 1,0 x 0,8	0,05 x 0,05	1/1	270,0	17,28
Holz_3_0MW	1,5 x 1,0 x 0,95			320,6	
Holz_3_5MW	1,5 x 1,0 x 1,15			388,1	

Auf Grundlage der Randbedingungen der Holzrippenvarianten ergibt sich in der Vollbrandphase für die Variante Holz_2_5MW eine mittlere Wärmefreisetzungsrate von 2,57 MW, für die Variante Holz_3_0MW von 2,99 MW und für die Variante Holz_3_5MW von 3,49 MW. Aufgrund der Vorgabe der Pyrolyserate für die Holzrippe in FDS werden für die Simulation die Wärmefreisetzungsraten vereinfacht auf den Sollwert der jeweiligen Variante angepasst und im Simulationsmodell implementiert.

Die Abbildung 7-5 zeigt den registrierten Verlauf der Wärmefreisetzungsrate für eine ausgewiesene Simulationsdauer von 2.400 Sekunden. Für die Untersuchungen ist der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate während der Vollbrandphase maßgebend. Diese ist für die drei Varianten mit der 1.800. Prüfsekunde abgeschlossen. Beim Verlauf der Wärmefreisetzungsrate ist zu beachten, dass die Konstanz in der Vollbrandphase im Experiment nicht erzielbar ist.

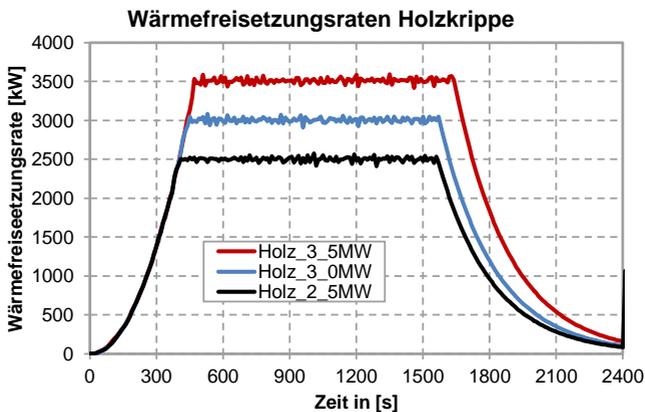


Abbildung 7-5: Modellierte Wärmefreisetzungsraten der Holzrippen auf Grundlage des implementierten vorgegebenen Verlaufs in FDS

7.2.4 Kompakt-Gasbrenner

In Abbildung 7-6 ist das numerische Modell für die Simulationsversuche mit dem Kompakt-Gasbrenner dargestellt. Die Abmessungen der Brandkammer in der Simulation betragen $B \times L \times H = 2,0 \text{ m} \times 1,6 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$.

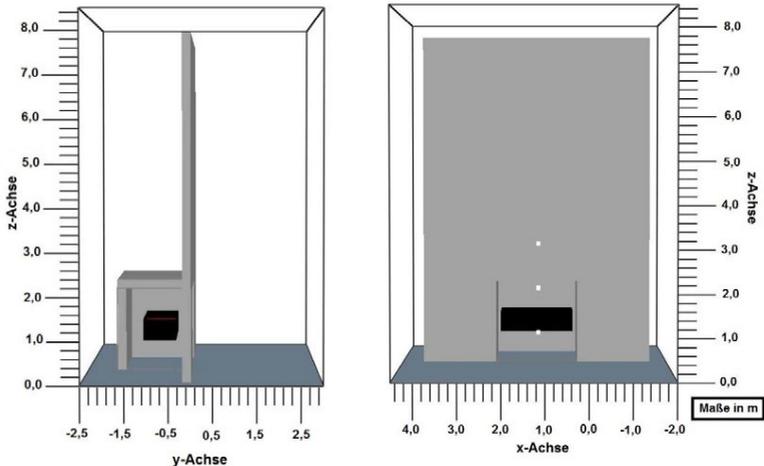


Abbildung 7-6: Geometrische Darstellung des Simulationsmodells des Gasbrennerversuchs in FDS

Der Kompakt-Gasbrenner ist in der Brandkammer mittig positioniert, sodass insbesondere vom unteren Drittel der Brandkammer Umgebungsluft in den rückseitigen Bereich des Kompakt-Gasbrenners gelangen kann. Dadurch kann eine näherungsweise laminare Strömung zur Einmischung der Umgebungsluft in die Prüf Flamme erzielt werden.

Die Tabelle 7-3 stellt die wesentlichen Randbedingungen zur Gewährleistung der erforderlichen Wärmefreisetzungsrate über eine Beanspruchungsdauer von 1.200 Sekunden während der Vollbrandphase dar. Die ausgewiesene Luftzufuhr des Brenners orientiert sich an die Parameter aus den experimentellen Untersuchungen gemäß Abschnitt 5.2 und wurde unter Bezugnahme der höheren Wärmefreisetzungsrate linear interpoliert. Dabei ist die Luftzufuhr zum Brenner nicht mit dem erforderlichen Luftbedarf zur Verbrennung von Propan mit 15,5 kg Luft pro kg Brennstoff [118] zu verwechseln. Dieser wird durch die Luftzufuhr in den Brenner nur mit ca. 9 % abgedeckt. Experimentelle Untersuchungen an der MFPA Leipzig haben diesbezüglich gezeigt, dass ohne Luftzufuhr zur Mischung des Brennstoffs im Kompakt-Gasbrenner keine Entzündung erfolgt [92].

Tabelle 7-3: Randbedingungen des Kompakt-Gasbrenners in Abhängigkeit der Simulationsvariante für eine Beanspruchungszeit von 1.200 Sekunden

Variante	Gasbrenner B x L x H [m]	Gas- durchsatz [g/s]	Masse Brennstoff [kg]	Volumen Brennstoff [Liter]	Luftzufuhr Brenner [l/s]	eff. Heizwert $H_{u,eff}$ [MJ/kg]
Gas_2_5MW	1,8 x 0,8 x 0,5	53,9	64,7	126,8	46,0	46,36
Gas_3_0MW		64,7	77,6	152,2	55,5	
Gas_3_5MW		75,5	90,6	177,6	64,8	

Die Leistung des Brenners wird in FDS durch die Vorgabe der Wärmefreisetzungsrate gemäß dem Ansatz der Variante Var2 aus Abschnitt 5.2 simuliert. Äquivalent zum Holzkrippenversuch werden für die Simulationsmodelle die Wärmefreisetzungsraten vereinfacht auf den Sollwert der jeweiligen Leistungsstufe angepasst und in FDS implementiert. In Abbildung 7-7 ist der gemessene Verlauf der Wärmefreisetzungsrate im Zeitintervall von 10 Sekunden aus den Simulationsergebnissen dargestellt.

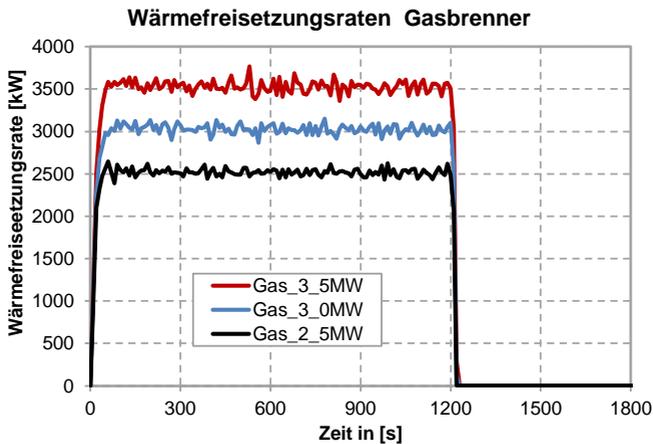


Abbildung 7-7: Modellierter Wärmefreisetzungsrate des Kompakt-Gasbrenners auf Grundlage des implementierten vorgegebenen Verlaufs in FDS

7.2.5 Messdaten

Die Temperaturbestimmung der flammenwirksamen, thermischen Beanspruchung im Simulationsmodell erfolgt durch Mantelthermoelemente, welche in einer Messbaumstruktur angeordnet sind. Dabei werden die Temperaturen durch Mantelthermoelemente vor der Fassade auf der Höhenachse Z (1-16), in der Längen-/ Tiefenachse Y (I-VIII) und der

Breitenachse (F-L) gemessen. Die Anordnung erfolgt analog den Raumbrandversuchen gemäß BiR ([138], [139]), sodass eine Gleichwertigkeit aus dem Berechnungsansatz nach Anlage C für die Flammentemperaturen, abgeleitet werden kann. Die Mantelthermoelemente NiCr-Ni Typ K werden gemäß JEC 584 Teil 1 mit einem Thermodrahtdurchmesser von 0,37 mm und einem Manteldurchmesser von 3 mm vorgesehen. Ergänzt werden die registrierten Messdaten durch die Bestimmung der Wärmestromdichten und Oberflächentemperaturen auf der Prüfwand. Bei den zugrunde gelegten Brandversuchen in dieser Arbeit sowie bei den Validierungsversuchen wurde als kleinstes Messintervall ein Intervall von 10 Sekunden berücksichtigt, weshalb bei den folgenden Simulationsmodellen dieser Ansatz des Intervalls weiterhin Bestand hat. Eine Übersicht zu den gewählten Messstellen zeigt die Abbildung 7-8.

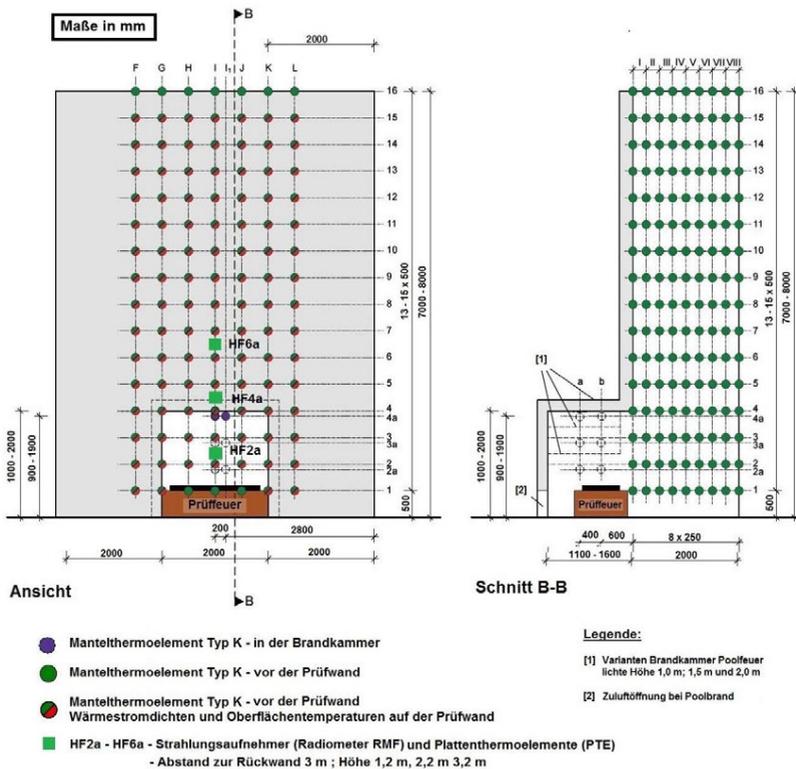


Abbildung 7-8: Variation der geometrischen und messtechnischen Ausführung der Grundmodellvarianten für die einzelnen Prüffeuertypen

7.2.6 Ergebnisse

Auf Grundlage der Prüfeuervarianten werden in diesem Abschnitt die maßgebenden mittleren Temperaturen während der Vollbrandphase entlang der Flammenachse aus den Simulationsmodellen bestimmt. Diese werden den Ergebnissen der Temperaturen aus der Bestimmung des kritischen Raumbrandszenarios gemäß Abschnitt 3.5 gegenübergestellt. Daraus kann die erforderliche Leistung des skalierten Prüfeuvers unter Berücksichtigung der definierten Brandkammergeometrie bestimmt werden. In Abbildung 7-9 wird im ersten Untersuchungsschritt zunächst der Temperaturverlauf in der Hauptachse der Flamme bis zu einer Höhe von 3,5 m über Sturz ausgewertet.

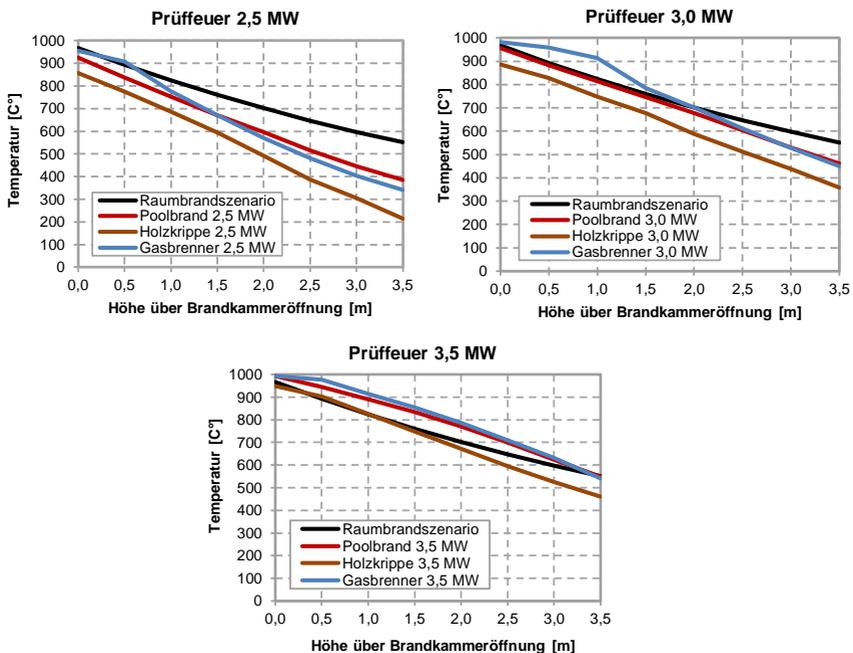


Abbildung 7-9: Gegenüberstellung der Temperaturen entlang der Flammenachse vom kritischen Raumbrandszenario und den Simulationsmodellen der Prüfeuervarianten

Für die Prüfeuervarianten mit einer Wärmefreisetzungsrate von ca. 2,5 MW kann keine ausreichende Übereinstimmung zwischen dem Raumbrandszenario und den Simulationsmodellen erzielt werden. Die erforderlichen Temperaturen können lediglich mittels Gasbrenner bis zu einer Höhe von 0,5 m über Sturz abgedeckt werden. Dabei wird aufgezeigt, dass die Holzkruppenvariante hinsichtlich der Temperaturverläufe in der Flammenachse deutlich unterhalb der beiden anderen Varianten verläuft.

Ab einer Prüffeuereistung von 3,0 MW können sowohl die Variante Gasbrenner als auch die Variante Poolfeuer das Raumbrandszenario bis zu einer Höhe von 2 m abdecken. Über 2 m Höhe hinaus nehmen die mittleren Temperaturen während der Vollbrandphase gegenüber dem Raumbrandszenario deutlich ab, sodass insgesamt keine ausreichende Validität erzielt wird.

Erst mit dem Ansatz einer Prüffeuereistung von 3,5 MW kann das maßgebende Raumbrandszenario gemäß Abschnitt 3.5 durch die Varianten Poolfeuer und Gasbrenner vollständig abgedeckt werden. Die Variante Holzkrippe zeigt im Vergleich mit den Temperaturen aus dem Raumbrandszenario, bis zu einer Höhe 1,5 m, eine ausreichende Übereinstimmung auf. Über diese Höhe hinaus verliert die Flamme jedoch deutlich an thermischer Energie, sodass die Temperaturen aus dem Raumbrandszenario nicht mehr erreicht werden können.

Mit der Auswertung der Temperaturen entlang der Flammenachse konnte nachgewiesen werden, dass das Poolfeuer mit einer Wärmefreisetzungsrate von 3,5 MW eine ausreichende Abdeckung der Temperaturverläufe aus dem maßgebenden kritischen Raumbrandszenario erzielt. Damit sind die vier definierten Leistungskriterien für ein Prüfffeuer gemäß Abschnitt 2.5 für das Poolfeuer erfüllt. Um die notwendige Sicherheit hinsichtlich einer vergleichbaren quantitativen thermischen Beanspruchung einer Prüfwan zwischen Prüfffeuer und Raumbrandszenario zu erhalten, wird im zweiten Untersuchungsschritt die einwirkenden Wärmestromdichten auf die Prüfwanfläche oberhalb der Brandraum- bzw. der Brandkammeröffnung bestimmt. Zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse wird die quantitative Auswertung auf Basis der Temperaturermittlungen an den ausgewiesenen Temperaturmessstellen für das Raumbrandszenario gemäß Abbildung 3-7 durchgeführt.

In Abbildung 7-10 sind die gemittelten Temperaturen während der Vollbrandphase oberhalb der Brandkammer bis zur Flammenspitze von ca. 3,5 m dargestellt. Die für die Temperaturen zugrunde gelegten maßgebenden Messpunkte in der y-Achse wurden ausschließlich in der Messebene I und II bestimmt. Daraus ist zu schließen, dass sich die Flamme oberhalb der Brandkammeröffnung unmittelbar an die Prüfwan legt.

Die einwirkende Wärmestromdichte auf die Prüfwan wird oberhalb der Öffnung bis zu einer Höhe von 3,5 m und über die volle Breite der Öffnung von 2,0 m für das maßgebende kritische Raumbrandszenario und das Prüfffeuermodell Pool_3_5MW bestimmt. Als Berechnungsgrundlage dient der Ansatz zur Bestimmung der Netto-Wärmestromdichte gemäß EC 1-1-2 Gleichungen (3.1), (3.2) und (3.3) [37]. Die ausführlichen Berechnungsschritte einschließlich der angesetzten brandtechnischen Parameter sind der Anlage E zu entnehmen.

x-Achse	G	H	I	J	K	Höhe über Sturz z-Achse [m]
Breite	1,0 m	0,5 m	0,0 m	0,5 m	1,0 m	
Temperaturen entlang der Flammenachse	118	308	549	360	142	3,5
	125	344	624	411	154	3,0
	138	395	699	480	172	2,5
	155	470	770	570	198	2,0
	182	579	834	691	234	1,5
	223	745	891	844	297	1,0
	306	954	946	984	427	0,5
	550	957	993	997	786	0,0

Brandkammeröffnung B x H = 2,0 x 1,5 [m]

Abbildung 7-10: Gemittelte Temperaturen über der Brandkammeröffnung für das Simulationsmodell Pool_3_5MW

Die einwirkenden Wärmestromdichten bezogen auf das Flächenintegral des untersuchten Ausschnitts der Prüfwandfläche oberhalb der Brandraumöffnung mit den Abmessungen $B \times H = 2,0 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$ ergibt für das maßgebende kritische Raumbrandszenario einen Betrag von 379 kW. Für das Prüffeuermmodell Pool_3_5MW wurde, bezogen auf die gleiche Prüfwandfläche, ein einwirkender Wärmestrom von 422 kW bestimmt. Daraus ergibt sich für den untersuchten Ausschnitt der Prüfwandfläche eine Überschätzung des einwirkenden Wärmestroms des Prüffeuermodells von ca. 10 %. Gemäß Abschnitt 4.3.2.1 ist unter Berücksichtigung der zu erwartenden Unsicherheiten bei der Messung der Heißgastemperaturen im Experiment und in der Simulation von 14 % möglich. Aus diesem Grund ist zwischen den berechneten Einwirkungsgrößen der einwirkenden Wärmestromdichten eine ausreichende Übereinstimmung gewährleistet. Des Weiteren ist zu erwarten, dass sich die insgesamt einwirkenden Wärmeströme bei einem größeren Ausschnitt der Prüfwandfläche weiter annähern, da im Simulationsmodell die Temperaturen im Heißgasstrom oberhalb der wirksamen Flamme schneller abnehmen als beim Raumbrandszenario.

7.2.7 Fazit

Bei der Untersuchung zur Bestimmung des maßgebenden Prüffeuers konnte sowohl für die Variante mit einem Poolfeuer als auch mit dem Kompakt-Gasbrenner eine ausreichende Abdeckung der zu erwartenden Temperaturverläufe aus dem kritischen Raumbrandszenario gemäß Kapitel 3 erzielt werden. Aufgrund des geringeren technologischen Aufwands zur Durchführung des Brandversuchs mit dem Poolfeuer wird dieser als finaler Prüffeuertyp für die weiteren Untersuchungen festgelegt.

7.3 Parameterstudie

Das Ablaufschema für die nachfolgende Parameterstudie ist in Abbildung 7-11 detailliert dargestellt. Für die Entwicklung des Prüfverfahrens muss zunächst die notwendige Prüfstandsgeometrie bestimmt werden, um realitätsnah das maßgebende Raumbrandszenario simulieren zu können. Das zugrunde gelegte Prüffeuere wird, wie bereits beschrieben, als Poolfeuer mit einer Wärmefreisetzungsrate von ca. 3,5 MW vorgesehen.

Auf Basis der Prüfstandsgeometrie aus dem Grundlagenmodell mit einer Höhe von 6 m über dem Brandkammersturz werden zunächst die Einflüsse unterschiedlicher Brandkammerhöhen, zur rückseitigen Zuluftöffnung sowie für die Materialeigenschaften der Brandkammer untersucht. Mit dem Ergebnis der finalisierten Brandkammergeometrie werden die Auswirkungen von Eckwänden sowie U-förmigen Wänden auf die thermische Beanspruchung der Prüfwand bestimmt.

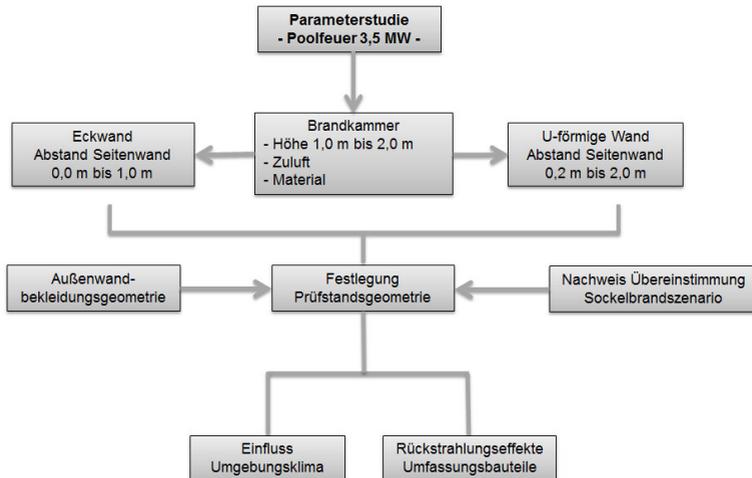


Abbildung 7-11: Darstellung der notwendigen Untersuchungsschritte in der Parameterstudie zur Bestimmung der Prüfstandsgeometrie sowie weiterer Randbedingungen für das Prüfverfahren

Auf Grundlage der gesammelten Ergebnisse wird die Prüfstandsgeometrie für das zu entwickelnde Prüfverfahren festgelegt. Durch die Simulation möglicher Aufbauten von typischen Außenwandbekleidungen werden im Weiteren die geänderten thermischen Beanspruchungen des Prüfaufbaus gegenüber der Rohbauwand realitätsnah bestimmt. Darauf aufbauend kann dann der Nachweis zur Übereinstimmung mit dem Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] durchgeführt werden. Erst durch diese Untersuchung kann

final bestimmt werden, ob die festgelegte Prüfstandsgeometrie mit dem definierten Prüffeuere die Sockelbrandprüfung und die untersuchten europäischen Prüfverfahren gemäß Abschnitt 6.6 gleichwertig ersetzen kann. Eine Untersuchung beim Sockelbrandversuch mit zusätzlichen Prüfaufbauten ist dabei nicht notwendig, da bei diesem Brandversuch der Abstand des Prüffeuers zur Prüfwand grundsätzlich immer gleich angeordnet ist.

Im Zuge der weiteren Untersuchungen werden die Einflüsse der wesentlichen Umgebungsbedingungen auf den Brandversuch geprüft. Hinsichtlich der klimatischen Randbedingungen werden die Einflüsse der Umgebungstemperatur sowie der relativen Luftfeuchten insbesondere auf den Verbrennungsprozess des Poolfeuere bestimmt. Der Einfluss der thermischen Beanspruchung der Prüfwand durch Sonneneinstrahlung und der Umgebungstemperatur wurde bereits in Abschnitt 3.6.3 erläutert.

Zum Abschluss der Parameterstudie werden die Rückstrahlungseffekte der Umfassungsgeometrie der Prüfhalle auf den Brandversuch bestimmt. Auf Grundlage der Ergebnisse sollen Mindestabstände der Umfassungsbauteile definiert werden, die einen möglichst reproduzierbaren Brandversuch ermöglichen.

Bei den nachfolgenden Simulationsversuchen wurde eine Gitterzellengröße von 10 cm verwendet. Das Messintervall für die Ausgangsparameter aus der Simulation wurde mit 10 Sekunden gewählt. Das verwendete Prüffeueremodell basiert auf der Herleitung gemäß Abschnitt 7.2.2 für die Simulationsvariante Pool_3_5MW sowie den brandtechnischen Eingangsparametern gemäß Abschnitt 5.4. Für alle Simulationen wurde eine Prüfzeit von 1.800 Sekunden, unter Berücksichtigung einer ausreichenden Abklingphase, angesetzt. Der Prüfstand einschließlich der Brandkammer wird analog zum Grundmodell aus dem Material Porenbeton vorgesehen.

7.3.1 Brandkammer

7.3.1.1 Einfluss der Höhe

Nachfolgend wird der Einfluss der Brandkammerhöhe auf die thermische Beanspruchung der Prüfwand sowie auf den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate untersucht. Die Untersuchungen erfolgten am Prüfstand des „Grundmodells“ gemäß Abschnitt 7.2.2 mit einer geraden Wand einschließlich rückseitiger Zuluftöffnung. Bei den Simulationsvarianten wurden unterschiedliche Brandkammerhöhen von 1,0 m bis 2,0 m (Erhöhung der Brandkammerhöhe beginnend ab 1,0 m jeweils um 0,1 m), berücksichtigt. Im Weiteren werden die Ergebnisse für die maßgebenden Brandkammerhöhen 1,0, 1,5 und 2,0 m dargestellt. Die Messstellen entsprechend den Angaben nach Abbildung 7-8.

Die Ergebnisse für den Verlauf der Wärmefreisetzungsraten sind in Abbildung 7-12 darstellt. Aus dem Verlauf ist erkennbar, dass die Brandkammerhöhe einen signifikanten Einfluss auf den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate hat. Besonders deutlich unterscheidet sich dabei die Variante mit einer Brandkammerhöhe von 1,0 m gegenüber den weiteren ausgewiesenen Varianten mit 1,5 m und 2,0 m Höhe. Bei der Variante mit einer Brandkammerhöhe von 1,0 m wird eine mittlere Wärmefreisetzungsrate von 2,11 MW von der 300. bis zur 1.800. Prüfsekunde sowie eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 2,32 MW erzielt. Die Abklingphase wurde innerhalb der Simulationsdauer von 1.800 Sekunden nicht erreicht. Die Brandkammerhöhe kann somit für den Brandversuch als nicht geeignet betrachtet werden.

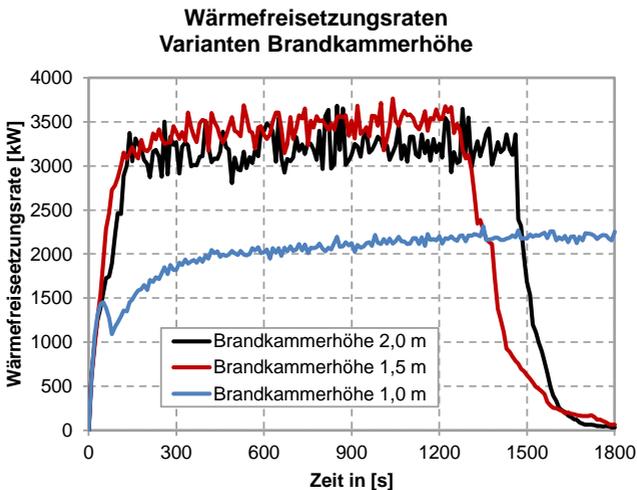


Abbildung 7-12: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Prüfzeit für die Simulationsmodelle mit einer Brandkammerhöhe von 1,0 m, 1,5 m sowie 2,0 m

Bei der Variante mit einer Brandkammerhöhe von 2,0 m wird aufgrund der geänderten Strömungs- und Druckverhältnisse in der Brandkammer, gegenüber der Variante mit einer Brandkammerhöhe von 1,5 m, eine mittlere Wärmefreisetzungsrate von 3,2 MW von der 150. bis zur 1.450. Prüfsekunde sowie eine max. Wärmefreisetzungsrate über die gesamte Prüfzeit von 3,68 MW erzielt. Dem gegenüber erzielt die Variante mit einer Brandkammerhöhe von 1,5 m eine mittlere Wärmefreisetzungsrate von 3,44 MW von der 150. bis zur 1.350. Prüfsekunde sowie eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 3,77 MW.

Die freigesetzte Wärmeenergie aus dem Prüffeuer beträgt bei einer Brandkammerhöhe von 1,5 m insgesamt 4.602 MJ bis zur 1.500. Prüfsekunde sowie bei einer Brandkammerhöhe von 2,0 m insgesamt 4.579 MJ bis zur 1.500. Prüfsekunde. Unter Betrachtung der längeren

Vollbrandphase des Poolfeuers bei einer Brandkammerhöhe von 2,0 m werden zwischen den Varianten (BK = 1,5 m und BK = 2,0 m) nahezu die gleichen Energiemengen bis zur 1.500. Prüfsekunde freigesetzt. Diesbezüglich erzielen somit beide Varianten nahezu eine Gleichwertigkeit. Die relative Abweichung zwischen den mittleren Wärmefreisetzungsraten beträgt ca. 7,5 % und wäre somit grundsätzlich bei einem groß skalierten Brandversuch als tolerierbar zu betrachten.

Als ungünstig ist allerdings der variable Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in der Vollbrandphase in der Simulationsvariante mit einer Brandkammerhöhe von 2,0 m zu bewerten. Dadurch ergibt sich bei dieser Simulationsvariante ein höheres pulsierendes Flammenbild gegenüber der Variante mit einer Brandkammerhöhe von 1,5 m. Dies kann zu Unsicherheiten bei der Betrachtung lokaler thermischer Beanspruchungen führen. Außerdem erhöht sich der Flammenweg vom Prüffeuere bis zur Prüfwand um 0,5 m, was zu einer Reduzierung der thermischen Beanspruchung der Prüfwand führt und somit nicht zielführend für den Ansatz eines zu skalierenden Prüffeuers ist.

In Abbildung 7-13 sind die Flammenhöhen und die Flammenausbildungen der Simulationsvarianten während der Vollbrandphase gegenübergestellt. Daraus wird ersichtlich, dass bei einer Brandkammerhöhe von 1,0 m sich die neutrale Ebene an der Öffnung nicht in der x-y-Ebene senkrecht zur x-z-Ebene, sondern in der y-z-Ebene senkrecht zur x-z-Ebene einstellt. Aus dem Flammenbild wird somit ergänzend deutlich, dass eine Brandkammerhöhe von 1,0 m aufgrund des seitlichen Austritts der Flammen an der Brandkammeröffnung nicht für den Brandversuch geeignet ist.

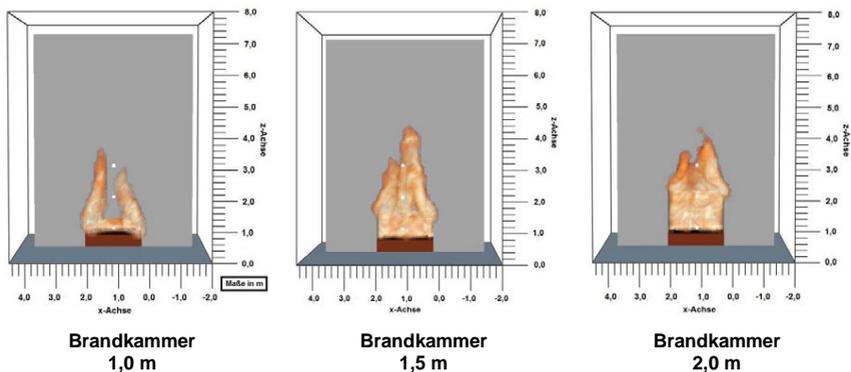


Abbildung 7-13: Darstellung der Flammenausbildung und -höhen während der Vollbrandphase für die Simulationsvarianten mit einer Brandkammerhöhe von 1,0 m, 1,5 m sowie 2,0 m

Bei der Flammenausbildung sowie der Flammenhöhe über dem Prüffeuere ergeben sich zwischen den Varianten mit einer Brandkammerhöhe von 1,5 m und 2,0 m keine signifikanten Unterschiede. Die vorangegangenen Feststellungen bleiben davon unberührt.

Die erforderliche Brandkammerhöhe für die Simulationsvariante Prüffeuere Pool_3_5MW wird aufgrund der Ergebnisse aus den Untersuchungen mit einer lichten Höhe von 1,5 m festgelegt.

7.3.1.2 Einfluss der Zuluft

Aufgrund der Anordnung des Prüffeuers einschließlich der Abbrandwaage auf der Grundfläche der Brandkammer ist nachzuweisen, dass zur Gewährleistung einer konstanten brandlastgesteuerten Verbrennung ausreichend Umgebungsluft in den hinteren Bereich der Brandkammer, strömt. Aus diesem Grund wird zunächst eine Variante ohne rückseitige Zuluftöffnung (OZL) mit der Variante mit rückseitiger Zuluftöffnung (MZL) ausgewertet.

Für den ersten Simulationsversuch, unter Berücksichtigung einer rückseitigen Zuluftöffnung, wurde die Variante Pool_MZL_03_05 herangezogen. Dabei stehen die ersten Ziffern „03“ in der Bezeichnung für den Abstand von 0,3 m, gemessen von der Außenkante der Rückseite der Poolfeuerkonstruktion (einschließlich Kühlwanne) zur Innenseite der Rückwand der Brandkammer (lichter Abstand). Die zweiten Ziffern „05“ bezeichnen die Höhe von 0,5 m der vertikal angeordneten Brandkammeröffnung in der Rückwand der Brandkammer. Die Zuluftöffnung wurde über die gesamte Breite der Brandkammer, bezogen auf das Innenmaß dieser, vorgesehen. Die Untersuchungen erfolgten an dem Prüfstand des „Grundmodells“ gemäß Abschnitt 7.2.2 mit der Ausbildung einer geraden Wand.

In Abbildung 7-14 sind die Verläufe der Wärmefreisetzungsrate für die Variante Pool_MZL_03_05 und Pool_OZL gegenübergestellt. Dabei zeigt die Variante Pool_MZL_03_05 gegenüber der Variante Pool_OZL einen deutlich konstanteren sowie geringfügig höheren Verlauf der Wärmefreisetzungsrate auf. Des Weiteren wird die Abklingphase bei der Variante Pool_OZL bereits bei einer umgesetzten Masse von ca. 88 % in der 1.320. Prüfsekunde erreicht. Bei der Variante Pool_MZL_03_05 geht die Wärmefreisetzungsrate erst bei einer umgesetzten Masse von ca. 91 % in die Abklingphase über.

Die Unterschiede im Verlauf der Wärmefreisetzungsrate der beiden Varianten lassen sich im Wesentlichen auf die zu geringe Luftzufuhr im hinteren Bereich der Brandkammer, bei der Variante OZL zurückführen. Dadurch kommt es in diesem Bereich zu einer Unterventilierung und somit zu einer Reduzierung der Abbrandrate des Poolfeuere innerhalb der Brandkammer.

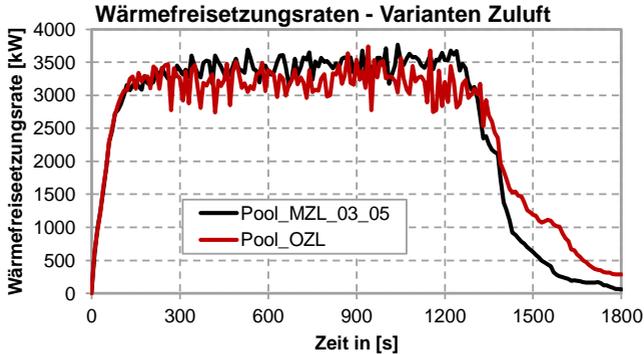


Abbildung 7-14: Darstellung der Wärmefreisetzungsraten in Abhängigkeit der Prüfzeit für das Simulationsmodell mit rückseitiger Zuluft und ohne rückseitige Zuluft zur Brandkammer

In Abbildung 7-15 sind die Volumenströme in die Brandkammer für die beiden Varianten über die vordere Brandkammeröffnung (links) sowie für die Variante Pool_MZL_03_05 für die hintere Zuluftöffnung (rechts) gegenübergestellt. Unter Berücksichtigung des Luftbedarfs von 9 kg Luft pro kg Brennstoff [118] für die Verbrennung von Isopropanol, einer Abbrandrate von max. 0,118 kg/s gemäß Simulation sowie der Rohdichte von Luft mit 1,2041 kg/m³ bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C ergibt sich daraus ein notwendiger gleichmäßig verteilter Volumenstrom in die Brandkammer von 0,88 m³/s. Der notwendige Volumenstrom wird durch die Varianten Pool_OZL sowie Pool_MZL_03_05 erzielt. Daraus wird deutlich, dass die einströmende Luft über die vordere Brandkammeröffnung den hinteren Bereich des Poolfeuers nicht ausreichend versorgt, sodass die genannten Effekte bei der Wärmefreisetzungsrate bei der Variante Pool_OZL auftreten.

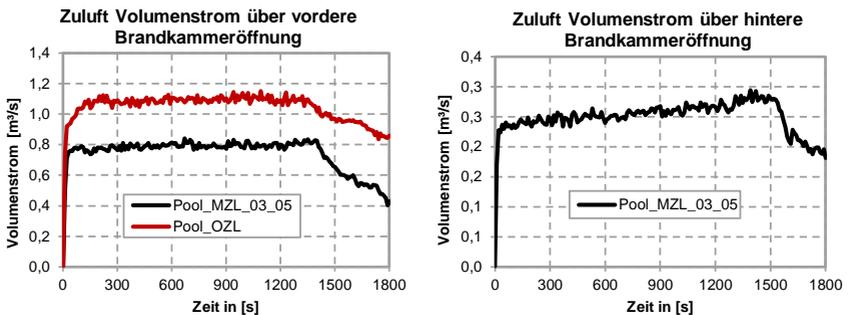


Abbildung 7-15: Darstellung der Volumenströme an der vorderen Brandkammeröffnung sowie an der rückseitigen vertikalen Brandkammeröffnung im Bereich der Rückwand

In einem weiteren Untersuchungsschritt werden die Einflüsse zwischen der Höhe der Zuluftöffnung sowie dem Abstand zwischen Außenkante der Rückseite der Poolfeuerkonstruktion zur Innenseite der Rückwand der Brandkammer untersucht. In Abbildung 7-16 sind die Einflüsse durch die geänderten, geometrischen Parameter auf den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Variante Pool_ZL_03_05 den konstantesten Verlauf für die Wärmefreisetzungsrate gewährleistet. Der Abstand zwischen Poolfeuerkonstruktion und der Innenseite der Rückwand der Brandkammer hat bei einer Höhe der Zuluftöffnung von 0,5 m keinen erkennbaren signifikanten Einfluss.

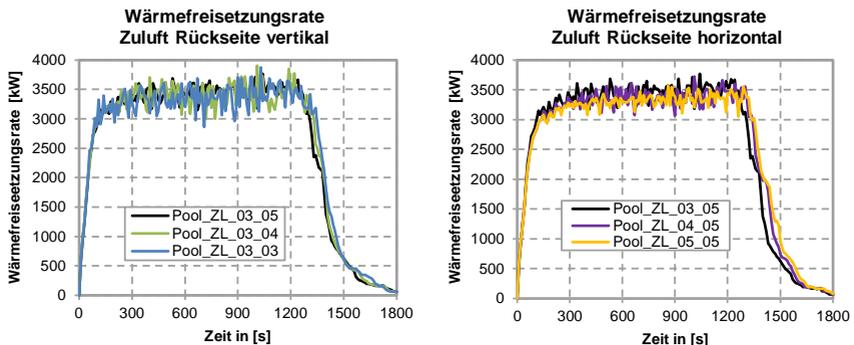


Abbildung 7-16: Darstellung der Verläufe für die Wärmefreisetzungsraten für die Simulationsmodelle bei variierendem Abstand des Prüffeuers zur Rückwand sowie unterschiedlichen Höhen der Zuluftöffnung in der Rückwand

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Untersuchungen wird ersichtlich, dass eine rückseitige Zuluftöffnung zur Gewährleistung näherungsweise konstanter Verläufe der Wärmefreisetzungsrate erforderlich wird. Bei der Zuluftöffnung wurde eine ideale Höhe von 0,5 m ermittelt. Einen maßgebenden Einfluss zum Abstand der Poolfeuerkonstruktion zur Rückwand der Brandkammer konnte nicht festgestellt werden, sodass dieser zur Reduzierung von thermischen Verlusten in der Brandkammer auf das kleinste notwendige Maß von 0,3 m festgelegt wird.

7.3.1.3 Einfluss des Materials

Um den Einfluss des Materials hinsichtlich der Auswirkung auf die Wärmefreisetzungsrate und daraus resultierend auf die thermische Beanspruchung auf die Prüfwand beurteilen zu können, werden nachfolgend drei Untersuchungsvarianten vorgestellt. Dabei wird die Brandkammer ergänzend zu den bisher berücksichtigten seitlichen und oberen Umfassungsbauteilen aus Porenbeton, nachfolgend bezeichnet als Pool_BK_Porenbeton,

zusätzlich mit der Ausführung einer innenseitigen oberen und seitlichen Bekleidung auf den Porenbetonbauteilen aus Steinwolle (Pool_BK_MiWo) mit einer Dicke von 0,1 m ohne Reduzierung der Brandkammergeometrie untersucht. Des Weiteren wird eine Variante mit der Ausführung der Umfassungsbauteile aus Beton (Pool_BK_Beton) berücksichtigt. Die Materialkennwerte der Bauteile entsprechen dabei den Angaben gemäß Anlage F. Die Brandkammergeometrie einschließlich Wanddicken und Deckenhöhen entsprechen den Festlegungen gemäß Abschnitt 7.1 sowie 7.3.1.2.

In Abbildung 7-17 sind die Verläufe der Wärmefreisetzungsraten für die drei Varianten gegenübergestellt. Dabei zeigen die Variante Pool_BK_Porenbeton und Pool_BK_MiWo einen relativ ähnlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates, wobei der Verlauf der Wärmefreisetzungsrates sich bei der Variante Pool_BK_MiWo inkonstanter sowie geringfügig höher einstellt. Deutlich unterschiedlicher zu den Varianten Pool_BK_Porenbeton und Pool_BK_MiWo ist die Wärmefreisetzungsrates bei der Variante Pool_BK_Beton. Bei der Variante Pool_BK_Beton wird zum einen eine niedrigere Wärmefreisetzungsrates über den zeitlichen Verlauf erzielt und zum anderen steigt die Wärmefreisetzungsrates während der Vollbrandphase stetig an. Auch die Verläufe der Abklingphase unterscheiden sich wesentlich. Die Variante Pool_BK_MiWo geht nach einer umgesetzten Masse von ca. 90 % und die Variante Pool_BK_Porenbeton bei einer umgesetzten Masse von ca. 91 % in eine steil abfallende Abklingphase über. Demgegenüber setzt die Abklingphase bei der Variante Pool_BK_Beton bereits bei einer umgesetzten Masse von ca. 83 % ein und verläuft gegenüber den beiden anderen Varianten flacher.

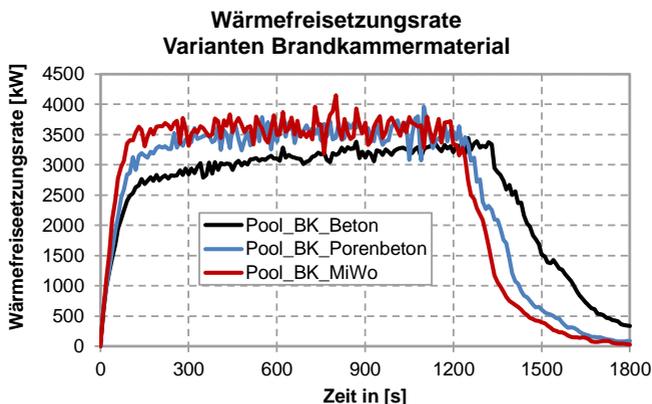


Abbildung 7-17: Darstellung der Wärmefreisetzungsrates in Abhängigkeit der Prüfzeit für die Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Materialien der innenseitigen seitlichen und oberen Umfassungsbauteile der Brandkammer

Der unterschiedliche Verlauf resultiert aus dem deutlich höheren Wärmeabsorptionsvermögen von Beton gegenüber Porenbeton sowie Steinwolle, wodurch die Wärmeleitung in das Bauteil bei Beton deutlich höher ausfällt. Durch diesen Effekt reduzieren sich die Temperaturen an den Brandkammeroberflächen bei der Variante Pool_BK_Beton gegenüber den beiden anderen Varianten, sodass sich die Abbrandrate des Poolfeuers erst zum Ende der Vollbrandphase den Varianten Pool_BK_MiWo und Pool_BK_Porenbeton annähert.

In Abbildung 7-18 sind die mittleren Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux – GHF) entlang der Achse I für die Vollbrandphasen gegenübergestellt. Daraus wird deutlich, dass die zu erzielenden thermischen Beanspruchungen aus der Variante Pool_BK_Porenbeton durch die Variante Pool_BK_MiWo näherungsweise übereinstimmen. Die Variante Pool_BK_Beton weicht dem gegenüber deutlicher ab. Die Ausbildung der Brandkammer aus Beton ist aufgrund seiner thermischen Eigenschaften für den Brandversuch somit nicht geeignet.

Um ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit der Wärmefreisetzungsrate im Brandversuch an unterschiedlichen Prüfanstalten zu erzielen, ist die Brandkammer aus Porenbeton oder einem gleichwertigen Baustoff (z. B. Leichtbeton) vorzusehen.

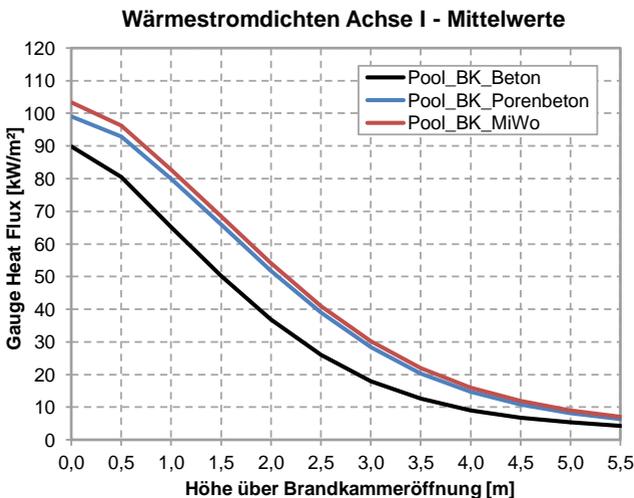


Abbildung 7-18: Simulierte mittlere Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) entlang der Achse I während der Vollbrandphase für die Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Materialien der innenseitigen seitlichen und oberen Umfassungsbauteile der Brandkammer

7.3.2 Eckwände

Angrenzende Fensteröffnungen zu einer Gebäudeeckwand, ohne gesonderte Anforderungen an eine applizierte Außenwandbekleidung, sind bei Bestandsgebäuden sowie Neubauten grundsätzlich aufzufinden sowie bauordnungsrechtlich zulässig. Aus diesem Grund wird der Einfluss von Eckwänden, ergänzend zu den Erkenntnissen gemäß Abschnitt 3.7.2, im Brandversuch untersucht. Daraus soll der notwendige Abstand zwischen Brandkammerlaibung und Innenseite der Eckwand für die Ausführung der Rohbauwand des Prüfstands bestimmt werden. Außenwandbekleidungen, wie z. B. WDVS oder VHF, werden in der Regel mit Aufbaudicken bis maximal ca. 0,4 m im Brandversuch geprüft. In vielen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder technischen Ausführungsvorschriften werden ergänzend dazu, häufig nur maximale, zulässige Materialdicken von 0,2 m bis 0,3 m für die Außenwandbekleidungen definiert. Materialdicken von 0,2 m bis 0,3 m können somit als Regelmaß für den Prüfaufbau im Brandversuch betrachtet werden.

In Abbildung 7-19 sind die geometrischen und messtechnischen Anordnungen für die Varianten mit einer zusätzlichen Eckwand dargestellt.

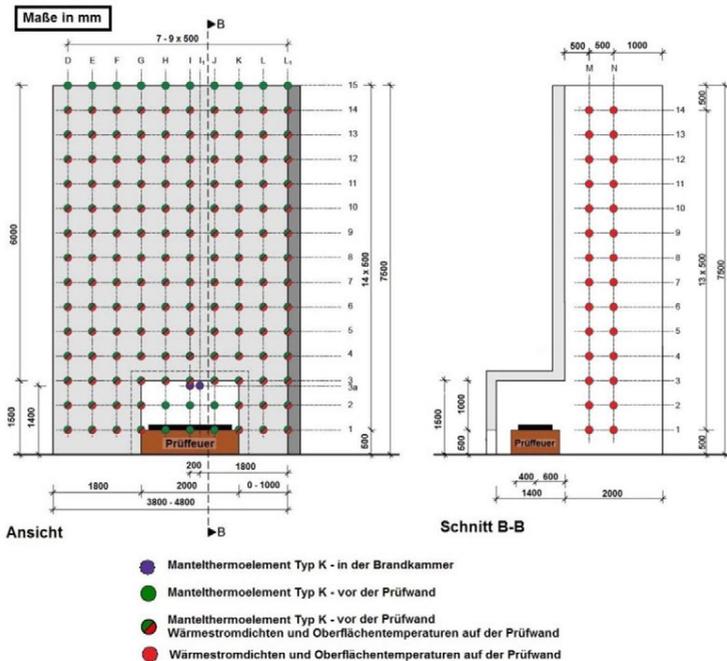


Abbildung 7-19: Geometrische und messtechnische Ausführungen für die Ausbildung des Prüfstands mit Eckwand

Ergänzend zur Abbildung 7-19, kann die Anordnung der verwendeten Messstellen für die Mantelthermoelemente in der y-Achse aus der Abbildung 7-8 entnommen werden.

Bei der Untersuchung wurden zwischen der Laibung der Brandkammer und der Innenseite der Eckwand Abstände von 0,0 m bis 1,0 m in Schritten von 0,1 m berücksichtigt. Zur Differenzierung der Prüfvarianten werden diese nachfolgend als Pool_00AB bis Pool_10AB bezeichnet. Die aufgeführten Ziffern bezeichnen den Abstand zwischen der Brandkammerlaibung und der Innenseite der Eckwand. Somit stehen die Ziffern „00“ für einen Abstand (AB) von 0,0 m und die Ziffern „10“ für einen Abstand (AB) von 1,0 m.

In Abbildung 7-20 ist der Verlauf der einwirkenden Wärmestromdichte als Flächenintegral der beanspruchten Prüfwandfläche für die untersuchten Varianten dargestellt. Daraus wird deutlich, dass mit zunehmendem Abstand der Eckwand zur Laibung der Brandkammeröffnung der insgesamt einwirkende Wärmestrom auf die Prüfwand stetig abnimmt. Auffällig ist der signifikante Einfluss der Eckwand bei unmittelbarer Anordnung an der Brandkammeröffnung unter Vergleichsbetrachtung der Varianten Pool_00AB und Pool_01AB.

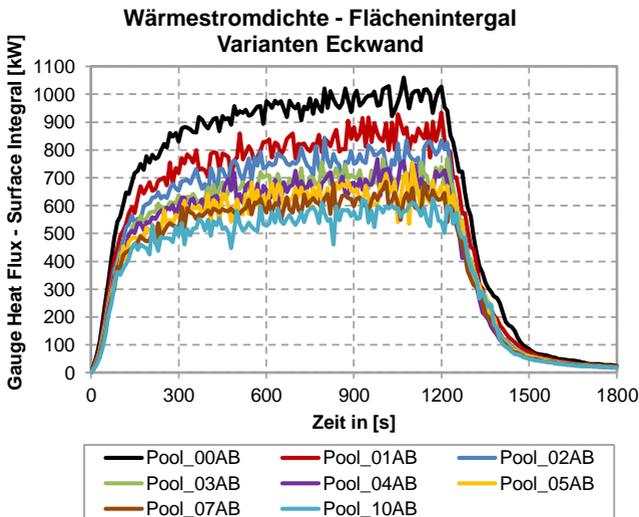


Abbildung 7-20: Flächenintegral für die einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) der beanspruchten Prüfwand für die unterschiedlichen, untersuchten Abstandsgrößen zwischen Laibung und Eckwand

In Abbildung 7-21 ist, ergänzend zur Abbildung 7-20, das Integral der einwirkenden Wärmestromdichte auf die Prüfwandfläche über die Zeit für die Varianten Pool_00AB und

Pool_AB05 visualisiert. Auf Grundlage der dargestellten, insgesamt einwirkenden Wärmestromdichten über die Prüfzeit von 1.800 Sekunden wird deutlich, dass die Wirksamkeit der Flammen bei der Variante Pool_00AB deutlich den oberen Rand der Prüfwand (6 m über Brandkammeröffnung) und somit zwei repräsentative Vollgeschosse eines Gebäudes, unabhängig der Brennbarkeit einer Außenwandbekleidung, beanspruchen. Aus diesem Grund ist die Ausführung der Eckwand unmittelbar neben der Brandkammeröffnung für die Variante Pool_00AB in einem Brandversuch als nicht repräsentativ für das festgelegte kritische Raumbrandszenario gemäß Abschnitt 3.5 zu betrachten.

Auf Grundlage dieser Erkenntnis sollten für Neu- und Bestandsgebäude bei energetischen Maßnahmen über technische Vorschriften ein Mindestmaß von 0,1 m zwischen Laibung der Öffnung und der Eckwand gefordert werden, um dem Risiko eines Brandüberschlags über mehr als zwei Geschosse entgegenzuwirken.

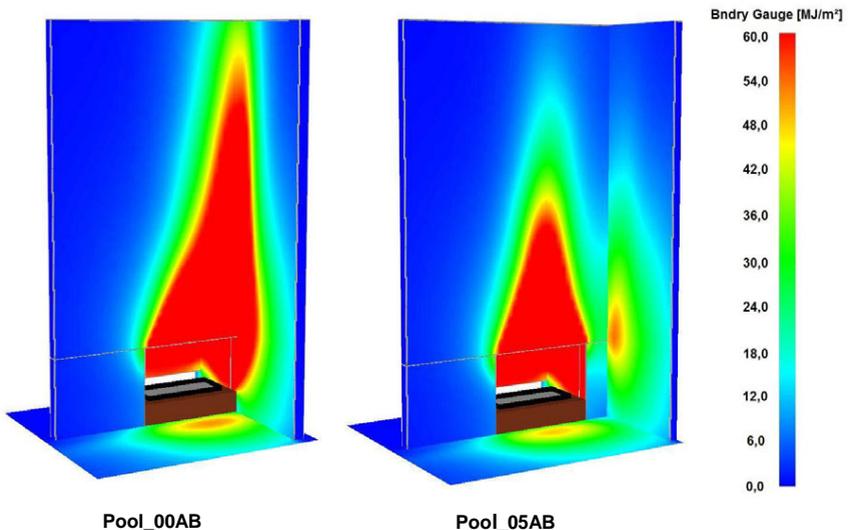


Abbildung 7-21: Visualisierung des Integrals der einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ/m²

In Abbildung 7-22 ist für die Simulationsreihe das Integral der einwirkenden Wärmestromdichten auf die Prüfwandfläche über die Zeit dargestellt. Mit einem Abstand der Eckwand zur Brandkammerlaibung von 0,7 m können näherungsweise die thermischen Einwirkungen von 754 MJ der Sockelbrandprüfung gemäß MVV [107] erzielt werden. Unter zusätzlicher Betrachtung der simulierten Wärmestromdichten auf die Eckwand in Achse M gemäß Abbildung 7-23 wird deutlich, dass nur bis zu einem Abstand von 0,5 m kritische

Wärmestromdichten von 35 kW/m² bis 40 kW/m² ([99], [118]) auf der Eckwand für brennbare Außenwandbekleidungen durch das Prüffeuer simuliert werden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse und der möglichen Standarddicken von Außenwandbekleidungssystemen bis zu 0,4 m, ist ein Abstand für das Rohbaumaß des Prüfstands zwischen der Eckwand und der Brandkammerlaibung somit von maximal 0,5 m anzuordnen. Damit können Außenwandbekleidungen ohne aufwändige Umbaumaßnahmen am Prüfstand appliziert und geprüft werden. Besonders dünne Aufbaudicken von brennbaren Außenwandbekleidungen, wie z. B. von Vakuumdämmungen, können mit der Eckwandausbildung somit noch ausreichend sicher geprüft werden.

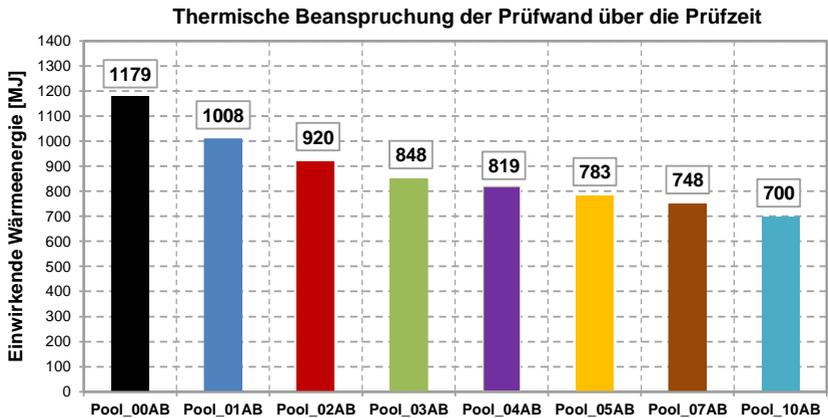


Abbildung 7-22: Integral der einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ

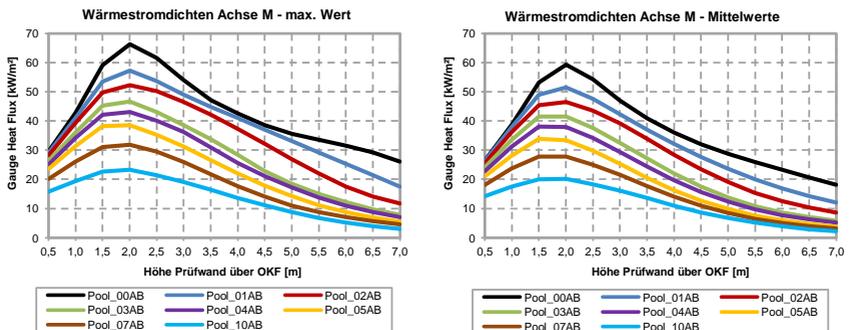


Abbildung 7-23: Simulierte mittlere und maximale Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) entlang der Achse M der Abstandsvarianten auf der Eckwand

7.3.3 U-förmige Wände

Die Ausbildung von U-förmigen Wänden bei Gebäude ist grundsätzlich bauordnungsrechtlich möglich und bedarf deshalb einer brandschutztechnischen Untersuchung hinsichtlich der wechselseitigen Auswirkungen zwischen den Eckwänden untereinander sowie der Auswirkungen auf das Prüffeuer.

In Abbildung 7-24 sind die geometrischen und messtechnischen Anordnungen am Prüfstand für die Varianten mit den zwei Eckwänden als U-förmige Wandausbildung dargestellt.

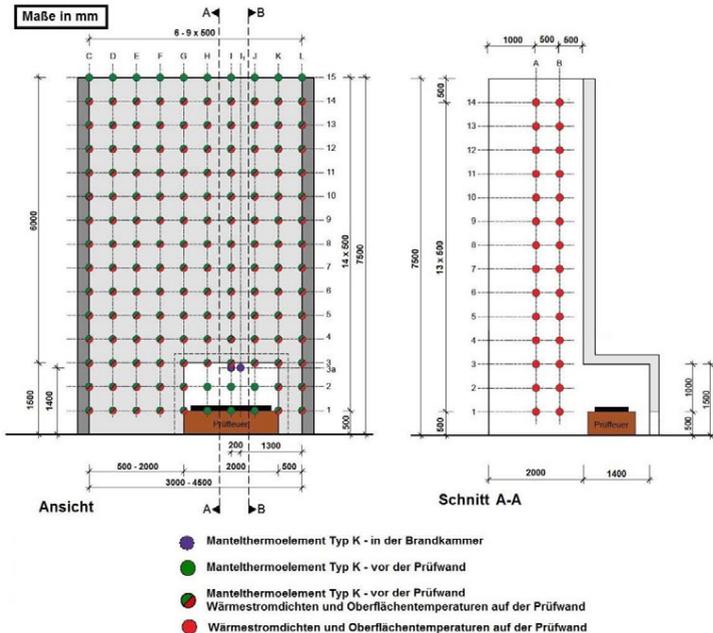


Abbildung 7-24: Geometrische und messtechnische Ausführung der Varianten für die Ausbildung des Prüfstands als U-förmige Wand

Für die Untersuchungen werden insgesamt vier Simulationsvarianten durchgeführt. Der Abstand der rechten Eckwand in Abbildung 7-24 wird auf Grundlage der Ergebnisse gemäß Abschnitt 7.3.2 mit einem Abstand von 0,5 m für alle folgenden Varianten festgelegt. Der lichte Abstand der linken Eckwand wird beginnend mit einem Abstand von 0,5 m zur linken Laibung der Brandkammeröffnung bis zu einem Abstand von 2,0 m jeweils um 0,5 m erhöht. Die vier Simulationsvarianten werden nachfolgend mit Pool_05UW (lichter Abstand linke Eckwand zur Brandkammerlaibung 0,5 m) bis Pool_20UW (lichter Abstand linke Eckwand zur Brandkammerlaibung 2,0 m) bezeichnet.

In Abbildung 7-25 ist das Integral der einwirkenden Wärmestromdichten auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ für die Rückwand und die beiden Eckwände aufgeschlüsselt dargestellt. Daraus wird bei der Gegenüberstellung der Simulationsvarianten Pool_05UW und Pool_AB05 deutlich, dass die thermische Beanspruchung von 1135 MJ (beanspruchte Prüfwandfläche von 49,5 m²) für die Variante Pool_05UW gegenüber der Variante Pool_05AB mit einer thermischen Beanspruchung von 783 MJ (beanspruchte Prüfwandfläche von 44,5 m²) durch die U-förmige Ausbildung der Prüfwand deutlich zunimmt.

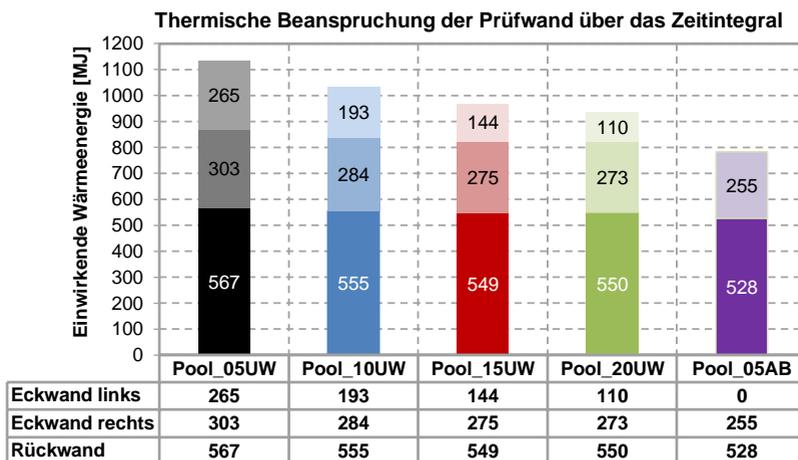


Abbildung 7-25: Integral der einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ

In Abbildung 7-26 sind ergänzend zur Untersuchung die mittleren und maximalen einwirkenden Wärmestromdichten entlang der Achse M auf der rechten Eckwand für die Varianten mit der ausgebildeten U-förmigen Prüfwand und der Variante POOL_05AB mit nur einer Eckwand dargestellt.

Anhand dieser wird ersichtlich, dass der wechselseitige Einfluss infolge Rückstrahlung zwischen den Eckwänden an den lokalen Messstellen, aufgrund der nahezu deckungsgleichen Verlaufskurven, keine signifikante Einflussnahme auf die Simulationsergebnisse untereinander hat. Unter alleiniger Betrachtung der beanspruchten Prüfwandfläche der rechten Eckwand ist der Einfluss im Vergleich zwischen den U-Wand Varianten und der Varianten Pool_05AB gemäß Abbildung 7-25 deutlicher zu erkennen. Durch die Ausbildung der U-Wand erhöht sich die einwirkende Wärmeenergie auf der rechten Eckwand am Beispiel der Simulationsvariante Pool_05UW auf 303 MJ gegenüber

der Variante Pool_05AB mit nur einer Eckwand und einer thermischen Beanspruchung von 255 MJ. Erst mit einem Abstand der linken Eckwand zur Brandkammer von 1,5 m reduziert sich dieser Einfluss bei einer thermischen Einwirkung von 275 MJ auf unter 10 %.

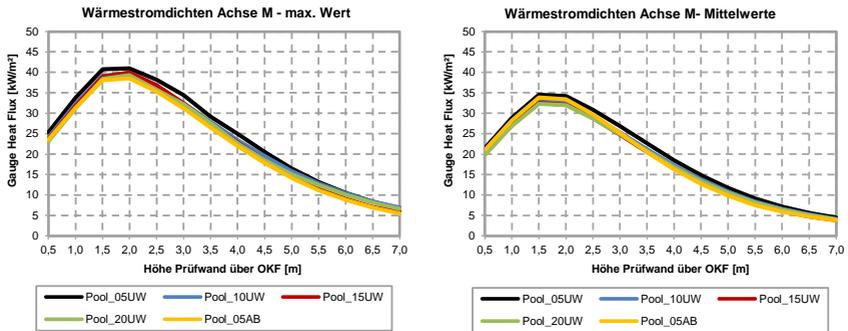


Abbildung 7-26: Simulierte mittlere und maximale Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) auf der rechten Eckwand entlang der Achse M im Vergleich zwischen den Varianten mit U-förmigen Wand und Eckwand Pool_05AB

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Simulationsergebnissen wird ersichtlich, dass mit zunehmendem Abstand der linken Eckwand, der Einfluss auf die insgesamt einwirkende thermische Beanspruchung der Prüfwandfläche abnimmt. Bei den Varianten Pool_15UW und Pool_20UW ist auf Grundlage der thermischen Beanspruchung gemäß Abbildung 7-25 für die Rückwand und die rechte Eckwand nur noch eine geringfügige Reduzierung der Einwirkung zu verzeichnen.

In den technischen Vorschriften sind keine Anforderungen an Außenwandbekleidungen bei U-förmigen Wandausbildungen vorgeschrieben, sodass auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse ein Mindestabstand bei brennbaren Außenwandbekleidungen von mindestens 4 m zwischen zwei ausgebildeten Eckwänden empfohlen wird. Eine Brandprüfung an einem U-förmigen Prüfstand ist aufgrund der möglichen und einfachen technischen Regulierung in der Ausführung und der hohen zusätzlichen Beanspruchung bei brennbaren Außenwandbekleidungen als nicht repräsentativ für eine Regelaußenwandkonstruktion an einem Wohngebäude zu betrachten.

Eine deutliche Einflussnahme auf die Verlängerung der Prüffuerflamme, aufgrund der angeordneten Eckwände mit einem Mindestabstand von 0,5 m zur jeweiligen angrenzenden Brandkammerlaibung, konnte bei den Untersuchungen der Varianten nicht festgestellt werden und wurde aus diesem Grund nicht weiter vorgestellt.

7.3.4 Brandversuche mit Außenwandbekleidungen – Vergleichsnachweis Sockelbrandprüfung

Zur Überprüfung der Gleichwertigkeit zwischen dem entwickelten Brandversuch für das kritische Wohnraumbrandszenario und dem Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] wird nachfolgend der Einfluss von applizierten Außenwandbekleidungen mit unterschiedlichen Aufbaudicken im Brandversuch untersucht. Dabei werden Aufbaudicken von 0,1 m (Pool_01AW) bis 0,4 m (Pool_04AW) berücksichtigt. Beim Sockelbrandversuch ist aufgrund der gleichbleibenden Positionierung des Prüffeuers vor dem Prüfstand, eine Untersuchung von unterschiedlichen Aufbaudicken einer applizierten Außenwandbekleidung im Brandversuch nicht notwendig.

Zum Schutz vor thermischen Einwirkungen der Kühlwannekonstruktion und der Abbrandwaage werden vor der Prüffeuerkonstruktion, bündig zur Vorderkante der Außenwandbekleidung, Mauerwerksteine aus Porenbeton berücksichtigt. Die zusätzlichen, applizierten Außenwandbekleidungen werden mit der Materialeigenschaft „Porenbeton“ simuliert. Beim Simulationsversuch Pool_04AW musste die Poolfeuerkonstruktion zur Gewährleistung der notwendigen Abbrandrate 0,1 m von der definierten Position der Brandkammer gemäß Abbildung 7-31 aus der Brandkammer rausgerückt werden. Alternativ kann die Poolwanne in der Kühlwannekonstruktion um 0,1 m verrückt werden.

In Abbildung 7-27 sind die Verläufe der Wärmefreisetzungsraten für die untersuchten Varianten gegenübergestellt.

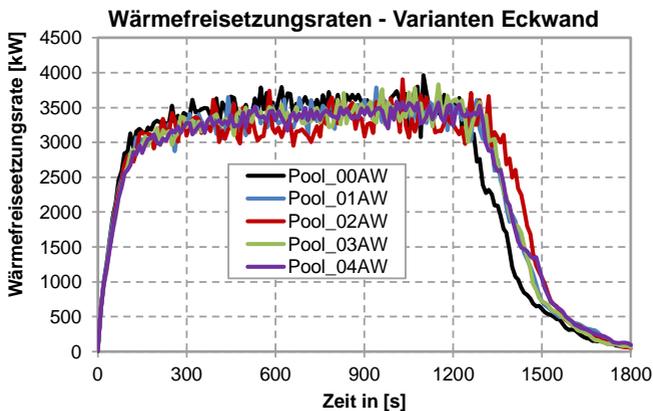


Abbildung 7-27: Darstellung der Wärmefreisetzungsraten in Abhängigkeit der Prüfzeit für die Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Aufbaudicken von Außenwandbekleidungen

Dabei beträgt die durchschnittliche Wärmefreisetzungsrate zwischen der 150. bis zur 1.350 Prüfsekunde ca. 3,3 MW bis 3,5 MW. Somit zeigen die Wärmefreisetzungsraten in der Simulation eine gute Reproduzierbarkeit für die Varianten mit unterschiedlichen Aufbaudicken der Außenwandbekleidungen.

In Abbildung 7-28 ist das Integral der einwirkenden Wärmestromdichten auf die vertikalen Prüfwandflächen über die Prüfzeit von 1.500 Sekunden für die untersuchten Varianten und dem Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] gegenübergestellt. Aus der Vergleichsbetrachtung wird deutlich, dass unabhängig von den Aufbaudicken der simulierten Außenwandbekleidungen die thermische Beanspruchung gegenüber dem Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] ausreichend abgedeckt wird. Hinzu kommt die thermische Beanspruchung im Sturz- und Laibungsbereich angrenzend zur Brandkammeröffnung, die mit größer werdenden Aufbaudicken der Außenwandbekleidungen zunimmt und im Sockelbrandversuch grundsätzlich nicht berücksichtigt wird.

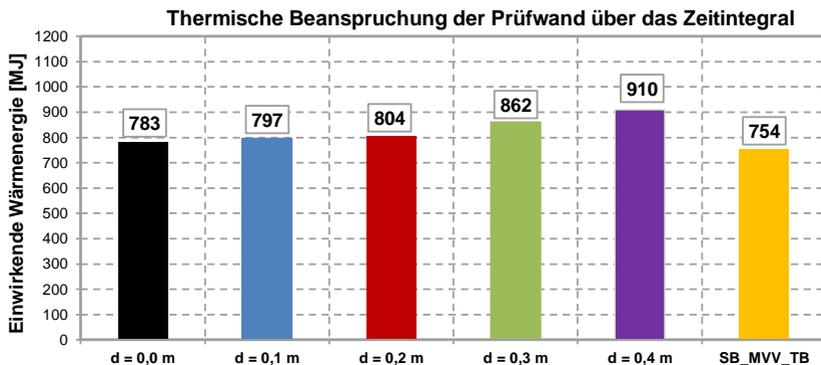


Abbildung 7-28: Integral der einwirkenden Wärmestromdichte (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüf-wandfläche über die Zeit in MJ

In Abbildung 7-29 wird ergänzend die Summe der lokalen, einwirkenden Wärmestromdichten auf die Prüfwandfläche für die Prüfzeitzeit von 1.800 Sekunden dargestellt. Aus der Gegenüberstellung der einzelnen Simulationsvarianten wird deutlich, dass mit zunehmender Annäherung der Eckwand an die Brandkammeröffnung durch die höheren Dicken der applizierten Außenwandbekleidungen, der Eckeinfluss und somit auch die thermischen Beanspruchungen insbesondere im Bereich der Eckwand zunehmen. Auch wird die verlängerte Flammenwirksamkeit auf die Prüfwand durch den Eckeinfluss mit zunehmenden Aufbaudicken der simulierten Außenwandbekleidung über die Visualisierung deutlich.

Durch die ausreichende Abdeckung der thermischen Beanspruchung der Prüfwandflächen im entwickelten Brandversuch für das Raumbrandszenario gegenüber der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] kann auf Grundlage der Ergebnisse gemäß Abschnitt 6.6 mit ausreichender Sicherheit davon ausgegangen werden, dass auch die untersuchten europäischen, groß skalierten Brandversuche durch den entwickelten Brandversuch abgedeckt werden.

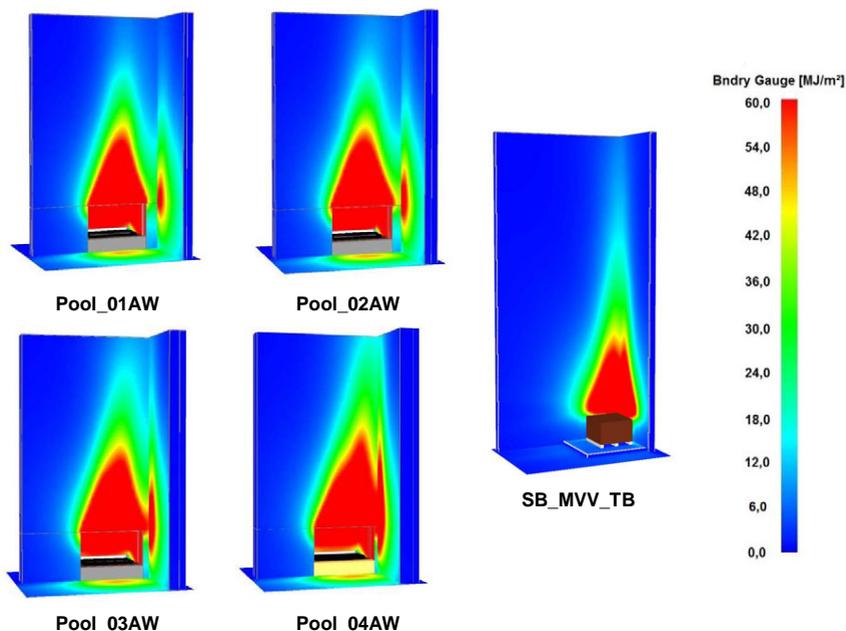


Abbildung 7-29: Visualisierung des Integrals der einwirkenden Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ/m²

7.3.5 Prüfablauf, Geometrie und Messstellen

7.3.5.1 Prüfablauf

Die Brandbeanspruchungsphase durch das Prüffeuer wird in dem Prüfverfahren für Außenwandbekleidungen mit der Anforderung schwerentflammbar auf eine Gesamtdauer von 25 Minuten festgelegt. Dabei wird eine Vollbrandphase in Abhängigkeit der erzielten Abbrandrate von ca. 20 Minuten angesetzt. Das Poolfeuer soll nach Beendigung der Vollbrandphase nicht abgelöscht werden, sondern vollständig ausbrennen. Im Anschluss wird eine Beobachtungszeit von 35 Minuten vorgesehen, sodass die Möglichkeit zur Beobachtung eines eigenständigen Weiterbrennens der Außenwandbekleidung besteht.

Die insgesamt freigesetzte Wärmemenge des Poolfeuers beträgt über die Prüfzeit ca. 4.685 MJ unter Berücksichtigung eines angesetzten effektiven Heizwertes $H_{u,eff} = 31,3$ MJ/kg. In der Poolwanne müssen 190 Liter Isopropanol vorgesehen werden. Der Füllstand muss durch eine Abbrandwaage kontrolliert werden und kann ergänzend dazu durch Messmarken in der Poolwannenkonstruktion abgeglichen werden.

Für die Prüfung von nichtbrennbaren Außenwandbekleidungen kann über die Erhöhung des Füllstands in der Poolwanne die Branddauer in der Vollbrandphase bis auf ca. 40 Minuten erhöht werden, sodass für die Beanspruchungszeit in der Brandprüfung eine ausreichende Sicherheit zur Beurteilung des Beitrags zum Brand auf Grundlage visueller und messtechnischer Bewertungsmethoden besteht.

7.3.5.2 Geometrie und Messstellen

In Abbildung 7-30 ist ein Wohngebäude mit insgesamt vier Vollgeschossen dargestellt, welches gemäß MBO [105] bei Nutzungseinheiten ≤ 400 m² in die GKL 4 einzuordnen ist.

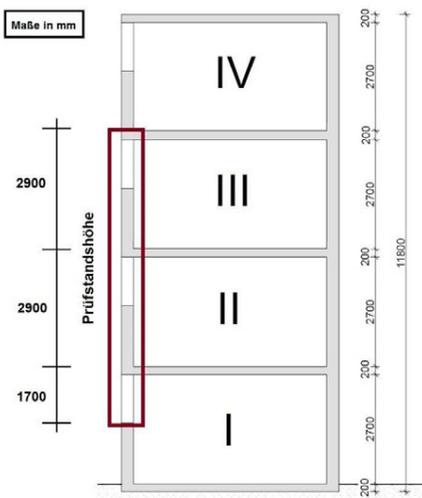


Abbildung 7-30: Darstellung eines Gebäudes der GKL 4 als Grundlage für die Dimensionierung des repräsentativen Prüfstands im entwickelten Brandversuch

Auf Grundlage der definierten Höhenmaße der Geschosse des Gebäudes wurde, unter Berücksichtigung der Brandraumöffnung $B \times H = 2,0$ m \times 1,625 m des maßgebenden kritischen Raumbrandszenarios für eine Wohnnutzung, die notwendige Prüfstandshöhe definiert. Darauf aufbauend setzt sich die Prüfstandshöhe aus der lichten Höhe der Brandkammer von 1,5 m und einer Deckenhöhe 0,2 m repräsentativ für das Brandgeschoss

sowie aus zwei über dem Brandgeschoss befindliche Geschosse mit einer jeweiligen Höhe von 2,9 m zusammen. Als Fußbodenaufbau wurde bei der Bestimmung des maßgebenden kritischen Raumbrandszenarios eine Aufbauhöhe von 0,2 m berücksichtigt. Die notwendige Breite der abgewickelten Prüfwand hängt zum größten Teil von der zu erwartenden horizontalen Brandausbreitung des zu prüfenden Außenwandbekleidungs-systems ab. Die finale Festlegung zur Breite kann somit erst nach Durchführung von Brandprüfungen unterschiedlicher Außenwandbekleidungs-systeme durchgeführt werden. Die abgewickelte Breite gemäß Abbildung 7-31 beruht zunächst näherungsweise auf die Breite der Prüfwand der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107].

Zur Bestimmung relevanter Temperaturdifferenzen zwischen durchzuführenden Kalibrierungsversuchen und Brandprüfungen an Außenwandbekleidungen werden Temperaturlevel definiert, die es ermöglichen, neben der visuellen Beobachtung von Brandschädigungen und Brandausbreitungen auf und in Außenwandbekleidungen, Grenzwerte zur Einhaltung der zu erzielenden Klassifizierung schwerentflammbar oder nichtbrennbar zu bestimmen. In Abbildung 7-31 sind die definierten Messstellenebenen am finalen Prüfstand in Abhängigkeit der repräsentativen Geschosshöhe dargestellt.

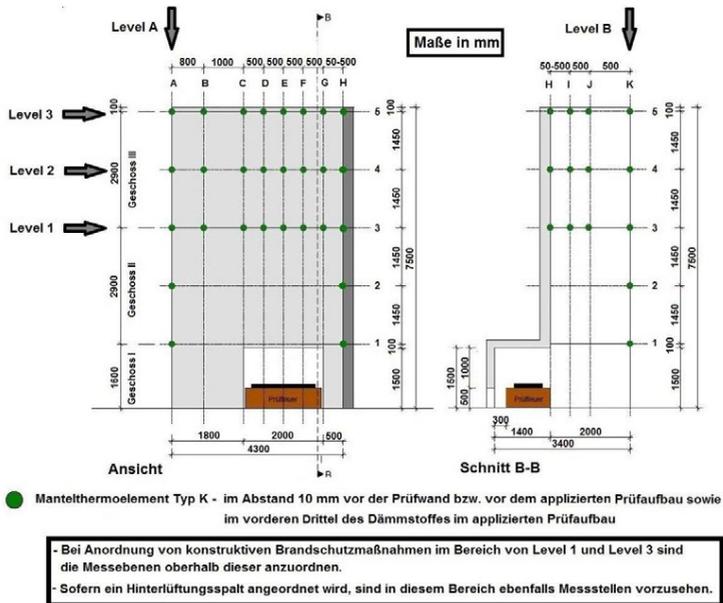


Abbildung 7-31: Definition der notwendigen Messstellen an der finalen Prüfstandsgeometrie

Aufgrund der vielfach unterschiedlichen brandtechnischen Eigenschaften von brennbaren Außenwandbekleidungen ist eine Definition von Temperaturgrenzwerten auf Grundlage der durchgeführten Simulationen ohne Berücksichtigung der geometrischen und brandtechnischen Eigenschaften verschiedenster Außenwandbekleidungs-systeme nicht zielführend. Alleine bei der Bewertung zum Brandverhalten von WDVS mit EPS im Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] wurden zur Bestimmung geeigneter Temperaturgrenzwerte die Erfahrungen aus ca. 28 Brandprüfungen herangezogen. Unabhängig davon werden nach wie vor Außenwandbekleidungen in diesem Prüfverfahren durch eine Kombination aus gemessenen kritischen Temperaturen und beobachteten Brandschädigungen sowie Brandausbreitungsmechanismen an der geprüften Außenwandbekleidung bewertet.

Level 1 bis 3:

Die Level 1 bis 3 dienen zur Bestimmung von vertikalen Brandausbreitungsmechanismen von unterschiedlichen Außenwandbekleidungs-systemen. Dabei können die Messstellen im Level 1 und Level 2 für nichtbrennbare Außenwandbekleidungen verwendet werden sowie die Messstellen in Level 2 und Level 3 für schwerentflamm-bare Außenwandbekleidungen. Für die ausgewiesenen Messlevel können in Abhängigkeit der Bauart der Außenwandbekleidung allgemeingültige Temperaturgrenzen in Abhängigkeit der Aufbaudicke zukünftig definiert werden.

Zur Erfassung der geometrischen Einflüsse auf die Flammenausbildung von unterschiedlichen Außenwandbekleidungs-systemen werden grundsätzlich zwei Level für die jeweilige zu erzielende Klassifizierung schwerentflammbar oder nichtbrennbar angesetzt. Dadurch können Unsicherheiten bei den Temperaturmessungen aufgrund eines Feuerübersprunges an einer Messebene, aufgrund von Versprüngen in der zu prüfenden Geometrie, infolge konstruktiver Brandschutzmaßnahmen oder durch Versagen von Teilkomponenten in der Brandprüfung an der zweiten definierten Messebene ausreichend sicher ersatzweise registriert werden.

Level A und B:

Die Level A und B dienen zur Bestimmung von horizontalen Brandausbreitungs-mechanismen und sind nur dann anzuordnen, wenn auf Grundlage des Außenwand-bekleidungs-systems eine horizontale Brandausbreitung in der Prüfung maßgebend werden kann. Dies kann insbesondere bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden relevant werden.

7.3.6 Umgebungsbedingungen im Brandversuch

Auf Grundlage des entwickelten Prüfstandes werden nachfolgend die wesentlichen Umgebungseinflüsse auf den Brandversuch untersucht. Dazu sind insbesondere Untersuchungen zum Umgebungs-klima sowie zum Einfluss der Umfassungsbauteile einer erforderlichen Prüfhalle für den Witterungsschutz notwendig.

7.3.6.1 Einfluss Umgebungs-klima

Bei den Untersuchungen zum Einfluss der klimatischen Umgebungsbedingungen während des Brandversuchs werden sowohl variierende Temperaturen als auch variierende relative Luftfeuchten berücksichtigt. Ziel der Untersuchung ist die Bestimmung klimatischer Grenzwerte zur Gewährleistung einer ausreichenden Reproduzierbarkeit im Brandversuch sowie die Erfassung von Worst-Case-Szenarien.

Temperaturen

In Tabelle 7-4 sind die definierten klimatischen Umgebungsbedingungen für die Simulationsvarianten dargestellt. Als Grenzwerte in der Simulation wurden eine Temperaturspanne von $T = -10\text{ °C}$ bei einer relativen Luftfeuchte von $\phi = 80\%$ und $T = +40\text{ °C}$ bei einer relativen Luftfeuchte von $\phi = 50\%$ angesetzt. Die Bauteiltemperaturen wurden wirklichkeitsnah dem Umgebungs-klima angepasst.

Tabelle 7-4: Klimatische Umgebungsbedingungen während der Brandprüfung für die untersuchten Simulationsvarianten

	Umgebungs- temperaturen [°C]	Bauteil- temperaturen [°C]	relative Luftfeuchten [%]
Pool_Temp_-10	-10	0	80
Pool_Temp_0	0	0	80
Pool_Temp_10	10	10	50
Pool_Temp_20	20	20	50
Pool_Temp_30	30	30	50
Pool_Temp_40	40	30	50

Der Einfluss des Umgebungs-klimas wird auf Grundlage des Verlaufs der Wärmefreisetzungsrate in der Simulation gemäß Abbildung 7-32 deutlich. Dabei reduziert sich die mittlere Wärmefreisetzungsrate während der Vollbrandphase mit zunehmender Temperatur. Besonders deutlich wird dieser Effekt durch die Gegenüberstellung der Varianten Pool_Temp_20 (Referenzklima) und Pool_Temp_40. Durch die hohe Temperatur bei der Variante Pool_Temp_40 und der angesetzten relativen Luftfeuchte von $\phi = 50\%$ ist

die absolute Feuchte in der Luft gegenüber der Variante Pool_Temp_20 deutlich höher, sodass die Luftfeuchtigkeit Einfluss auf den Verbrennungsprozess des Poolfeuers nimmt. Des Weiteren beeinflusst der geringere Sauerstoffgehalt in der Luft (pro m^3) bei gleichbleibenden Volumenströmen mit steigender Temperatur die Abbrandrate des Poolfeuers in der Brandkammer. Bei abnehmenden Temperaturen beeinflusst gleichzeitig der steigende Sauerstoffgehalt in der Luft (pro m^3) die Abbrandrate, sodass die Varianten Pool_Temp_0 und Pool_Temp_10 einen etwas höheren Verlauf der Wärmefreisetzungsrate in der Vollbrandphase aufzeigen.

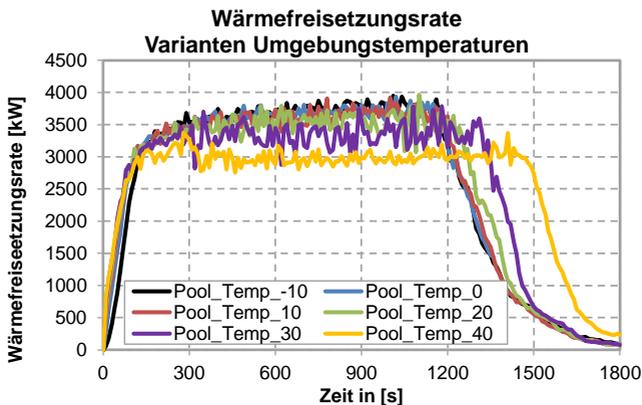


Abbildung 7-32: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Prüfzeit für die Simulationsvarianten mit unterschiedlichen klimatischen Umgebungsbedingungen

In Abbildung 7-33 sind die einwirkenden Wärmestromdichten oberhalb der Brandkammeröffnung entlang der Hauptbeanspruchungsachse I dargestellt. Aufgrund der Verläufe der Wärmestromdichten wird der Einfluss durch den reduzierten Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei der Variante Pool_Temp_40 im Vergleich zur Variante Pool_Temp_20 deutlich. Insbesondere im Bereich unmittelbar oberhalb der Brandkammeröffnung liegen die simulierten Wärmestromdichten der Variante Pool_Temp_40 zwischen 10 bis 15 kW/m^2 unterhalb der Variante Pool_Temp_20. Die Variante Pool_Temp_-10 zeigt ab einer Höhe von 2,0 m über der Brandkammeröffnung niedrige einwirkende Wärmestromdichten gegenüber der Variante Pool_Temp_20 auf, was grundsätzlich auf die höheren Energieverluste in der Flamme durch die Einmischung der kühleren Umgebungsluft zurückzuführen ist. Des Weiteren nimmt die Gesamteinwirkung infolge der einwirkenden Wärmestromdichte auf die Prüfwandfläche bei der Variante Pool_Temp_-10 mit 732 MJ gegenüber der Variante Pool_Temp_20 mit 783 MJ über die Simulationszeit von 1.800 Sekunden deutlich ab.

Die Abweichungen der simulierten Wärmestromdichten in der Achse I zwischen der Variante Pool_Temp_20 und der Variante Pool_Temp_30 betragen maximal 6 kW/m². Die mittlere Wärmefreisetzungsrate der Variante Pool_Temp_30 beträgt zwischen der 150. bis zur 1.350. Prüfsekunde 3.254 kW und bei der Variante Pool_Temp_20 3.428 kW. Für die Variante Pool_Temp_30 wird eine Gesamteinwirkung auf die Prüfwandfläche von 784 MJ bis zur 1.800. Prüfsekunde erzielt.

Aufgrund der guten Übereinstimmung der Gesamteinwirkung über die Prüfzeit von 1.800 Sekunden und der geringfügigen Abweichung der erzielten mittleren Wärmefreisetzungsrate zwischen der 150. bis zur 1.350. von ca. 5 % können die lokalen Abweichungen bei der Variante Pool_Temp_30 gegenüber der Variante Pool_Temp_20 in Achse I als noch tolerabel betrachtet werden.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Reproduzierbarkeit des Brandversuchs an unterschiedlichen Prüfeinrichtungen sollten die einzuhaltenden Umgebungstemperaturen während der Prüfung auf Grundlage der vorangegangenen Ergebnisse im Bereich von 0 °C bis 30 °C liegen.

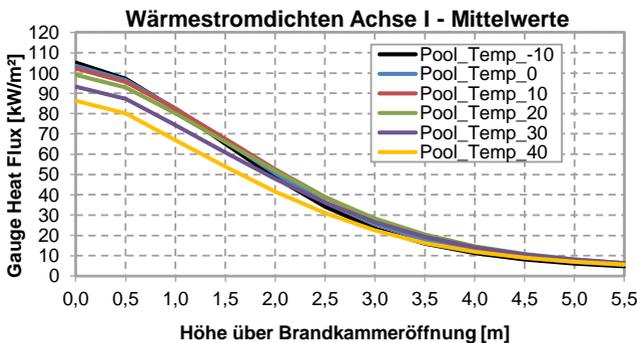


Abbildung 7-33: Simulierte mittlere Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) entlang der Achse I während der Vollbrandphase für die Simulationsvarianten mit unterschiedlichen klimatischen Umgebungsbedingungen

Relative Luftfeuchte

In Abbildung 7-34 sind auf der linken Seite die Verläufe der Wärmefreisetzungsraten und auf der rechten Seite die Verläufe der Wärmestromdichten entlang Achse I oberhalb der Brandkammeröffnung für die Simulationsvarianten mit einer Umgebungstemperatur von $T = 30\text{ °C}$ (obere Grenzwerttemperatur) und den relativen Luftfeuchten von $\phi = 0\text{ %}$

(Pool_Feuchte_0), $\phi = 50\%$ (Pool_Feuchte_50) und $\phi = 100\%$ (Pool_Feuchte_100) gegenübergestellt.

Die festgestellten Abweichungen unter den Verläufen der Wärmefreisetzungsrate zeigen den Einfluss der relativen Luftfeuchte bei hohen Temperaturen auf den Verbrennungsprozess beim Poolfeuer. Unter gleichzeitiger Betrachtung der lokalen Wärmestromdichten entlang der Achse I kann aufgrund der geringen Unterschiede in den Verläufen der Wärmestromdichte keine eindeutige Aussage zum Einfluss der relativen Luftfeuchten bei einer Umgebungstemperatur von $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ getroffen werden.

Die einwirkende Wärmeenergie auf die Prüfwandfläche für die untersuchte Beanspruchungszeit von 1.800 Sekunden ergibt für die Variante Pool_Feuchte_100 zu 764 MJ und für die Variante Pool_Feuchte_0 zu 794 MJ. Die Abweichung gegenüber der Variante Pool_Feuchte_50 mit einer einwirkenden Wärmeenergie 783 MJ beträgt somit maximal ca. 2,5 %, sodass der Einfluss der relativen Luftfeuchte bei Umgebungstemperaturen bis $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ vernachlässigbar ist.

Der Einfluss der relativen Luftfeuchte nimmt mit sinkenden Umgebungstemperaturen deutlich ab, sodass die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit dem unteren festgelegten Grenzwert mit einer Umgebungstemperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ hier nicht weiter aufgeführt werden.

Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Simulation sind für die definierten, einzuhaltenden Umgebungstemperaturen während der Prüfung im Bereich von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ keine Beschränkungen hinsichtlich einer einzuhaltenden relativen Luftfeuchte erforderlich.

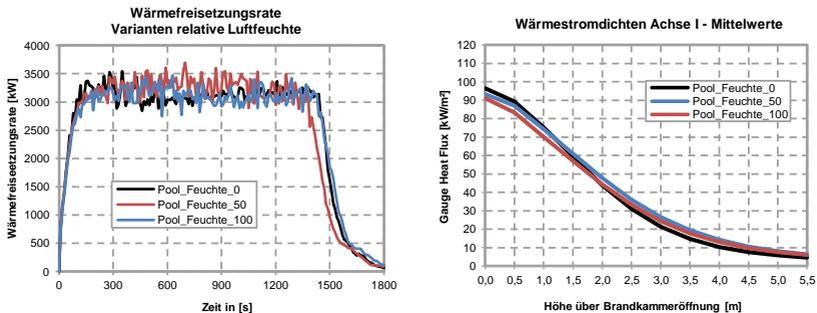


Abbildung 7-34: Darstellung der Wärmefreisetzungsraten in Abhängigkeit der Prüfzeit (links) sowie simulierte mittlere Wärmestromdichten (Gauge Heat Flux - GHF) entlang der Achse I während der Vollbrandphase (rechts) für die Simulationsvarianten mit unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bei einer Umgebungstemperatur von $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

7.3.6.2 Einfluss Prüfhallenhallengeometrie

In den nachfolgenden Untersuchungen werden die Auswirkungen der Rückstrahlungseffekte durch die Umfassungsbauteile auf den Brandversuch bestimmt. Dabei ist das Ziel der Untersuchungen, eine Empfehlung für Mindestabstände der Umfassungsbauteile zum Prüfstand zu bestimmen sowie Einflüsse von Materialeigenschaften der Umfassungsbauteile zu identifizieren.

Der Prüfhallenboden wird in den Simulationsvarianten weiterhin als Beton angesetzt. Eine Variation der Materialeigenschaften des Prüfhallenbodens wird nicht weiter untersucht, da Beton als Bodenfläche auch alternative Materialien wie zum Beispiel ein Zementestrich hinsichtlich der brandtechnischen Eigenschaften näherungsweise abbildet. Für den Prüfstand werden bei den folgenden Simulationsversuchen weiterhin Porenbeton als Material für die Prüfwände und die Brandkammer berücksichtigt.

Für die Untersuchung der Rückstrahlungseffekte werden, auf Grundlage der bisher durchgeführten Untersuchungen, die Emissionsgrade gemäß den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung herangezogen. Dadurch werden die Emissionsgrade der Bauteile realitätsnah für den maßgebenden Wellenlängenbereich von Bränden simuliert.

Grundmodell – Versuchsreihe V1

Zur Untersuchung der Rückstrahlungseffekte wird zunächst ein Simulationsmodell mit einer Wärmequelle erarbeitet, welches konservativ die Wirkung aus Strahlung und Konvektion des Prüffeuers auf den Prüfstand sowie die Strahlung an Strahlungsaufnehmern gegenüberliegend zum Prüfstand simuliert.

Das Simulationsmodell dient ausschließlich zur Erfassung der Rückstrahlungseffekte aus den Umfassungsbauteilen. Aus diesem Grund werden im Strahlungsmodell die H₂O- und CO₂-Anteile in der Umgebungsluft mit null angesetzt. Des Weiteren werden die Wärmeübergangskoeffizienten aller Bauteile mit null berücksichtigt, sodass diese nicht durch die Umgebungsluft in der simulierten, geschlossenen Prüfhalle zusätzlich abgekühlt werden. Dies ermöglicht eine Bewertung ausschließlich der Strahlungseffekte, ohne Einflussnahme einer sich positiv auswirkende Konvektion zwischen den Bauteilen und der Umgebungsluft.

In einer ausführlichen Voruntersuchung durch den Verfasser wurde eine repräsentative Wärmequelle mit unterschiedlichen Geometrien und Temperaturen in variierenden Abständen zur Prüfwand und zum Prüfhallenboden simuliert. Die größte Übereinstimmung zwischen Strahlungsmodell und Prüffeuermodell wurde bei einer Temperatur der Wärmequelle von 800 °C festgestellt. Der Temperaturanstieg der Wärmequelle wurde dabei in der Brandentstehungs- und Entwicklungsphase bis zur 60. Prüfsekunde linear ansteigend

angesetzt. Die Vollbrandphase wurde durch eine konstante Temperatur der Wärmequelle von 800 °C bis zur 1.200. Prüfsekunde simuliert. Des Weiteren wurde die Abklingphase von der 1.200. Sekunde bis zur 1.250. Sekunde linear auf null abfallend berücksichtigt.

Die geometrische Ausbildung der Wärmequelle ist in Abbildung 7-35 dargestellt. Hierzu repräsentiert die Wärmequelle näherungsweise den Flammenkörper und die gemittelten Flammentemperaturen aus dem Simulationsmodell des Prüffeuers.

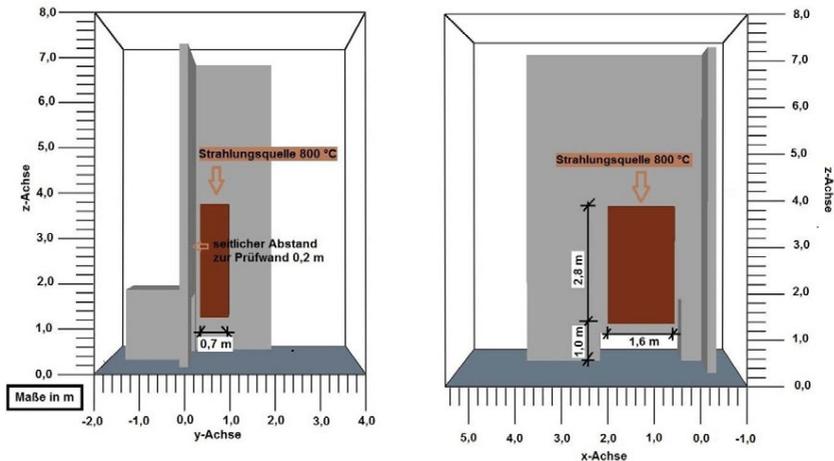


Abbildung 7-35: Darstellung des numerischen Modells in FDS zur Simulation des Prüffeuers durch eine repräsentative Wärmequelle

In Abbildung 7-36 ist der dazugehörige Messstellenplan zum Simulationsmodell dargestellt. Die gegenüberliegenden Strahlungsaufnehmer HF2a/b, HF4a/b und HF6a/b zum Prüfstand wurden sowohl in einem wiederholten Simulationslauf am definierten Prüfstand im Prüffeuermodell (Sim) als auch beim Strahlungsmodell (Mod) zur Bestimmung gleichwertiger Strahlungswirkungen als Referenzmesspunkte herangezogen.

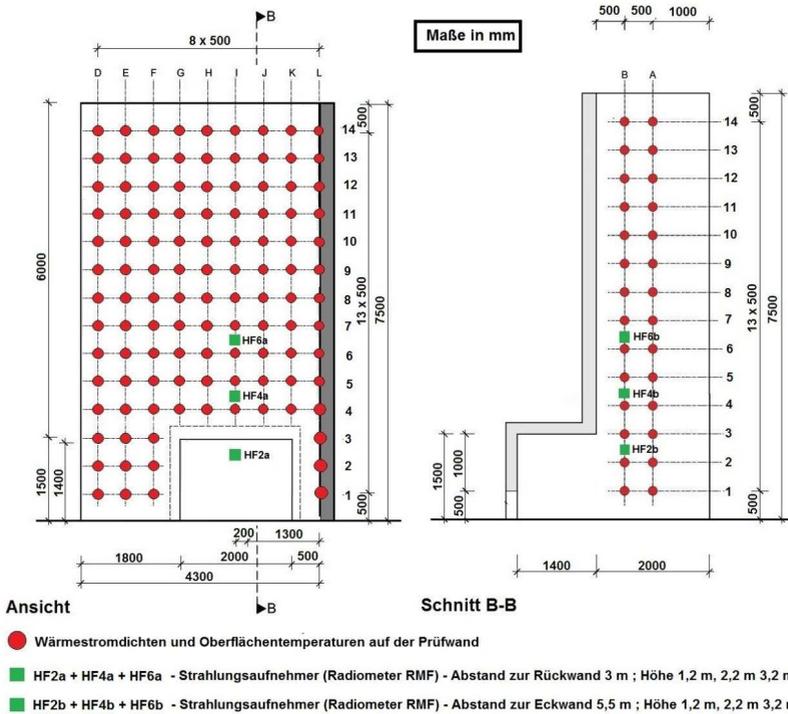


Abbildung 7-36: Geometrische und messtechnische Ausführungen am Prüfstand für die untersuchten Simulationsmodelle

In Abbildung 7-37 sind die Ergebnisse aus der Übereinstimmungsprüfung zwischen dem Prüffeu- und dem Strahlungsmodell für die Messstellen der Strahlungsaufnehmer vor dem Prüfstand dargestellt. Aus den Verläufen der Wärmestromdichten infolge Strahlung wird deutlich, dass mit zunehmender Höhe über der Brandkammeröffnung die Wärmestromdichten aus dem Strahlungsmodell höher liegen als bei den Verläufen aus dem Prüffeuermmodell. Unter Betrachtung des Flächenintegrals der einwirkenden Wärmestromdichten infolge Strahlung und Konvektion für das Prüffeuermmodell (Sim) und der Gegenüberstellung des Flächenintegrals der Wärmestromdichten nur infolge Strahlung für das Strahlungsmodell (Mod) gemäß Abbildung 7-38 wird deutlich, dass beide Simulationsmodelle näherungsweise die gleiche Einwirkung auf die Prüfwandfläche erzeugen.

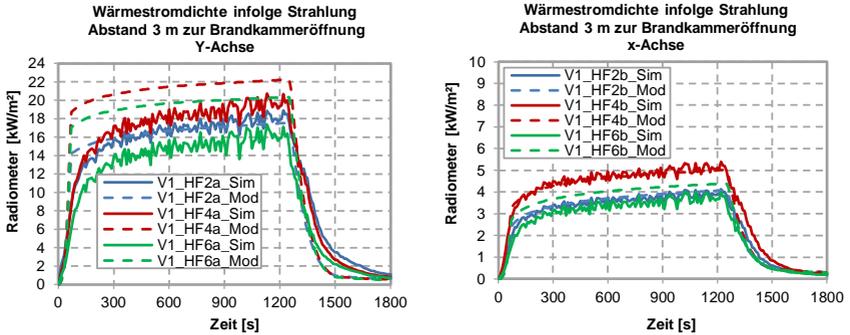


Abbildung 7-37: Gegenüberstellung der simulierten Wärmestromdichten an den Messstellen HF2a+HF4a+HF6a sowie HF2b+HF4b+HF6b (Radiometer- RMF) des Prüffeuermodells (Sim) und des Strahlungsmodells (Mod)

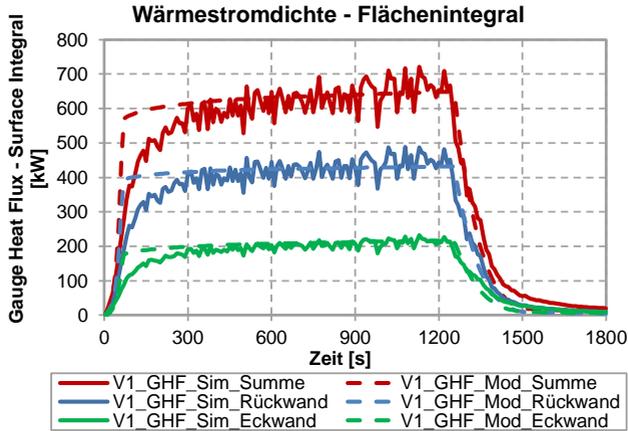


Abbildung 7-38: Gegenüberstellung des Integrals der einwirkenden Wärmestromdichte (Gauge Heat Flux - GHF) auf die Prüfwanfläche über die Zeit in MJ des Prüffeuermodells (Sim) und des Strahlungsmodells (Mod)

Somit bildet das Strahlungsmodell mit der simulierten Wärmequelle in sehr guter Näherung die Einwirkung aus dem Prüffeuermodell auf die Prüfwan ab. Gleichzeitig wird durch die erhöhte Strahlung auf die Umfassungsbauteile im Strahlungsmodell ein teilweises Mitbrennen einer brennbaren Außenwandbekleidung mit abgedeckt.

Um das Strahlungsmodell hinsichtlich möglicher Unsicherheiten durch den Einfluss der geometrischen Diskretisierungen für die gewählte Gitterzellengröße von 10 cm und der voreingestellten Anzahl von 100 Strahlungswinkeln in FDS abzusichern, wurde diesbezüglich

eine Konvergenzstudie am Simulationsmodell durchgeführt. Dazu wurde die Gitterzellengröße in einem weiteren Simulationsdurchlauf des Strahlungsmodells ergänzend mit einer Gitterzellengröße von 5 cm berücksichtigt.

In Abbildung 7-39 ist auf der linken Seite das Ergebnis der beiden untersuchten Gitterzellengrößen von 5 und 10 cm für den Verlauf des Flächenintegrals der einwirkenden Wärmestromdichten infolge Strahlung dargestellt. Auf Grundlage der eindeutigen Übereinstimmung beider Kurvenverläufe über die Simulationszeit ist eine Gitterzellengröße von 10 cm für die weiteren Untersuchungen als ausreichend zu betrachten.

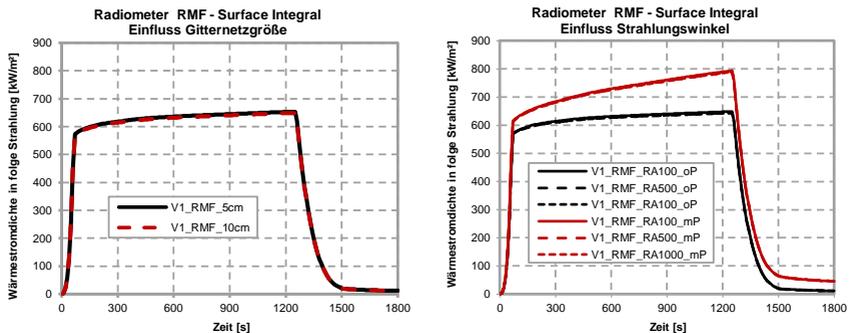


Abbildung 7-39: Darstellung der Ergebnisse aus der Konvergenzstudie für die Untersuchung zum Einfluss der Gitterzellengröße (links) und unterschiedlicher Anzahlen von Strahlungswinkeln (rechts)

In Abbildung 7-39 ist ergänzend auf der rechten Seite der Verlauf des Flächenintegrals der einwirkenden Wärmestromdichten infolge Strahlung auf die beanspruchte Prüfwandfläche für die Untersuchungsvarianten mit einer Anzahl der Strahlungswinkel von 100, 500 und 1000 sowie einer gewählten Gitterzellengröße von 10 cm dargestellt. Dabei wurden die Varianten ohne seitliche und obere Umfassungsbauteile (oP) und mit seitlichen und oberen Umfassungsbauteilen (mP) aus Porenbeton simuliert. Die lichte Höhe in der Prüfhalle wurde bei den Varianten mit Prüfhalle (mP) mit 10 m angesetzt. Der vordere lichte Abstand zwischen den Umfassungsbauteilen und der Rück- sowie Eckwand wurde jeweils mit 4,5 m berücksichtigt. Die Anordnung der rückseitigen Umfassungsbauteile kann der Abbildung 7-40 entnommen werden.

Aufgrund der Übereinstimmungen der Kurvenverläufe der unterschiedlichen Varianten ist eine Anzahl der Strahlungswinkel von 100 für die Untersuchungen beim Strahlungsmodell als ausreichend zu betrachten.

Abstand Seitenwände und Höhe Prüfhallendecke - Versuchsreihe V2

In einer zweiten Versuchsreihe wurde auf Grundlage des bestimmten Strahlungsmodells die Auswirkung der Rückstrahlung durch die Umfassungsbauteile auf die Prüfwand untersucht. Als Materialeigenschaft wurde im Strahlungsmodell den seitlichen und oberen Umfassungsbauteilen Porenbeton, aufgrund seiner positiven brandtechnischen und gleichzeitig energetischen Eigenschaften, zugewiesen. Eine Untersuchung zum Einfluss unterschiedlicher Ausführungsvarianten der Umfassungsbauteile erfolgt in der darauffolgenden Versuchsreihe V3.

In Abbildung 7-40 sind die unterschiedlichen geometrischen Abstandsmaße für die Untersuchungsreihe V2 dargestellt. Zwischen der hinteren Umfassungswand der simulierten Prüfhalle und der Rückwand des Prüfstands wurde ein Abstand von 2,0 m sowie zwischen der Eck- und der seitlicher Umfassungswand ein Abstand von 1,0 m berücksichtigt. Dadurch wird zum einen ein ausreichender rückseitiger Arbeitsbereich und zum anderen die notwendige Einströmung der Umgebungsluft in die rückseitige Zuluftöffnung der Brandkammer gewährleistet.

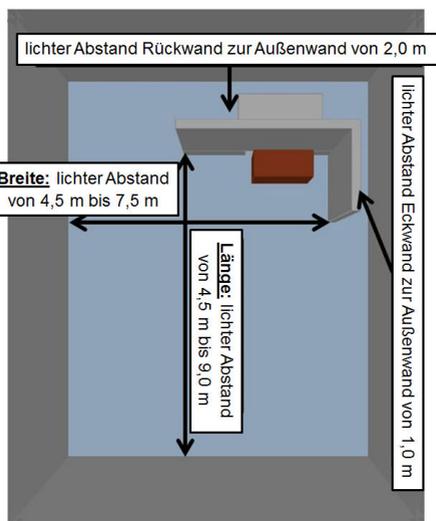


Abbildung 7-40: Darstellung der gewählten lichten Abstände in der Versuchsreihe zum Einfluss der Umfassungsbauteile

Die vorderen lichten Abstände der Rück- und Eckwand zu den Umfassungswänden werden in den unterschiedlichen Simulationsvarianten stufenweise um 1,5 m bis zu den ausgewiesenen Grenzen nach Abbildung 7-40 erhöht. Im ersten Simulationsschritt wird eine

lichte Höhe von 10,0 m in der Prüfhalle angesetzt, sodass ein ausreichender Abstand möglicher Flammen oberhalb des Prüfstands zum Deckenabschluss der Prüfhalle im experimentellen Brandversuch gewährleistet ist.

Die Bezeichnung der Untersuchungsvarianten erfolgt auf Basis der gewählten Abstände in der jeweiligen Simulationsvariante. Dabei sind die lichten Abstände in der Reihenfolge Breite, Länge und Höhe ausgewiesen. Für die Grundvariante, ohne Berücksichtigung von seitlichen und oberen Umfassungsbauteilen, wird die Bezeichnung „ohne Prüfhalle“ verwendet.

In Abbildung 7-41 ist das Integral über die Zeit der einwirkenden Wärmestromdichten infolge Strahlung auf die Prüfwandfläche für die untersuchten Varianten gegenübergestellt. Die Variante V2_4,5m_4,5m_10,0m zeigt dabei eine Erhöhung der Einwirkung um 151 MJ bzw. um ca. 15,7 % gegenüber der Variante V2_ohne_Prüfhalle. Mit zunehmenden Abständen der seitlichen Umfassungsbauteile reduzieren sich die Rückstrahlungseffekte auf die Prüfwand kontinuierlich. Bei der Variante V2_6,0m_7,5m_10,0m liegt die Erhöhung der Einwirkung gegenüber der Variante V2_ohne_Prüfhalle nur noch bei 74 MJ bzw. bei ca. 8,4 %.

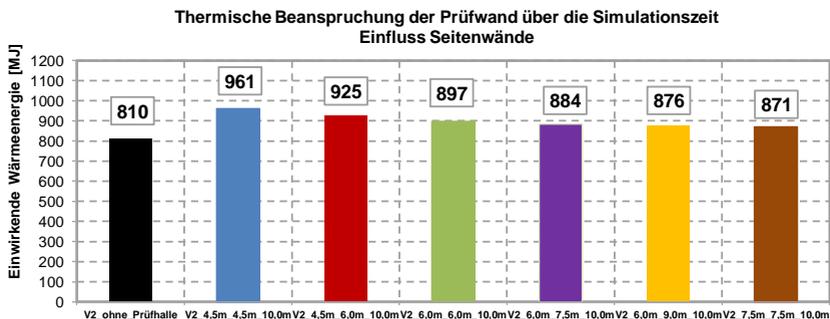


Abbildung 7-41: Integral der einwirkenden Wärmestromdichten (Radiometer - RMF) auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ für die untersuchten Abstandsvarianten

Mit einer weiteren Erhöhung der Abstände der Umfassungsbauteile gegenüber der Variante V2_6,0m_7,5m_10,0m reduzieren sich die Rückstrahlungseffekte auf die Prüfwand nur noch sehr geringfügig.

In Abbildung 7-42 werden die lokalen Beanspruchungen der mittleren, einwirkenden Wärmestromdichten infolge Strahlung (Radiometer – RMF) von der 300. bis zur 1.200. Sekunde am Prüfstand in den Achsen G und N dargestellt. Aufgrund der Verläufe der Wärmestromdichten für die betrachteten Varianten wird deutlich, dass sich der Wärmestrom

aus den Rückstrahlungseffekten näherungsweise gleichmäßig auf die Prüfwandfläche verteilt. Dabei zeigt die Variante V2_4,5m_4,5m_10,0m in den Achsen G und N eine lokale Erhöhung der Wärmestromdichten infolge Strahlung von maximal ca. 3,7 kW/m² gegenüber der Variante V2_ohne_Prüfhalle auf. Bei der Variante V2_6,0m_7,5m_10,0m beträgt die maximale lokale Erhöhung der Wärmestromdichte infolge der Rückstrahlung der Umfassungsbauteile nur noch ca. 1,5 kW/m².

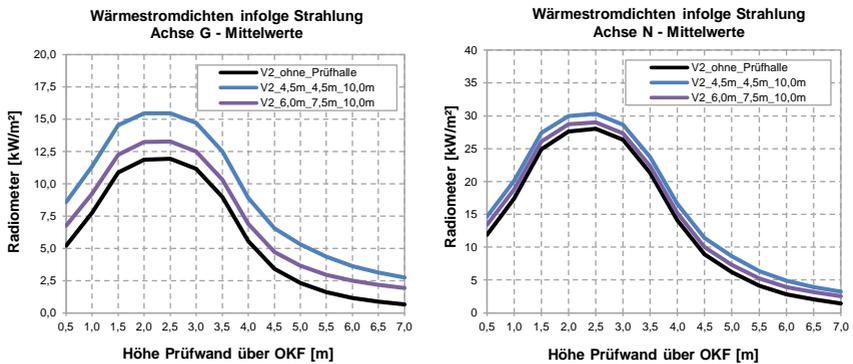


Abbildung 7-42: Simulierte mittlere Wärmestromdichten (Radiometer - RMF) entlang der Achse G und N von der 300. bis zur 1.200. Sekunde

In Abbildung 7-43 wird der Einfluss einer Erhöhung der Prüfhalle auf eine lichte Höhe von 12 m mit der Variante V2_6,0m_7,5m_12,0m sowie mit der V2_6,0m_9,0m_12,0m gegenüber den Varianten bei gleichen seitlichen Abständen der Umfassungswände und einer lichten Höhe von 10,0 m dargestellt.

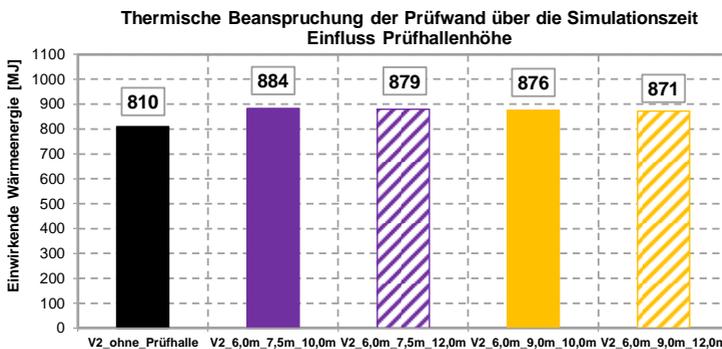


Abbildung 7-43: Integral der einwirkenden Wärmestromdichten (Radiometer - RMF) auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ für die untersuchten Höhenvarianten

Die Gegenüberstellung der Varianten V2_6,0m_7,5m_10,0m und V2_6,0m_7,5m_12,0m zeigt, dass sich die Rückstrahlungseffekte insgesamt nur noch geringfügig reduzieren.

Alle seitlichen und oberen lichten Abstände gemäß V2_6,0m_7,5m_10,0m können unter Berücksichtigung der Umfassungsbauteile aus Porenbeton insgesamt als ausreichend betrachtet werden. Somit lässt sich der Einfluss der Rückstrahlungseffekte im Brandversuch unter Berücksichtigung der Erhöhung der thermischen Beanspruchung auf die Prüfwand auf ein tolerables Maß reduzieren.

Material seitliche und obere Umfassungsbauteile - Versuchsreihe V3

In der Versuchsreihe V3 wird, unter Berücksichtigung der Mindestabstände der Umfassungsbauteile gemäß Variante V2_6,0m_7,5m_10,0m, der Einfluss unterschiedlicher Materialien der Umfassungsbauteile für typische Hallenkonstruktionen von Brandprüfstellen weltweit untersucht.

In Tabelle 7-5 sind die verwendeten Materialparameter einschließlich der angesetzten Materialdicken der seitlichen und oberen flächigen Bauteile angegeben. Zusätzlich wurde die Wärmeeindringzahl b ausgewiesen, welche sich aus der Wurzel des Produkts der Wärmespeicherkapazität, der Wärmeleitfähigkeit und der Rohdichte zusammensetzt. Die Wärmeeindringzahl definiert die eindringende Wärmeenergie von der Oberfläche in die Tiefe des Bauteils. Mit zunehmender Größe der Wärmeeindringzahl, steigt die Absorption der Wärmeenergie in die Tiefe des Bauteils.

Tabelle 7-5: Materialspezifische Eigenschaften der seitlichen und oberen Umfassungsbauteile für die Versuchsreihe V3

Material	Wärmespeicherkapazität [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	Rohdichte [kg/m ³]	Wärmeeindringzahl [(W ² ·s/(m ⁴ ·K ²)) ^{0,5}]	Bauteildicke [m]	Emissionsgrad [-]
Stahl*	0,45	54	7.850	13.811	0,003	0,7**
Beton*	0,9	1,64	2.100	1.761	0,2	0,7**
Porenbeton*	1,05	0,15	600	307	0,2	0,8**
Mineralwolle*	0,85	0,04	125	66	0,16	0,8**

* Ausführliche Eingabedateien für die Implementierung in FDS und ggf. temperaturabhängiger Materialeigenschaften sowie Quellennachweise s. Anlage F

** Emissionsgrad nach den Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung

Die Abbildung 7-44 stellt die Einwirkungen der Wärmestromdichten infolge Strahlung auf die Prüfwandfläche für die Varianten mit den unterschiedlichen Materialeigenschaften der Umfassungsbauteile über die gesamte Simulationszeit von 1.800 Sekunden gegenüber. Dabei zeigt die Variante mit den Umfassungsbauteilen aus Beton eine Reduzierung der

Rückstrahlungseffekte gegenüber der Variante mit Porenbeton auf. Dies ist auf das bessere Wärmeabsorptionsvermögen des Materials zurückzuführen, weshalb die Oberflächen in der Simulation geringere Temperaturen gegenüber der Variante mit Porenbeton aufweisen. Bei der Variante der Umfassungsbauteile mit der Ausführung aus Stahlblechen werden näherungsweise die gleichen Rückstrahlungseffekte auf die Prüfwand erzeugt, wie bei der Variante mit den Umfassungsbauteilen aus Porenbeton. Für die Varianten sollten die empfohlenen Mindestabstände der Variante V2_6,0m_7,5m_10,0m zur Gewährleistung reproduzierbarer Ergebnisse im Brandversuch berücksichtigt werden. Zur Vereinheitlichung der Anforderungen wird für die Variante mit den Umfassungsbauteilen aus Beton ebenfalls der Abstand gemäß Variante V2_6,0m_7,5m_10,0m empfohlen.

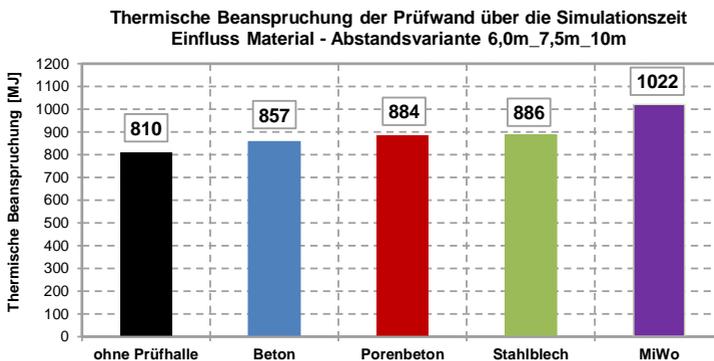


Abbildung 7-44: Integral der einwirkenden Wärmestromdichte (Radiometer - RMF) auf die Prüfwandfläche über die Zeit in MJ für die untersuchten Materialien der Umfassungsbauteile

Die Variante mit einer Bekleidung aus Mineralwolle zeigt aufgrund der niedrigen Wärmeindringzahl b die am deutlich ungünstigsten, wirkenden Rückstrahlungseffekte auf die Prüfwand. Die Ausführung einer innenseitigen Bekleidung aus Mineralwolle sollte bei Abständen gemäß Variante V2_6,0m_7,5m_10,0m vermieden werden.

7.3.6.3 Einfluss Lüftungsbedingungen

Um einen ausreichenden Schutz des Brandversuchs vor Windeinflüssen zu gewährleisten, ist dieser grundsätzlich in einer witterungsgeschützten Prüfhalle durchzuführen. Zusätzlich sind ausreichende Vorkehrungen gegen Windströmungen von außen durch ggf. vorhandene Zuluftöffnungen vorzunehmen, sodass das Prüffeuere und das Brandverhalten der Außenwandbekleidung durch diese nicht maßgebend beeinflusst wird.

Wie die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 5 und 6 aufgezeigt haben, können sowohl natürliche als auch maschinell bedingte Lüftungsbedingungen wesentlichen Einfluss auf die Brandprüfung nehmen. In einigen Normen zu den Prüfverfahren werden dazu einzuhaltende Strömungsgeschwindigkeiten vor Prüfbeginn am Prüfstand definiert. Beim Brandversuch gemäß LEPIR 2 [6] sind Strömungsgeschwindigkeit von ≤ 3 m/s oder beim Brandversuch gemäß BS 8414-1/-2 ([19], [20]) von ≤ 2 m/s vorgegeben. Beim Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] werden sogar Strömungsgeschwindigkeiten von $\leq 0,5$ m/s (kurzzeitig ≤ 1 m/s) gefordert. Bei den festgelegten Werten handelt es sich um Erfahrungswerte aus durchgeführten Brandversuchen.

Zur Definition von notwendigen Anforderungen an Zu- und Abluftöffnungen bei natürlichen Lüftungsbedingungen werden bei allen ausgewerteten Normen für mittel und groß skalierte Brandversuche keine Angaben gemacht. Auch hinsichtlich zulässiger Volumenströme bei maschinellen Absaugvorrichtungen sind in den Normen keine Anforderungen vorgegeben. Dies liegt insbesondere daran, dass die Herleitung von definierten natürlichen oder maschinellen Lüftungsbedingungen u. a. von der Hallengeometrie, dem Standort und den Klimabedingungen abhängt. Des Weiteren sind für die Untersuchungen zur Bestimmung der notwendigen natürlichen oder maschinellen Lüftungsbedingungen im Brandversuch zwingend deren Einflüsse auf das Prüffeuere sowie auf das Brandverhalten von unterschiedlichen brennbaren Außenwandbekleidungen zu berücksichtigen. Dabei sind die brandphysikalischen Zusammenhänge so komplex, dass nur äußerst schwierige allgemeingültige Definitionen hergeleitet werden können. In Deutschland gibt es alleine ca. 370 unterschiedliche zugelassene WDVS mit einer abZ [58], die aufzeigen in welcher Vielzahl Außenwandbekleidungen alleine in Deutschland vorhanden sind.

Aufgrund der notwendigen umfangreichen Untersuchungen zur Definition allgemeingültiger, fundamentierter natürlicher und maschineller Zu- und Abluftbedingungen empfiehlt es sich hier, ein eigenständiges Forschungsvorhaben bzgl. dieser Fragestellung durchzuführen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Brandprüfung von Außenwandbekleidungen im groß skalierten Brandversuch ermöglicht das komplexe Brandverhalten von Außenwandbekleidungs-systemen realitätsnah zu prüfen. Dadurch kann gewährleistet werden, dass ein kritisches Brandverhalten einer Außenwandbekleidung gegenüber Brandprüfungen im klein oder mittel skalierten Maßstab nicht unterschätzt wird.

Ziel dieser Arbeit war es, ein Prüfverfahren zu entwickeln, mit dem realitätsnah Außenwandbekleidungen durch ein skaliertes Prüffeuer an einem ausreichend dimensionierten Prüfstand für das maßgebende kritische Raumbrandszenario geprüft werden kann. Mit dem Prüfverfahren sollen die bauordnungsrechtlichen Anforderungen auf nationaler und europäischer Ebene, hinsichtlich der Begrenzung der Brandausbreitung und dem zu beurteilenden Beitrag zum Brand von Außenwandbekleidung, nachgewiesen werden können. Zur Kostenersparnis und um den technischen Aufwand zur Umsetzung des Prüfverfahrens auf das Notwendigste zu reduzieren sowie um eine gute Reproduzierbarkeit im Brandversuch zu gewährleisten, wurden mit Hilfe von entwickelten Simulationsmodellen umfangreiche Untersuchungen zum Prüffeuer in der Wechselwirkung mit der Prüfstandsgeometrie und weiteren maßgebenden Umgebungseinflüssen durchgeführt.

Zur notwendigen Konkretisierung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen an Außenwandbekleidungen im Zusammenhang mit der Umsetzung im Prüfverfahren wurden insbesondere die Berufsfeuerwehren in das Forschungsthema mit eingebunden. Dazu wurde durch den Verfasser ein Fragenkatalog entwickelt, welcher die wesentlichen Aspekte des abwehrenden Brandschutzes im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen und den dazugehörigen Schutzzielen eruiert.

Als maßgebendes Raumbrandszenario wurde das standardisierte Schadensereignis für den „kritischen Wohnungsbrand“ gemäß [121] bestimmt. Auf dieser Basis sind die teilweise vorgeschriebenen Hilfsfristen in den Bundesländern darauf ausgelegt, dass im Regelfall innerhalb von 20 Minuten nach Brandentdeckung mit dem Beginn wirksamer Löscharbeiten durch die Feuerwehr gerechnet werden kann. Darauf aufbauend wurde für das Prüfverfahren eine notwendige Brandbeanspruchungsdauer in der Vollbrandphase von 20 Minuten definiert, um für Außenwandbekleidungen mit der nationalen bauordnungsrechtlichen Anforderung schwerentflammbar, eine ausreichende Sicherheit bei der Nachweisführung der einzuhaltenden Schutzziele erzielen zu können.

Zur Quantifizierung einer möglichen thermischen Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen wurde ein Berechnungsverfahren auf Basis empirischer Ansätze zur Bestimmung der Temperaturen in der Flamme oberhalb einer offenstehenden

Brandraumöffnung für das Raumbrandszenario angewendet. Im Rahmen einer Parameterstudie wurde durch die Variation unterschiedlicher geometrischer und brandtechnischer Einflussparameter die maßgebende thermische Beanspruchung einer Außenwand für das kritische Raumbrandszenario bei einem Wohnraumbrand bestimmt. Anschließend wurden daraus die Flammentemperaturen sowie die Flammenhöhe für die weiteren Untersuchungen abgeleitet.

Als maßgebendes kritisches Raumbrandszenario wurde eine Brandraumgeometrie mit einer Grundfläche von 25 m², einer lichten Raumhöhe von 2,5 m und einer offenstehenden Brandraumöffnung ohne Fenstersturz mit den Abmessungen von B x H = 2,0 m x 1,625 m bestimmt. Aufgrund der definierten brandlastgesteuerten Ventilationsbedingungen des Brandraums ergibt sich eine maßgebende Wärmefreisetzungsrate in der Vollbrandphase von 7,75 MW. Die zu erwartende Flammenhöhe über der Brandraumöffnung beträgt auf Grundlage der bestimmten Temperaturverläufe in der Flammenachse ca. 3,5 m und die Wärmefreisetzungsrate an der Brandraumöffnung ca. 2,58 MW.

Um kostenintensive Brandversuche bei der Entwicklung des Prüfverfahrens zu vermeiden, wurden geeignete Simulationsmodelle entwickelt. Dabei ist es gelungen für die drei untersuchten Prüffeuertypen „Poolfeuer“, „Holzkrippe“ und „Kompakt-Gasbrenner“ numerische Simulationsansätze zu bestimmen, welche erfolgreich an unterschiedlichen Prüfstandsgeometrien mit variierenden Brandkammer- und Brandraumgeometrien von Brandversuchen validiert wurden.

Zur Bestimmung eines geeigneten, skalierten Prüffeuers für das Prüfverfahren wurden vier wesentliche Anforderungsmerkmale für die untersuchten Prüffeuertypen des Poolfeuers mit dem Brennstoff Isopropanol, dem Kompakt-Gasbrenner mit dem Brennstoff Propan und der Holzkrippe aus Fichtenholz definiert:

1. Repräsentative Naturbrandbeanspruchung,
2. Reproduzierbarkeit,
3. Begrenzung des technischen Aufwands zur Bereitstellung und Umsetzung,
4. Variabilität der Prüfdauer.

Durch die Auswertung der zugrunde gelegten Brandversuche konnten die Prüffeuereigenschaften für die wesentlichen Anforderungsmerkmale bewertet werden. In diesem Zuge zeigten die Untersuchungen, dass das Poolfeuer die größte Übereinstimmung mit den gestellten Anforderungsmerkmalen erzielt. Besonders hervorzuheben ist dabei der geringfügige technologische Aufwand zur Bereitstellung des Poolfeuers, die einfache technische Umsetzung im Brandversuch sowie die Variabilität bei der Prüfdauer durch Anpassung des Füllstands des Brennstoffs in der Poolwanne für die Brandprüfung von unterschiedlichen Klassifizierungen der Außenwandbekleidung.

Der untersuchte Kompakt-Gasbrenner ist insbesondere bei der technischen Umsetzung für die definierte erforderliche Wärmefreisetzungsrates als sehr aufwändig zu betrachten. Durch den erforderlichen Gasdurchsatz für die Brandprüfung sind ein ausreichend dimensionierter Gastank sowie aufwändige Steuerungseinrichtungen mit Vorkehrungen gegen die Vereisung der Anlagenkomponenten bereitzustellen, welche die Kosten für die Brandprüfung wesentlich erhöhen. Das Brandverhalten einer einzelnen Holzkrippe zeigte auf Grundlage der Vielzahl an untersuchten Brandversuchen insgesamt keine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit, sodass dieser Prüffeuertyp zur Gewährleistung gleichwertiger Prüfergebnisse an unterschiedlichen Prüfeinrichtungen als nicht geeignet betrachtet wird.

Im Rahmen einer Simulationsstudie wurde die repräsentative Naturbrandbeanspruchung durch einen Vergleich der Flammentemperaturen zwischen den Prüffeuertypen im simulierten Brandversuch und dem kritischen Raumbrandszenario untersucht. Um gleichzeitig die notwendige Prüffeuereistung so gering wie möglich anzusetzen, wurden die drei untersuchten Prüffeuertypen in einer Brandkammer an einem Prüfstand mit der Höhe von drei repräsentativen Geschossen eines Gebäudes der GKL 4 oder GKL 5 positioniert, sodass die Energieverluste aus der Wärmefreisetzungsrates des Prüffeuers an der Brandkammeröffnung wesentlich gegenüber einem Prüffeuere in einem Brandraum reduziert werden konnten. Dadurch konnten sowohl das Poolfeuer mit dem Brennstoff Isopropanol als auch der Kompakt-Gasbrenner mit dem Brennstoff Propan mit einer skalierten Wärmefreisetzungsrates in der Brandkammer von ca. 3,5 MW die Flammentemperaturen oberhalb der Brandkammeröffnung für das maßgebende Raumbrandszenario mit einer Wärmefreisetzungsrates im Brandraum von 7,75 MW simulieren. Für das Prüffeuere mittels Holzkrippe konnte im Simulationsversuch bei einer Wärmefreisetzungsrates von ca. 3,5 MW die Flammentemperaturen aus dem Raumbrandszenario nicht erzielt werden.

Auf Grundlage des als maßgebend bestimmten Poolfeuere mit einer Leistung von ca. 3,5 MW in der Vollbrandphase wurde eine umfangreiche Parameterstudie auf Grundlage numerischer Simulationen durchgeführt. Dabei wurde für den Brandversuch eine L-förmige Prüfwandgeometrie mit einer Rück- und Eckwand sowie eine geometrisch, materialspezifisch und lüftungstechnisch optimierte Brandkammerkonfiguration bestimmt, die es ermöglichen, reproduzierbare Ergebnisse bei unterschiedlichen Prüfaufbaudicken zu erzielen.

Als Material für den Prüfstand wurde, aufgrund der geringen Wärmeabsorption, Porenbeton oder ein gleichwertiges Material wie z.B. Leichtbeton, bestimmt. Die Höhe des Prüfstands muss insgesamt mindestens 7,5 m betragen, um oberhalb der Brandkammer (1,5 m + 0,2 m Geschossdecke des Brandgeschosses) zwei Vollgeschosse mit jeweils einer Höhe von 2,9 m realitätsnah abbilden zu können. Dadurch können die Schutzziele einer Begrenzung der Brandausbreitung auf maximal zwei Geschosse im Brandversuch unmittelbar aus den

Versuchsergebnissen abgeleitet werden. Als Hilfsmittel wurden neben der Beobachtung von Brandschädigungen der Außenwandbekleidung zusätzliche Messstellenebenen am Prüfstand definiert, welche es ermöglichen, zukünftig verschiedene Grenztemperaturen für unterschiedliche Außenwandbekleidungs-systeme zu definieren.

Durch den quantitativen Nachweis der thermischen Brandbeanspruchung von simulierten applizierten nichtbrennbaren Außenwandbekleidungen bis zu einer maximalen Aufbaudicke von 0,4 m am Prüfstand wurde der optimierte Abstand zwischen Brandkammerlaibung und Innenseite der Eckwand am Rohbau der Prüf-wand mit 0,5 m bestimmt. Ein aufwändiger Umbau der Eckwand am Prüfstand bei unterschiedlichen Aufbaudicken einer applizierten Außenwandbekleidung kann somit vermieden werden.

Für das Umgebungsklima im Brandversuch wurde bei den simulierten Wärmefreisetzungs-raten des Prüffeuers sowie der thermischen Einwirkung auf die Prüf-wand, unabhängig einer variierenden relativen Luftfeuchte, eine gute Reproduzierbarkeit bei Umgebungstemperaturen zwischen 0 °C und 20 °C festgestellt. Als oberer Grenzwert konnte eine Umgebungstemperatur von 30 °C bestimmt werden, welche es ermöglicht, im Brandversuch noch eine ausreichende Reproduzierbarkeit der Wärmefreisetzungsrate sowie der thermischen Beanspruchung der Prüf-wand zu gewährleisten. Dadurch kann auch an warmen Sommertagen eine Brandprüfung durchgeführt werden.

Zur Vermeidung von ungünstigen Rückstrahlungseffekten aus Umfassungsbauteilen einer notwendigen Prüfhalle für den Witterungsschutz konnte auf Grundlage eines abgeleiteten Strahlungsmodells ein seitlicher lichter Mindestabstand zwischen Eckwand und gegenüberliegender Außenwand von 6,0 m sowie ein vorderer lichter Mindestabstand zwischen Rückwand und Außenwand von 7,5 m ermittelt werden. Die Hallenhöhe sollte eine lichte Höhe von mindestens 10 m aufweisen, um zum einen die Rückstrahlungseffekte aus den Umfassungsbauteilen zu reduzieren und zum anderen mögliche Flammen oberhalb des Prüfstandes nicht zu beeinträchtigen.

In der Arbeit wurde zur Eignungsprüfung des entwickelten Prüfverfahrens für Brandquellen vor dem Gebäude, eine Vergleichsbetrachtung mit der Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die thermische Brandbeanspruchung aus dem Sockelbrandversuch gemäß MVV TB [107] in guter Übereinstimmung mit der Brandbeanspruchung aus dem entwickelten Brandversuch für das Raumbrandszenario steht. Dadurch sind die in der Sockelbrandprüfung zugrunde gelegten Brandquellen mit dem entwickelten Brandversuch abgedeckt. Zusätzlich können mit dem Brandversuch zukünftig auch Auswirkungen von außenliegenden Brandquellen auf z. B. Balkonen, Loggien oder Laubengängen in höher gelegenen Geschossen ausreichend sicher nachgewiesen werden. Durch den Vergleichsnachweis mit der Sockelbrandprüfung konnte

zusätzlich auch der Nachweis einer ausreichenden Abdeckung der untersuchten europäischen groß skalierten Brandversuche in dieser Arbeit erzielt werden.

Zur Anerkennung des Prüfverfahrens auf nationaler sowie auf europäischer Ebene müssen die Ergebnisse aus der Simulation für die Brandversuche an durchzuführenden Kalibrierungsversuchen auf Übereinstimmung überprüft werden. Dazu sind mindestens drei Brandversuche am Prüfstand unter den definierten Brandversuchsbedingungen durchzuführen. Anhand dieser Ergebnisse kann schlussendlich festgestellt werden, ob noch zusätzliche Untersuchungen ggf. mit einem applizierten Prüfaufbau an der Prüfwand durchgeführt werden müssen.

Zur Definition allgemeingültiger, fundamentierter, natürlicher oder maschineller Zu- und Abluftbedingungen im Brandversuch empfiehlt es sich ein eigenständiges Forschungsvorhaben bzgl. dieser Fragestellung durchzuführen.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Agarwal, G.: Evaluation of the Fire Performance of Aluminum Composite Material (ACM) Assemblies using ANSI/ FM 4880, FM Global, Dezember 2017
- [2] AGBF: Protokollauszug der Niederschrift der 98. Sitzung des FA VB/G der deutschen Feuerwehren am 01. und 02. März 2018 in Mainz
- [3] Anderson, J.; Boström, L.; Jansson, R.; Milovanović, M.: FIRE DYNAMICS IN FAÇADE FIRE TESTS - Applications of Structural Fire Engineering: Measurement, modeling and repeatability, Dubrovnik, Croatia, 15-16 October 2015
- [4] ANSI FM 4880-2001/(R2007-12): American National Standard for Evaluation A) Insulated Wall or Wall and Roof/Ceiling Assemblies; B) Plastic Interior Finish Materials; C) Plastic Exterior Building Panels; D) Wall/Ceiling Coating Systems; E) Interior or Exterior Finish Systems
- [5] Arnault, P., et al.: Rapport Experimental Sur Les Essais Avec Des Feux Naturels Executes Dans Les Petite Installation. Maisieres-Les Metz, (1973).
- [6] Arrêté du 24 mai 2010 portant approbation de diverses dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public, Journal officiel de la République Française du 6 juillet 2010, texte 31
- [7] Association of British Insurers ABI: Cladding approvals, A review and investigation of potential shortcomings of the BS 8414 standard for the approval of cladding systems such as those commonly used on tall buildings, Fire Protections Association, 22.02.2018
- [8] Babrauskas, V.: Facade Fire Tests - Towards an international Test Standard, Fire technology Third Quarter 1996
- [9] Babrauskas, V.: Glass breakage in fires, Fire Science and Technology Inc, 2010
- [10] Babrauskas, V.: Heat Release Rate – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2016
- [11] Babrauskas, V.; Grayson, S. J.: Heat Release in Fires – Elsevier Applied Science, 1992
- [12] Bachmeier, P.; Emrich, C: Deutsche Feuerwehr-Zeitung BRANDSchutz – Auswirkung aktueller Brandverläufe auf die Taktik im Gebäude, Ausgabe Dezember 2017
- [13] Bechthold, R.: Thermische Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall; Dissertation, Braunschweig, 1977

- [14] Bertie, J. E.; Jones, R. N.; Apelblat, Y.; Keefe, C., D: Infrared Intensities of Liquids XIII; Accurate Optical Constants and Molar Absorption Coefficients Between 6500 and 435 cm^{-1} of Toluene at 25 C, from Spectra Recorded in Several Laboratories. Applied Spectroscopy, 48; Seite 127–143, January 1994
- [15] Bertie, J. E.; Jones, R. N.; Keefe, C., D: Infrared Intensities of Liquids XII; Accurate Optical Constants and Molar Absorption Coefficients Between 6225 and 500 cm^{-1} of Benzene at 25 C, from Spectra Recorded in Several Laboratories. Applied Spectroscopy, 47(7); Seite 891–911, 1993
- [16] Bertie, J. E.; Zhang, S. L.; Eysel, H. H.; Baluja S., Ahmed, M. K.: Infrared Intensities of Liquids XI; Infrared Refractive Indices from 8000 to 2 cm^{-1} , Absolute Integrated Intensities, and Dipole Moment Derivatives of Methanol at 25 C. Applied Spectroscopy, 47; Seite 1100–1115, August 1993
- [17] Beyler, C. L.: Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires – SFPE Handbook Seite 2591-2663, Springer, Fifth Edition 2016
- [18] Boström, L.; Hofmann-Böllinghaus, A.; Colwell, S.; Chiva, R.; Tóth, P.; Moder, I.; Sjöström, J.; Anderson, J.; Lange, D.: Development of a European approach to assess the fire performance of facades – European Commission, Juni 2018
- [19] BS 8414-1:2015-09: Fire performance of external cladding systems – Part 1: Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of a building
- [20] BS 8414-2:2015-09: Fire performance of external cladding systems – Part 2: Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to and supported by a structural steel frame
- [21] CAN/ULC-S134-13:2013-08: Standard Method of Fire Test of Exterior Wall Assemblies, National Standard of Canada second edition.
- [22] Colwell, S.; Baker, T.: BRE 135 - Fire Performance of external thermal insulation for walls of multistorey buildings third edition, 2013
- [23] Dehne, M.: Ein übergreifendes Sicherheitskonzept für den vorbeugenden Brandschutz, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 168 (2003), S. 11 - 40.
- [24] DENA: Dena-GEBÄUDEREPORT – Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, 2016
- [25] Deutscher Wetterdienst: Historische Wetterdaten für Deutschland, Standort Leipzig; ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/observations_germany/climate/hourly/air_temperature/historical
- [26] Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt: Bauministerkonferenz Merkblatt, Empfehlungen zur Sicherstellung der Schutzwirkung von Wärmedämm-Verbundsystemen (WDVS) aus Polystyrol; Stand 18.06.2015

- [27] DIN 14011:2018-01: Feuerwehrwesen – Begriffe
- [28] DIN 14676:2012-09: Rauchwarnmelder für Wohnhäuser, Wohnungen und Räume mit wohnungsähnlicher Nutzung – Einbau, Betrieb und Instandhaltung
- [29] DIN 18230-2:1999-01 : Baulicher Brandschutz im Industriebau Teil 2: Ermittlung des Abbrandverhaltens von Materialien in Lageranordnung Werte für den Abbrandfaktor m
- [30] DIN 18230-3:2002-08: Baulicher Brandschutz im Industriebau Teil 3: Rechenwerte
- [31] DIN 4102-1:1998-05 – Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [32] DIN 4102-20:2017-10: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen
- [33] DIN 4102-24 (Arbeitsfassung):2018-10: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 24: Prüfung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen unter Berücksichtigung des Sockelbrandszenarios (unveröffentlicht)
- [34] DIN 4108-4:2017-03: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
- [35] DIN EN 13501-1:2010-01: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten
- [36] DIN EN 1363-1:2012-10: Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [37] DIN EN 1991-1-2:2010-12: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; ; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009
- [38] DIN EN 1991-1-2NA:2015-09: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke
- [39] DIN EN 1992-1-2:2010-10: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008
- [40] DIN EN 1993-1-2:2010-10: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005 + AC:2009

- [41] DIN EN 1995-1-2:2010-10: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009
- [42] DIN EN 1996-1-2:2010-10: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1996-1-2:2005 + AC:2010
- [43] DIN EN 60584-1:2014-07: Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen
- [44] DIN EN ISO 10456:2010-05: Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte
- [45] Dorn, T.; Hosser, D.; Neumann, P.; Siegfried, W.: Vereinfachter Brandschutznachweis für außenliegende Stahlbauteile; Ernst & Sohn Zeitschrift Stahlbau 65 Heft 2, 1996
- [46] Dréan, V., Schillinger, R., Auguin, G.: Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPIR2 testing facility, MATEC Web of Conferences 2016
- [47] Dréan, V.; Schillinger, R.; Leborgne, H.; Auguin, G.; Guillaume, E.: Numerical Simulation of Fire Exposed Facades Using LEPIR II Testing Facility, Springer Science and Business Media, 2018
- [48] Drysdale, D. D.: Ignition of Liquids – SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2016
- [49] Duny, M.: Etudes numérique et expérimentale des phénomènes de propagation d'un incendie le long d'une façade; Dissertation Ecole Doctorale: Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Energétique et Aéronautique Poitiers; Arrêté du 25 mai 2016
- [50] ETAG 004: Guidline for European technical approval of external thermal insulation composite systems (ETICS) with rendering; Edition 2000 Amended February 2013
- [51] Etex Building Performance GmbH – Geschäftsbereich Promat: Datenblatt Kalziumsilikatplatte Promatect H; https://www.promat.de/de-de/produkte/de_promatect-h
- [52] EU-Bauproduktenverordnung EUBauPVO: VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. März 2011, konsolidierte Fassung vom 16.06.2014
- [53] Evergren, F.; Rahm, M.; Arvidson, M.; Hertzberg, T.: Fire testing of external combustible ship surfaces; Proceedings of the 11th International Symposium on Fire Safety Science, Christchurch, New Zealand, 2014

- [54] Evergren, F.; Rahm, M.; Arvidson, M.; Hertzberg, T.: Fire testing of external combustible ship surfaces; Fire Technology, SP Technical Research Institute of Sweden, 2014
- [55] Fachbereich Feuerwehren, Hilfelistungen, Brandschutz, DGUV: 0.1 Brände von Dämmsystemen, Hinweise zur Arbeitssicherheit, Stand 12/2012
- [56] Festtag, S.: Ergebnisse der Erhebung zur Brandschadenstatistik; Tagungsband Braunschweiger Brandschutztage S. 225 – 246; 2015
- [57] Feuerwehr Frankfurt am Main: Zusammenstellung von Brandereignissen in Verbindung mit WDVS im Auftrag von AGBF-Hessen, AGBF-Bund, Deutscher Feuerwehrverband e.V.; Stand Juni 2018
- [58] Fouad, N., A.; Merkewitsch, T.: Bauphysikkalender 2016 Brandverhalten von WDVS – Fouad, Ernst und Sohn, Berlin 2016
- [59] Fouad, N.,A.; Richter, T.: Leitfaden Thermografie im Bauwesen – Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung, 4. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, 2012
- [60] Gao W.: Fire Spill plume from a compartment with dual symmetric openings under cross wind, Combustion and Flame, 2016
- [61] Gemeindeverwaltung Schkopau; Erläuterungsbericht zum Brandschutzbedarf der Gemeinde Schkopau; Bearbeitungsstand: 30.08.2016
- [62] GOST 31251:2008: Raumabschließende Gebäudeaußenwände - Prüfverfahren auf Brandgefahr
- [63] Hagen, E.: Prognose des Gefährdungspotentials von Raumbränden; Dissertation, Heft 93, Braunschweig, 1992
- [64] Hahn, Sarah-K.: Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung des Verbrennungseffizienzfaktors von Feststoffen; Dissertation; Magdeburg, 2016
- [65] Hamins A.; Hill K.; Dreisbach J.; Joglar F.; Najafi B.; McGrattan K.; Peacock R.: Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications NUREG 1824, Washington DC; United States Nuclear Regulatory Commission), 2007
- [66] HONG-ZENG, YU: Physical Scaling of Water Mist Suppression of Wood Crib Fires in Enclosures – FM Global, Boston-Providence Turnpike, Norwood, 2014
- [67] Hosser, D.: Technischer Bericht, Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes; vfdB TB 04-01 3., überarbeitete und ergänzte Auflage November 2013
- [68] Huizinga, R.A.: Influence of the performance of triple and double glazing on the fire development in a dwelling, Master thesis, University of Technology Eindhoven, December 2012

- [69] Hurley, M. J.; Gottuk, D.; Hall, J. R.; Harada, K.; Kuligowski, E.; Puchovsky, M.; Torero, J.; Watts, J. M.; Wiecorek, C. (Hrsg.) (2016): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Springer New York, Heidelberg, Dordrecht London.
- [70] ISO 13785-1:2002: Reaction-to-fire tests for façades – Part 1: Intermediate-scale test
- [71] ISO 13785-2:2002: Reaction-to-fire tests for façades – Part 2: Large-scale test
- [72] ISOLITE INSULATING PRODUCTS CO.,LTD.: Materialspezifische Eigenschaften von Keramikfaserplatten/ -isolierung
<https://www.isolite.co.jp/en/products/productcate/rcf/>
- [73] Kampmeier, B.: Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau; Dissertation, Heft 206, Braunschweig, 2008
- [74] Knaust, C.; Kusche, C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Verbrennungseffektivität für Brandlastberechnungen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014
- [75] Knublauch, E.: Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen; Bericht 25 der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin 1973
- [76] Kordina, K.; Jeschar, R.; Bechtold, R.; Ehlert, K.-P.; Wesche, J.: Brandversuche Lehrte, Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung“ des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Nr. 04.037, 1978, Bonn-Bad Godesberg Ausgabe 1978
- [77] Kotthoff, I.: Analyse der Brandausbreitung über die Fassade, Feuertrutz Magazin Ausgabe 04.2017
- [78] Kotthoff, I.: Brandausbreitung über die Fassade (Schutzziele), FeuerTRUTZ Brandschutzkongress Nürnberg am 21. und 22. Februar 2018
- [79] Kotthoff, I.; Riemisch-Speer, J.: Mechanism of fire spread on facades and the new Technical Report of EOTA “Large-scale fire performance testing of external wall cladding systems, 1st International Seminar for Fire Safety of Facades, Paris (France), 2013
- [80] Kumar, R., Naveen M.: Compartment Fires: Caltree and Cross-Ventilation, Combustion Science and Technology, 2007
- [81] Kunkelmann, J.: Feuerwehreinsatztaktische Problemstellung bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise Teil 2: Verhalten von Verglasungen bei thermischer Beanspruchung; Verhalten von Verglasungen beim Feuerwehreinsatz; Mechanische Zerstörung von Verglasung; Zerstörung von Verglasungen durch Explosivmittel; Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Forschungsbericht Nr. 164, Karlsruhe, Februar 2013

- [82] Kunze, C.: Schadensprisma Nr. 4 – Herleitung des Gebäudeabstandes unter dem Aspekt der Brandausbreitung, 1987
- [83] McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; Floyd, J.; Weinschenk, C.; Overholt, C.: Fire Dynamics Simulator, User's Guide. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, sixth edition, September 2013.
- [84] McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; Floyd, J.; Weinschenk, C.; Overholt, C.: Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, sixth edition, September 2013
- [85] McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; Floyd, J.; Weinschenk, C.; Overholt, C.: Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, sixth edition, September 2013
- [86] McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; Floyd, J.; Weinschenk, C.; Overholt, C.: Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, sixth edition, September 2013
- [87] McGrattan, K.; Toman, B.: Quantifying the predictive uncertainty of complex numerical models, Metrologia, 2001
- [88] Merkwitsch, T.; Bachmeier, P.: Protokoll zur Diskussionsrunde zum Thema: Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen im Zusammenhang mit den Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehr, Feuerwehr München 17.08.2018 (unveröffentlicht)
- [89] Merkwitsch, T.; Kropp, M.; Gäfke, A.: Protokoll zur Diskussionsrunde zum Thema: Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen im Zusammenhang mit den Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehr, Feuerwehr Hannover 26.07.2018 (unveröffentlicht)
- [90] Merkwitsch, T.; Ruhs, A.; Brückmann, M.; Walter, J.: Protokoll zur Diskussionsrunde zum Thema: Brandbeanspruchung von Außenwandbekleidungen im Zusammenhang mit den Einsatzmöglichkeiten der Feuerwehr, Feuerwehr Frankfurt 08.08.2018 (unveröffentlicht)
- [91] MFPA Leipzig e.V.: Forschungsbericht BI5-8001 96-18 zur Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B1-Fassadensystemen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandabläufen an Fassaden vom 03.10.2000

- [92] MFPA Leipzig GmbH: Bericht - Test-Versuche zur Überprüfung der Fassadenbeanspruchung durch den Gasbrenner nach DIN-Entwurf 4102-20 vom 20.01.2011
- [93] MFPA Leipzig GmbH: Grundrisse und Ansichten sowie Messstellenplan Prüfstand C vom 22.12.2017
- [94] MFPA Leipzig GmbH: Kurzbericht Nr. 3.2/13-253-5Ä zum Kalibrierungsversuch 5 vom 29.11.2013 im Rahmen des Forschungsthemas F3.2/13-253 „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“; Stand 26. September 2014
- [95] MFPA Leipzig GmbH: Kurzbericht Nr. 3.2/13-253-5Ä zum Kalibrierungsversuch 6 vom 06.12.2013 im Rahmen des Forschungsthemas F3.2/13-253 „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“; Stand 26. September 2014
- [96] MFPA Leipzig GmbH: Prüfbericht Nr.1 - Kalibrierungsversuch mit Gasbrenner zum Brandversuch nach DIN 4102-20 vom 14.07.2015
- [97] MFPA Leipzig GmbH: Prüfbericht Nr.2 - Kalibrierungsversuch mit Gasbrenner zum Brandversuch nach DIN 4102-20 vom 15.08.2015
- [98] MFPA Leipzig GmbH: Untersuchungsbericht Nr. 3.2/13-253-1 - Originalmaßstäblicher Brandversuch an dem Wärmedämm-Verbundsystem „StoTherm Classic“ im Rahmen des Forschungsvorhabens „Brandverhalten von WDVS mit EPS-Dämmung bei Brandbeanspruchung im Sockelbereich“ unter Verwendung einer EPS Dämmung DIN 4102-B1 - in einer Dicke von 300 mm; zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen und einem dispersionsgebundenem Putzsystem; Stand 28. März 2014
- [99] Mikkola, E., Hakkarainen, T., Matala, A.: Fire safety of EPS ETICS in residential multi-storey buildings – Final Report, VTT, Espoo 26.06.2013
- [100] MPA Prüfstelle: Messdaten – Kalibrierungsversuch Nr. 1 mit 200 kg Holzkrippe zum Sockelbrandversuch gemäß MVV TB vom 02.11.2017
- [101] MPA Prüfstelle: Messdaten – Kalibrierungsversuch Nr. 2 mit 200 kg Holzkrippe zum Sockelbrandversuch gemäß MVV TB vom 07.11.2017
- [102] MPA Prüfstelle: Messdaten – Kalibrierungsversuch Nr. 3 mit 200 kg Holzkrippe zum Sockelbrandversuch gemäß MVV TB vom 07.11.2017
- [103] MSZ 14800-8:2009-10: Fire resistance tests, Part 6: Fire propagation test for building facades
- [104] Münch, M.: Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr; Dissertation genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg eingereicht am: 14.12.2012

- [105] Musterbauordnung – MBO – November 2002 zuletzt geändert mit dem Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016
- [106] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung – MVKVO) Fassung September 1995; zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014
- [107] Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen - MVV TB - Ausgabe 2017/1
- [108] NFPA 285:2012: Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Non-Load-Bearing Wall Assemblies Containing Combustible Components
- [109] Nilsson, M.: The impact of horizontal projections on external fire spread - A numerical comparative study, Rapport 5510, Lund 2016
- [110] Northe, C., Riese O.: Experimentelle Untersuchung von Bränden an Fassaden mit unterschiedlichen Brandlasten - Tagungsband Braunschweiger Brandschutztag Seite 11 bis 35; 2015
- [111] NUREG-1824: Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications, Volume 1: Main Report, Mai 2007
- [112] Oleszkiewicz, I.: Heat Transfer From a Window Fire Plume to a Building Façade, National Research Council Canada, August 1990
- [113] Orloff, L., Delichatsios D. R. and M.A.: Radiation from Buoyant Turbulent Diffusion Flames - Combust, Sci. and Tech., Vol. 84, Seite 177-186, Boston-Providence Turnpike, Norwood, 1992
- [114] Peacock, R., D., Reneke, P., D., Davis, W., D., Jones, W., W.: Quantifying Fire Model Evaluation using Functional Analysis; Fire Safety Journal, Band 33 Seite 167-184, 1999
- [115] Protocole d'application de l'arrêté du 10 septembre 1970 relatif à la classification des façades vitrées par rapport au danger d'incendie
- [116] Quintiere, J. G.; McCaffrey, B. J.: The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure Volume I, Final Report – Center for Fire Research, Washington DC, November 1980
- [117] Riese O.: Brandversuche - Überblick über die Verfahren - Poolfeuer versus Gasbrenner; Tagungsband Braunschweiger Brandschutztag Seite 261 bis 278; 2015
- [118] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz, 2. Auflage, Werner Verlag 2008
- [119] Schneider, U.; Schjerve, N.: Bauphysikkalender 2011 – E1 Materialtechnische Tabellen für den Brandschutz – Fouad, Ernst und Sohn, Berlin 2011

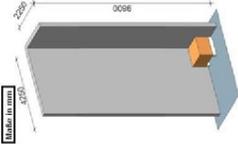
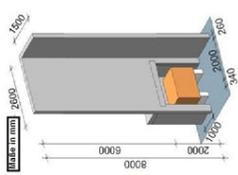
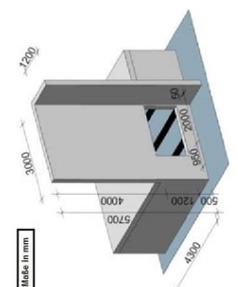
- [120] SP FIRE 105:1994-09 – External wall assemblies and facade claddings Reaction to fire
- [121] Stein, J.: AGBF bund im Deutschen Städtetag; Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten; vom 16. September 1998, Fortschreibung vom 19. November 2015
- [122] Steinert, C.: Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall – Ablussbericht, Heft 120, Braunschweig, 1996
- [123] Steinert, C.; Kordina, K.: Abschlussbericht zum DFG-geförderten Forschungsbericht – Brandverhalten brennbarer Produktions- und Lagermaterialien in Industriegebäuden – Bestimmung von Kennwerten zur Berechnung von Brandablauf und Brandbelastung; vorgelegt 23.03.2001
- [124] Suo-Anttila, J. M.; Blanchat, T. K; Ricks, A. J.; Brown, A. L.: Characterization of thermal radiation spectra in 2 m pool fires. Proceedings of the Combustion Institute, 32(2); Seite 2567–2574, 2009
- [125] Tabellenbuch brennbarer und gefährlicher Stoffe; Staatsverlag der Deutschen Demokratischen Republik, Berlin 1979
- [126] The European Group of Organisation for Fire Testing, Inspection and Certification (EGOLF): EGOLF Position: DEVELOPMENT OF A COMMON EUROPEAN FIRE TEST METHOD FOR FAÇADES, 31.10.2018
- [127] Thiel, N.; Kunze, C.: Brandausbreitung durch Feuerüberschlag an der Fassade; Schadenprisma Ausgabe 2/1988
- [128] Vds 2021:2010-01: Unverbindlicher Leitfaden für ein umfassendes Schutzkonzept, Baustellen
- [129] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) Herausgeber VDI-Wärmeatlas 11., bearbeitete und erweiterte Auflage; Ausgabe Februar 2013
- [130] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.: <http://www.ref14.vfdb.de/brandstatistik/brandschadenstatistik/> [Zugriff am 11.11.2018].
- [131] White, N.; Delichatsios M.: Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components, Springer New York Heidelberg Dordrecht London, Fire Protection Research Foundation 2015
- [132] Wilk, E.; Hegemann, K.; Kotthoff, I.: Der Brand in Räumen - Abbrand von Lagergütern – Teil 8-4, vfdb Zeitschrift 2/2016
- [133] Wilk, E.; Hegemann, K.; Kotthoff, I.: Der Brand in Räumen - Abbrand von Lagergütern – Teil 8-5, vfdb Zeitschrift 3/2016

- [134] Wilk, E; Kotthoff, I.: Brand in Räumen - Anlage 2 Methoden zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate bei Brandversuchen Auswertung von Originalbrandversuchen der Jahre 1996 bis 2014
- [135] Wilk, E; Kotthoff, I.: Brand in Räumen - Anlage 5 Auswertung der Infrarotaufnahmen Auswertung von Originalbrandversuchen der Jahre 1996 bis 2014
- [136] Wilk, E; Kotthoff, I.: Der Brand in Räumen - Sperrwirkungen von Kragplatten – Teil 6, vfdb Zeitschrift 3/2014
- [137] Wilk, E; Kotthoff, I.: Der Brand in Räumen und seine Auswirkungen - Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit rechnerischen Rechenverfahren – Teil 5, vfdb Zeitschrift 2/2014
- [138] Wilk, E; Kotthoff, I.; Hegemann, K.: Der Brand in Räumen – Flammen vor und über der Brandraumöffnung – Teil 9-1, vfdb Zeitschrift 4/2016
- [139] Wilk, E; Kotthoff, I.; Hegemann, K.: Der Brand in Räumen – Fortsetzung; Temperaturverteilung in der Flamme an und über der Brandraumöffnung – Sonderszenarien der Flamme – Teil 9-1, vfdb Zeitschrift 1/2017
- [140] Wilk, E; Kotthoff, I.; Redmer, T.: Der Brand in Räumen und seine Auswirkungen – Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit rechnerischen Rechenverfahren – Teil 4, vfdb Zeitschrift 1/2014
- [141] Wilk, E; Kotthoff, I.; Scheide, M.: Der Brand in Räumen Brandwirkungen an der inneren Gebäudeecke – Teil 7, vfdb Zeitschrift 3/2014
- [142] Yokoi, S.: Study on Prevention of fire-spread caused by hot upward current, Report No. 34 of the Building Research Institute
- [143] Yoshioka, H.; Ohmiya, Y.; Noaki, M.; Yoshida, M.: Large-scale Facade Fire Tests Conducted Based on ISO 13785-2 with Noncombustible Facade Specimens, Technical Report, 5/2012
- [144] Zehfuß, J.; Northe, C.; Riese, O.: An investigation of the fire behavior of ETICS facades with polystyrene under fire loads of different size and location, Fire and Materials 42, Seite 508–516, 2018

10 Anlagen

10.1 Anlage A – Zusammenfassung relevanter Prüfbedingungen von groß skalierten Brandversuchen zur Prüfung von Außenwandbekleidungen in Europa

Fassadenprüfstände	Groß skalierte Brandversuche für Außenwandbekleidungen		
	1	2	3
Land	Deutschland	UK	International
Regelwerk	Sockelbrandprüfung - MVV TB (DIN 4102-24 - Abbetfassung)	BS 8414-1	ISO 13785-2
Brandscenario	Außenbrand	Raun- und Außenbrand	Raun- und Außenbrand
Form	L-Förmige Wand	L-Förmige Wand	L-Förmige Wand
Geometrie und Material Prüfstand	<p>Rückwand: B x H x d = 4,0 m x 9,8 m x 0,25 m</p> <p>Eckwand: B x H x d = 2,0 m x 9,8 m x 0,25 m</p> <p>Material: Porenbetonplansteine Rohdichte $\geq 600 \text{ kg/m}^3$ + Applikationsfläche/Beschichtung mit einem mineralisch gebundenen Putz</p>	<p>Rückwand: B x H x d = 2,6 m x 8,0 m</p> <p>Eckwand: B x H = 1,5 m x 8,0 m</p> <p>Material: Mauerwerk Druckfestigkeit $\geq 7,3 \text{ N/mm}^2$; Dichte $\geq 730 \text{ kg/m}^3$; Wärmeleitfähigkeit $\geq 0,18 \text{ W/mK}$.</p>	<p>Rückwand: B x H x d = 3,0 m x 5,7 m</p> <p>Eckwand: B x H x d = 1,2 m x 5,7 m</p> <p>Hinweis: Die Flügelwand soll beweglich sein, sodass Außenwandbekleidungen in einer Dicke von 0,0 bis 0,5 m einbauen zu können. Im Endzustand soll der Abstand zur Brandkammeröffnung 0,05 m betragen.</p>
Geometrie und Material Brandkammer/ Brandraum	ohne	<p>Maße Brandkammer: B x L x H = $\geq 1,9 \text{ m} \times 1,0 \pm 0,05 \text{ m} \times 2,0 \pm 0,1 \text{ m}$</p> <p>Material: Beton und Mauerwerk</p>	<p>Material Wand und Decke: Beton, Mauerwerk oder anderem nicht brennbaren Baustoff - zusätzliche Innenseitige Bekleidung durch z. B. Keramik Isolierung Dichte 100 kg/m^3 und Dicke 25 mm</p>
Brandraumöffnung	ohne	<p>Brandkammeröffnung: B x H = $2,0 \pm 0,1 \text{ m} \times 2,0 \pm 0,1 \text{ m}$</p>	<p>Brandkammeröffnung: B x H = $2,0 \pm 0,1 \text{ m} \times 1,2 \pm 0,1 \text{ m}$</p>

Groß skalierte Brandversuche für Außenwandbekleidungen			
Fassadenprüfstände	1	2	3
Land	Deutschland	UK	International
Regelwerk	Sockelbrandprüfung - MVV TB (DIN 4102-24 - Arbeitsfassung)	BS 8414-1	ISO 13785-2
Skizze	 <p>Masse in mm</p>	 <p>Masse in mm</p>	 <p>Masse in mm</p>
Prüffeuer	<p>200 kg Holzkippe (± 5 kg) Fichte (Rohdichte 475 \pm 25 kg/m³) Lagerung vor Prüfung im Normklima nach DIN EN 13238</p> <p>Geometrie: $b \times l \times h_c = 1,1 \text{ m} \times 1,1 \text{ m} \times 0,72 \text{ m}$</p> <p>Holzstäbe: $D \times B \times l = 40 \text{ mm} (\pm 2) \times 40 \text{ mm} (\pm 2) \times 1100 \text{ mm} (\pm 10)$ Stab-Luft-Verhältnis 1:1</p> <p>Zündinitial: 4 x 400 ml Isopropanolwannen in zweiter Schicht von unten</p>	<p>ca. 400 kg Holzkippe Nadelholz (Rohdichte 400 bis 650 kg/m³) Holzfeuchte 10% bis 15%</p> <p>Geometrie: $b \times l \times h_c = 1,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$</p> <p>Holzstäbe: $D \times B \times l = 50 \text{ mm} (\pm 2) \times 50 \text{ mm} (\pm 2) \times 1500 \text{ mm} / 1000 \text{ mm} (\pm 5)$ Stab-Luftverhältnis 1:1</p> <p>Zündinitial: 16 in brennbarer Flüssigkeit getränkten Faserplatten</p> <p>Zielwerte: Wärmeenergie insgesamt min 4500 MJ über 30 Minuten Wärmefreisetzungsrate max. 3 \pm 0,5 MW</p>	<p>3 Prüffeuertypen möglich</p> <p>1. Gasbrenner: 120 g/s Propangas</p> <p>2. Holzkippe: 16 x 25 kg Holzkippen Nadelholz (Rohdichte 450 bis 500 kg/m³) Feuchtigkeitsgehalt 10 % bis 12 % (Lagerung vor Prüfung im Normklima z. B. nach EN 13238)</p> <p>Holzstäbe: $D \times B \times l = 4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ Stab-Luft-Verhältnis 1:1</p> <p>Zündinitial: Zündung 200 ml Isopropanolwannen je Krippe</p> <p>3. Poolfeuer: Heptan oder A-cetol</p>

Fassadenprüfstände		Groß skalierte Brandversuche für Außenwandbekleidungen		
		1	2	3
Land	Deutschland	UK	International	
Regelwerk	Sockelbrandprüfung - MVV TB (DIN 4102-24 - Abteiffassung)	BS 8414-1	ISO 13785-2	
Versuchshalle	In Prüfhalle gemäß Abteiffassung zur DIN 4102-24: B x L x H = 6 m x 9 m x 10 m	In Prüfhalle ausreichender Witterungsschutz vor Regen, Windströmungen und zur Gewährleistung einer Solltemperatur -5 °C bis 40 °C für die Konditionierungszeit des Prüfkörpers	In Prüfhalle	In Prüfhalle
Prüfzeit	25 Minuten Brandbeaufschlagung min. 20 Minuten zusätzlich 30 Minuten Beobachtungszeit 35 Minuten Beobachtungszeit (bis mindestens 60 Minuten nach Versuchsbeginn)	30 Minuten Holzkrippebrand im Anschluss 30 Minuten Beobachtungszeit (bis mindestens 60 Minuten nach Versuchsbeginn)	Prüfzeit insgesamt zwischen 23 Minuten und 27 Minuten. 4 bis 6 Minuten bis max. HFR anzusetzen, 15 Minuten konstantes Prüffeuer und 4 bis 6 Minuten auf null.	
Klimatische Bedingungen während der Prüfung	1,5 m Abstand zum Prüfstand und 1,5 m Höhe vom Fussboden Temperatur zwischen 5 °C und 30 °C	Temperatur zwischen 5 °C und 35 °C Kein Regen oder Nebel während der Prüfung	Temperatur zwischen 10 °C und 30 °C Keine Rauchgase oder sichtbare Feuchtigkeit auf dem Prüfgegenstand	
Ventilation	Vor Versuchsbeginn im Mittel eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s – kurzzeitig maximal 1 m/s – mittig in 1 m Höhe über der Oberkante der Holzrippe und in 100 mm Abstand zur Oberfläche des WDVS nicht überschritten wird.	<= 2 m/s	<= 2 m/s	
Messstellen	Thermoelemente Typ K gemäß DIN EN 60684 Ø 3 mm: 104 x Messstellen mittels Thermoelement im Abstand 2 mm vor applizierter Oberfläche 104 x Messstellen in Dämmstoffmitte bei applizierten WDVS mit EPS Messungen im Zeitintervall von max. 10 s	Thermoelemente Typ K gemäß BS EN 60584-1 Ø 1,5 mm: Jeweils 8 x Messstellen mittels Thermoelement im Abstand von 50 mm vor applizierter Oberfläche bei 2,5 m und 5,0 m über Brandkammersturz 8 x Messstellen mittels Thermoelement in der Mitte jeder Baustoff- Luftschichtebene (d ≥ 10mm) bei 5,0 m über Brandkammersturz Messungen im Zeitintervall von mindestens 10 s	7 x Messstellen z. B. mittels Thermoelement Typ K gemäß IEC 60584-2 Ø=3 mm im Abstand 10 mm vor applizierter Oberfläche und 8 x Messstellen für Wärmestromaufnehmer Zusätzlich 4 x Thermoelement je applizierte Material- und Luftschicht Wärmeströme und Temperaturen sind im Intervall von max. 20 s zu registrieren und im 1-Minuten Intervall zu mitteln	

Groß skalierte Brandversuche für Außenwandbekleidungen					
Fassadenprüfstände		4	5	6	
Land	Skandinavien/Schweden	Frankreich	Ungarn		
Regelwerk	SPFIRE 105	LEPIR 2	MSZ 14800		
Brandszenario	Raumbrand	Raumbrand	Raumbrand		
Form	Gerade-Wand	Gerade-Wand	Gerade-Wand		
Geometrie und Material Prüfstand	<p>Rückwand: B x H = 4,0 m x 6,0 m</p> <p>Material: Leichtbeton Rohdichte ≤ 600 kg/m³</p> <p>Kraaplatte (Traufe), als oberer Abschluss B x L = 4,0 m x 0,5 m</p>	<p>Rückwand: B x H = 5,65 m x 7,1 m</p> <p>Material: Beton</p>	<p>Rückwand: B x H = 4,4 m x 7,5 m</p> <p>Material: Mauerwerk</p>		
Geometrie und Material Brandkammer/ Brandraum	<p>Brandkammer Innenmaß: B x L x H = 3,24 m x 1,6 m x 1,3 m</p>	<p>Brandraum Grundfläche Innenmaß, EG bis 2.OG: B x L = 4,85 ± 0,85 m x 2,65 ± 0,35 m</p> <p>Höhe Lichtes Innenmaß EG und 1.OG: H = 2,35 ± 0,15 m</p> <p>Höhe Lichtes Innenmaß 2.OG: H = ca. 1,5 m</p>	<p>Brandraum Grundfläche Innenmaß, EG bis 2.OG: B x L = 4,0 x 4,3</p> <p>Höhe Lichtes Innenmaß, EG H = 2,65 m</p> <p>Höhe Lichtes Innenmaß 1.OG: H = 3,32 m</p> <p>Höhe Lichtes Innenmaß 2.OG: H = 3,32 m</p>		
Brandraumöffnung	<p>Brandkammeröffnung: B x H = 3,0 m x 0,71 m</p> <p>1.OG und 2.OG B x H = 1,51 m x 1,2 m</p>	<p>EG 2 x Brandraumöffnungen: B x H = 1,0 m x 1,5 m</p> <p>1.OG 2 x Brandraumöffnungen: B x H = 0,8 m x 1,4 m einschließlich Verglasung mit PVC Rahmen</p>	<p>Material: Beton und Mauerwerk</p> <p>EG Brandraumöffnung: B x H = 1,2 m x 1,2 m</p> <p>OG Brandraumöffnung: B x H = 1,2 m x 1,2 m</p>		

Fassadenprüfstände		Groß skalierte Brandversuche für Außenwandbekleidungen	
	4		5
Land	Skandinavien/Schweden	Frankreich	Ungarn
Regelwerk	SPFIRE 105	LEPIR 2	MSZ 14800
Skizze	<p>Masse in mm</p>	<p>Masse in mm</p>	<p>Masse in mm</p>
Prüffeuer	<p>Poolfeuer: 60 Liter Heptan</p> <p>Stahlwanne: $B \times L \times H = 2,0 \text{ m} \times 0,5 \times 0,1 \text{ m}$</p> <p>Zündmittel: Pilotflamme</p>	<p>2 x 300 kg Holzkrippe/-stapel Nadelschichtholz, Rohdichte: $480 \text{ kg/m}^3 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ Holzfeuchte 9 % bis 15 %</p> <p>Geometrie ie Holzkrippe: $b \times l \times h_c = 1,0 \text{ m} \times 1,0 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$</p> <p>Schicht 1: 0,0 m bis 0,63 m Höhe – 9 Lagen mit jeweils 4 Stäben: $D \times B \times l = 0,06 \text{ m} \times 0,07 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$</p> <p>Schicht 2: 0,63 m bis 1,43 m Höhe – 20 Lagen mit jeweils 5 Stäben: $D \times B \times l = 0,06 \text{ m} \times 0,07 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$</p> <p>Schicht 3: 1,43 m bis 1,821 m Höhe – 17 Lagen mit jeweils 6 Stäben: $D \times B \times l = 0,06 \text{ m} \times 0,07 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$</p> <p>Zündmittel: Heptan und OI</p>	<p>650 kg Holzkrippe Pinienhholz Holzfeuchte 10 % bis 14 %</p> <p>Geometrie ie Holzkrippe: $b \times l \times h_c = 2,0 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 1,5\text{-}2,0 \text{ m}$</p> <p>Holzstäbe: $D \times B \times l = 0,03 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}/2,0 \text{ m}$</p> <p>Zündmittel: 10 kg Diesel</p>

Groß skalierte Brandversuche für Außenwandbekleidungen					
Fassadenprüfstände		4	5	6	
Land	Regelwerk	Skandinavien/Schweden	Frankreich	Ungarn	
	Versuchshalle	SFIRE 105	LEPIR 2	MSZ 14800	im Freien zulässig
	Prüfzeit	Keine Anforderungen Bis vollständige Verbrennung des Prüffeuers erreicht ist. Näherungsweise ca. 15 Minuten	im Freien zulässig 30 Minuten		45 min
	Klimatische Bedingungen während der Prüfung	Die Prüfung und Konditionierung soll so nah wie möglich den klimatischen Bedingungen am Ausführungsstandort entsprechen.	Kein Regen zulässig		Umgebungstemperaturen zwischen 10 °C und 30 °C
	Ventilation	keine Anforderungen	<= 3 m/s		<= 1 m/s
	Messstellen	Wärmestromaufnehmer 1 x am ersten Fenster Thermoelemente 2 x Ø = 0,25 mm unmittelbar der Traufe	Thermoelemente: 6 x im Brandraum 150 mm unterhalb der Decke 3 x 150 mm angrenzend zur Außenwand Plattenthermoelemente: 8 x 150 mm angrenzend zur Prüfwand 5 x im Prüfraum 1. OG 150 mm angrenzend zu Außenwand Wärmestromaufnehmer: 1 x im Abstand von mindestens 3 m vor der Außenwand	Thermoelemente: 5 x im Brandraum EG 50 mm unterhalb der Decke 16 x im Brandraum 1. OG 10 mm vor der Fensteröffnung 6 x oberhalb der Brandraumöffnung vor Rückwand 10 mm und 50 mm angrenzend zur Rückwand	

10.2 Anlage B - Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate von Holzkrippen

Quelle	Brandphasen			Randbedingungen
	Brandentstehungs- und Brandentwicklungsphase	Vollbrand	Abklingphase	
	$0 \leq t \leq t_1$	$t_1 \leq t \leq t_2$	$t \geq t_2$	
BIR [132]	$Q_{\text{beg}}(t) = \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_B}\right)^2$ Gl. (10-1)	$q_{\text{dKrippe}} = -6,65 \cdot A_{\text{Außen}}^2 + 93 \cdot A_{\text{Außen}} + 157$ Gl. (10-2)	$Q_{\text{abk}}(t) = \dot{Q}(t) - \dot{Q}(t) \cdot f_{\text{abkling}}$ Gl. (10-3)	Stab- Luft-Verhältnis ca. 1:1 $1,25 \text{ m}^2 \leq A_{\text{Außen}} \leq 11,6 \text{ m}^2$ $t_B = 250 \text{ s}$ $f_{\text{abkling}} = 0,04$
SFPE [69]	$Q_{\text{beg}}(t) = 0,0254 \cdot m_{00} \left(1 - \frac{V_{00} \cdot t^2}{m_0^2 \cdot D}\right) \cdot H_{\text{eff}}$	$Q(t) = \frac{4}{D} \cdot m_0 \cdot V_p \cdot \left(1 - \frac{2V_p t}{D}\right) \cdot H_{\text{eff}}$ oder $Q(t) = \frac{4}{D} \cdot m_0 \cdot V_p \cdot \left(\frac{m_0}{m_0}\right) \cdot H_{\text{eff}}$ $Q(t) = 4,4 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{S}{h_e}\right) \cdot \left(\frac{m_0}{D}\right)$	Keine Angaben	Abhängig von den brennbaren Oberfläche
	Gl. (10-4)	Gl. (10-5), Gl. (10-6), Gl.(10-7)		Abhängig von der Krippenporosität
Hagen* [63]	$Q_{\text{beg}}(t) = C \cdot b^{-0,5} \cdot \frac{4\pi \cdot h_e \cdot l}{6,25 \cdot \pi \cdot (D \cdot \lambda)^2 \cdot (T_e \cdot T_0)} \cdot \frac{\dot{Q}^{1,4}}{H_{\text{eff}}}$ Gl. (10-8)	$Q(t) = C \cdot b^{-0,5} \cdot \frac{4\pi}{6,25 \cdot A_s} \cdot A_s \cdot H_{\text{eff}}$ Gl. (10-9)	$\dot{Q}_{\text{abk}}(t) = C \cdot b^{-0,5} \cdot A_s \cdot e^{-\left(\frac{C_0 \cdot T_0 \cdot A_s \cdot h_e \cdot (t-t_0)}{0,4 \cdot \pi \cdot m_0}\right)} \cdot H_{\text{eff}}$ Gl. (10-10)	Krippenporosität $0,08 < \phi \leq 0,4$

- * (1) Die Holzkrippen sind „lose gepackt“, sodass die Luftzufuhr zum Brandherd nicht durch zu kleine Öffnungen beschränkt ist.
(2) die Dicke der verwendeten Holzstäbe ist so groß, dass die anfänglich entzündeten Stäbe noch brennen, wenn die Flammen den Krippenrand erreichen.
(3) die auf der Brandlastoberfläche bezogene spezifische Abbrandrate wird als konstant angenommen.
(4) bei Beginn des Abfalls der Abbrandrate sind noch 40 % der ursprünglich vorhandenen Brandlast unverbrannt.
(5) In der Brandentstehungsphase breiten sich die Flammen mit einer konstanten radialen Ausbreitungsgeschwindigkeit aus.

10.3 Anlage C - Auswertung Raumbrandmodelle

10.3.1 Modifiziertes Berechnungsverfahren gemäß EC 1-1-2 Anhang B [37]

10.3.1.1 Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate gemäß EC 1-1-2/NA Anhang BB [38] und vfdb-Leitfaden [67]

$$\dot{Q}_{\max} = \text{MIN}\{\dot{Q}_{\max,v}; \dot{Q}_{\max,B}\} \quad \text{Gl. (10-11)}$$

Dabei ist

\dot{Q}_{\max} die maximale Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Ventilationsbedingungen [MW]

$\dot{Q}_{\max,v}$ die maximale Wärmefreisetzungsrate von ventilationsgesteuerten Bränden [MW]

$\dot{Q}_{\max,B}$ die maximale Wärmefreisetzungsrate von brandlastgesteuerten Bränden [MW]

Brandlastgesteuerter Brand

$$\dot{Q}_{\max,B} = 0,25/0,31 \cdot A_{\text{Brand}} \quad \text{Gl. (10-12)}$$

Dabei ist

A_{Brand} die maximale mögliche Brandfläche in Abhängigkeit der Raumgröße [m]

Ventilationsgesteuerter Brand

$$\dot{Q}_{\max,v} = 0,1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{Gl. (10-13)}$$

Dabei ist

χ die Verbrennungseffektivität; $\chi = 1$ bei Bestimmung der Heißgas- und Flammenwirkung außerhalb des Brandraumes [-]

H_u der Heizwert 19,5 (bei Wohnnutzung) -bezogen auf, in den meisten Fällen vorliegenden Mischbrandlasten; dieser Begriff ist allgemein als eine Mischung von Brandstoffen entsprechend der jeweiligen Nutzung zu verstehen [67] [MJ/kg]

A_w die Fläche der Ventilationsöffnung [m²]

h_w die gemittelte Höhe der Ventilationsöffnung [m]

10.3.1.2 Bestimmung der Flammenlänge gemäß EC 1-1-2 Anhang B [37]

$$L_L = 1,9 \cdot \left(\frac{\dot{Q}_{\max}}{w_t} \right)^{\frac{2}{3}} - h_w \quad \text{Gl. (10-14)}$$

Dabei ist

L_L die maximale Flammenhöhe über dem Sturz Ventilationsöffnung [m]

w_t die Breite der Ventilationsöffnungen [m]

$$L_F = L_L + \frac{h_w}{2} \quad \text{Gl. (10-15)}$$

Dabei ist

L_F die Länge der Flamme entlang der Achse [m]

10.3.1.3 Bestimmung der Temperatur an der Brandraumöffnung

$$t_w = 0,85 \cdot t_{BR} \quad \text{Gl. (10-16)}$$

Dabei ist

t_{BR} die mittlere Brandraumtemperatur der Vollbrandphase der 20 Minuten [°C]

10.3.1.4 Bestimmung der Temperaturen entlang der Flammenachse

$$t_z = t_w \cdot \exp(z \cdot (0,14 \cdot \ln(L_F) - 0,35)) \quad \text{Gl. (10-17)}$$

Dabei ist

t_w die Temperatur über der Flammenbasis in den Grenzen 0,5 m bis 8,0 m über dem Sturz [°C]

z die Höhe über der Flammenbasis [m]

t_w die Temperatur an Fensteröffnung [°C]

Alternativ ohne Berücksichtigung der Flammenhöhe

$$t_z = t_w \cdot \exp(sh \cdot z)$$

Gl. (10-18)

Dabei ist

sh die Steuergröße zur Bestimmung der Flammentemperatur in den Grenzen -0,17 bis -0,22; Mitteleert -0,182 unter Betrachtung der untersuchten Fensteröffnungsgrößen nach BiR [139] [-]

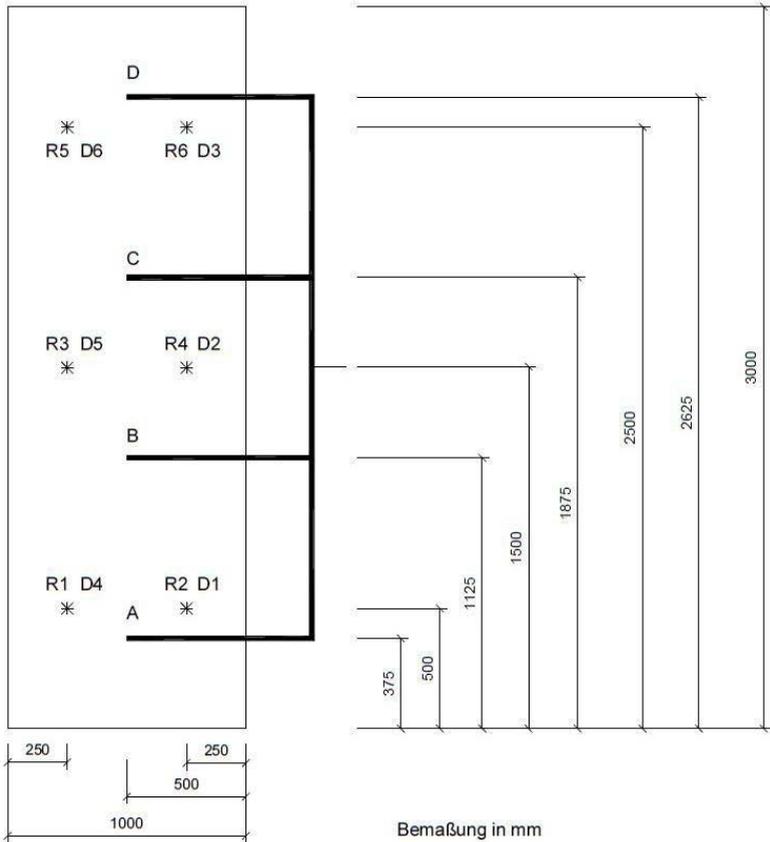
10.3.2 Parameterstudie zur Bestimmung der thermischen Beanspruchung von Außenwänden infolge Wohnraumbränden

Tabelle 10-1: Parameterstudie zur Bestimmung der thermischen Beanspruchung von Außenwänden für den kritischen Wohnraumbrand

Parameter	Einheit	Varianten																		
		RB-1aG	RB-1bG	RB-2aG	RB-2bG	RB-3aG	RB-3bG	RB-4aG	RB-4bG	RB-5aG	RB-5bG	RB-6aG	RB-6bG	RB-7aG	RB-7bG	RB-8aG	RB-8bG	RB-9aG	RB-9bG	
Grundfläche A _F	[m ²]	5,00	5,00	10,00	10,00	15,00	15,00	18,00	18,00	20,00	20,00	25,00	25,00	30,00	30,00	35,00	35,00	40,00	40,00	
Fläche A _w ca. 1/8 Grundfläche	[m]	0,625	0,625	1,25	1,25	2,00	2,00	2,25	2,25	2,50	2,50	3,25	3,25	3,88	4,00	4,50	4,50	5,00	5,00	
Breite w _r	[m]	0,625	1,00	1,25	1,00	2,00	1,00	2,00	1,13	2,00	1,13	2,00	1,63	2,00	1,625	1,825	2,125	2,25	2,00	2,50
Höhe h _w	[m]	1,00	0,63	1,00	1,25	1,00	2,00	1,13	2,00	1,25	2,00	1,63	2,00	2,125	1,825	2,25	2,00	2,50	2,00	
Q _{max,v,k}	[MW]	1,22	0,96	2,44	2,73	3,90	5,52	4,65	6,20	5,45	6,89	8,08	8,96	11,03	10,54	13,16	12,41	15,42	13,79	
Q _{max,t,k}	[MW]	1,25	1,55	3,10	3,10	4,65	4,65	5,58	5,58	6,20	6,20	7,75	7,75	7,50	7,50	8,75	8,75	10,00	10,00	
θ _{Br,mittel} , 20 Minuten	[°C]	725	573	777	835	923	1139	922	1133	947	1139	1139	1137	1114	1085	1097	1120	1093	1121	
θ _{Br,max} , 20 Minuten	[°C]	804	638	857	923	1006	1213	1011	1208	1041	1212	1212	1212	1183	1152	1163	1186	1160	1188	
θ _{Swurz} , 20 Minuten	[°C]	616	487	660	710	785	968	784	963	805	968	968	966	947	922	932	952	929	953	
Branddauer im Vollbrand	[s]	3097	3920	3087	2758	2896	2420	2898	2406	2745	2404	2403	2398	2392	2392	2408	2409	2405	2982	
Wärmeabfuhr an Brandraumöffnung Q _{Br}	[kW]	325	257	650	727	1040	1471	1241	1655	1453	1838	2154	2390	2941	2810	3510	3309	4111	3677	
Flammenlänge über Struz L _L	[m]	1,97	1,23	1,97	2,46	1,97	3,29	2,21	3,53	2,46	3,53	3,06	3,38	2,75	2,58	2,83	2,70	3,06	2,79	
Flammenlänge (+1/3 Öffnungshöhe)	[m]	2,30	1,44	2,30	2,87	2,30	3,96	2,59	4,19	2,87	4,19	3,60	4,05	3,46	3,19	3,58	3,37	3,89	3,45	
Flammenlänge L _F	[m]	2,47	1,54	2,47	3,08	2,47	4,29	2,77	4,53	3,08	4,53	3,87	4,38	3,81	3,49	3,96	3,70	4,31	3,79	

10.4 Anlage D - Validierungsversuche Prüffeur

10.4.1 DIN 4102-20 [32] – Validierungsversuch Kompakt-Gasbrenner



- R1 - R6 Temperaturmessstellen
- A - D Entnahmestellen für die Messung der Konzentration der verschiedenen Abgaskomponenten
- D1 - D6 Differenzdruckmessstellen

Abbildung 10-1: Anordnung der Temperatur- und Emissionsmessstellen im Abgasschlot für die Kalibrierungsversuche gemäß DIN 4102-20 [32]

10.4.2 Sockelbrandprüfung gemäß MVV TB [107] – Validierung Holzkrippe

Experimentelle Auswertung

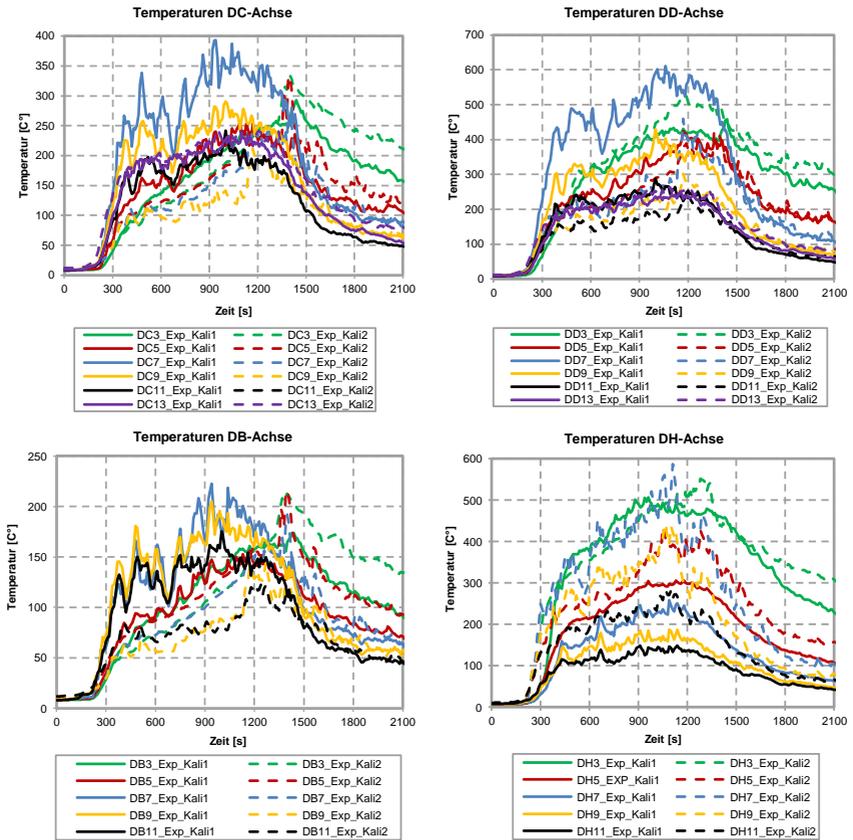


Abbildung 10-2: Gemessene Temperaturverläufe mittels Mantelthermoelement entlang der Achsen DB, DC, DD und DH für die Kalibrierungsversuche Kali1 und Kali2

10.5 Anlage E – Bestimmung eines Prüfverfahrens

10.5.1 Vergleich Grundmodell mit maßgebenden Raumbrandszenario

Die einwirkende Netto-Wärmestromdichte für die betrachtete Prüfwandfläche $B \times H = 2,0 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$ oberhalb der Brandraum- bzw. Brandkammeröffnung wird gemäß EC 1-1-2 nach Gl. (10-19) bestimmt. Für die brandtechnischen Parameter sind die Annahmen nachfolgend unterhalb der Gl. (10-19) aufgelistet. Bei den angesetzten Temperaturen werden sowohl für die Gastemperatur zur Bestimmung des Anteils aus Konvektion als auch für die wirksame Strahlungstemperatur des Brandes die ermittelten maßgebenden Temperaturen für das Raumbrandszenario gemäß Abbildung 3-7 und für das Prüffeuermmodell gemäß Abbildung 7-10 herangezogen.

$$\dot{h}_{\text{net}} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad \text{Gl. (10-19)}$$

Dabei ist

\dot{h}_{net}	die Netto-Wärmestromdichte	[W/m ²]
α_c	der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion (= 25 gemäß Ansatz Außenrandkurve)	[W/(m ² ·K)]
θ_g	die Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils	[°C]
θ_m	die Oberflächentemperatur des Bauteils (= 20 °C)	[°C]
Φ	der Konfigurationsfaktor (= 1 vereinfachte Einnahme)	[-]
ε_m	die Emissivität der Bauteiloberfläche (= 0,8 gemäß EC 1-1-2 [37])	[-]
ε_f	die Emissivität des Feuers (= 0,9 gemäß BiR [138])	[-]
σ	die Stephan-Boltzmann-Konstante (= $5,67 \cdot 10^{-8}$)	[W/(m ² ·K ⁴)]
θ_r	die wirksame Strahlungstemperatur des Brandes	[°C]

In Abbildung 10-3 sind die Ergebnisse aus der Bestimmung für die einwirkenden Wärmestromdichten für das Raumbrandszenario dargestellt sowie in Abbildung 10-4 für das Prüffeuermmodell.

	G	H	I	J	K		
	1,0 m	0,5 m	0,0 m	0,5 m	1,0 m		
Wärmestromdichten über Fenstersturz	9,7	23,3	31,8	23,3	9,7	3,5	Höhe über Sturz z-Achse [m]
	11,0	27,1	37,5	27,1	11,0	3,0	
	12,7	31,7	44,6	31,7	12,7	2,5	
	14,6	37,5	53,6	37,5	14,6	2,0	
	17,0	44,6	64,7	44,6	17,0	1,5	
	19,8	53,5	78,9	53,5	19,8	1,0	
	23,3	64,5	97,0	64,5	23,3	0,5	
	27,6	78,7	120,2	78,7	27,6	0,0	
Fensteröffnung B x H = 2,0 x 1,625 [m]							

Abbildung 10-3: Einwirkende Netto-Wärmestromdichten auf den Prüfwandausschnitt gemäß Gl. (10-19), ermittelt auf Grundlage der Temperaturen für das maßgebende kritische Raumbrandszenario

	G	H	I	J	K		
	1,0 m	0,5 m	0,0 m	0,5 m	1,0 m		
Wärmestromdichten über Brandkammersturz	3,1	11,6	31,6	14,8	4,0	3,5	Höhe über Sturz z-Achse [m]
	3,3	13,7	41,2	18,4	4,4	3,0	
	3,8	17,2	53,1	24,3	5,1	2,5	
	4,4	23,4	66,8	34,1	6,2	2,0	
	5,5	35,2	81,4	51,7	7,7	1,5	
	7,2	61,7	96,4	83,9	10,9	1,0	
	11,4	115,6	113,0	125,7	19,7	0,5	
	31,7	116,6	128,9	131,0	70,2	0,0	
Brandkammeröffnung B x H = 2,0 x 1,5 [m]							

Abbildung 10-4: Einwirkende Netto-Wärmestromdichten auf den Prüfwandausschnitt gemäß Gl. (10-19), ermittelt auf Grundlage der Temperaturen für das Simulationsmodell Pool_3_5MW

10.5.2 Aufbau Poolfeuerkonstruktion

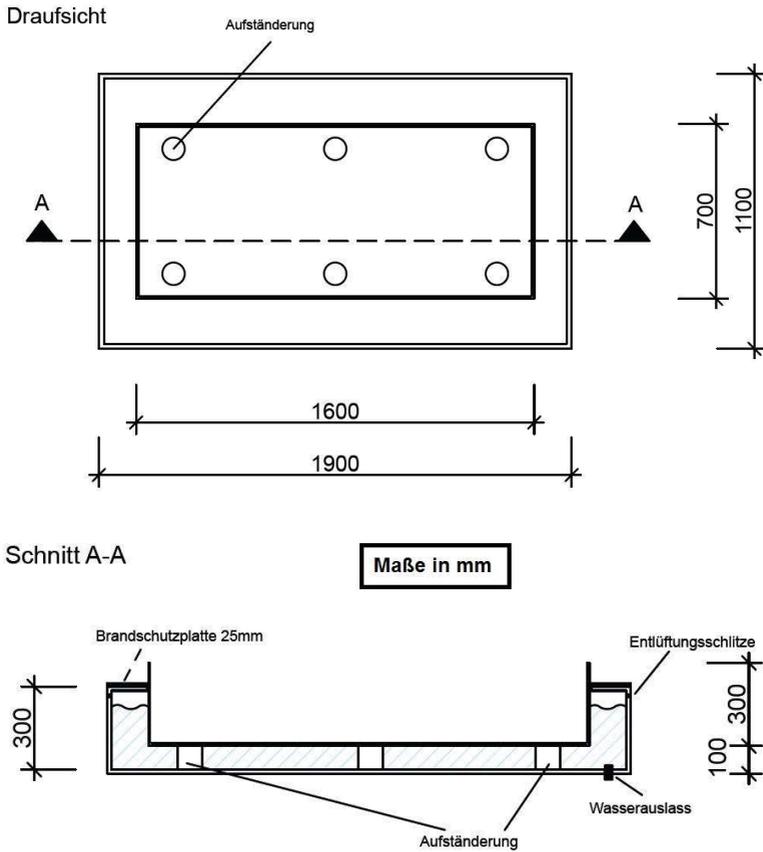


Abbildung 10-5: Darstellung des skizzierten Aufbaus der Prüffuerkonstruktion für das Poolfeuer im entwickelten Prüfverfahren

10.6 Anlage F – Materialspezifische Eingabewerte für FDS

10.6.1 Beton DIN EN 1992-1-2 [39]

```
&MATL ID = 'BETON'  
FYI = 'DIN EN 1992-1-2'  
EMISSIONITY = 0.70  
DENSITY = 2100.  
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_ramp_concrete'  
CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_ramp_concrete' /
```

```
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 0., F= 0.9 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 100., F= 0.9 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 150., F= 0.95 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 200., F= 1 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 250., F= 1.03 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 300., F= 1.05 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 350., F= 1.08 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 400., F= 1.1 /  
&RAMP ID='c_ramp_concrete', T= 1000., F= 1.1 /
```

```
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 0., F= 1.68 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 20., F= 1.64 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 50., F= 1.59 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 100., F= 1.5 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 150., F= 1.41 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 200., F= 1.33 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 250., F= 1.26 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 300., F= 1.18 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 350., F= 1.11 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 400., F= 1.05 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 450., F= 0.99 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 500., F= 0.93 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 550., F= 0.88 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 600., F= 0.83 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 650., F= 0.79 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 700., F= 0.75 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 750., F= 0.71 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 800., F= 0.68 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 850., F= 0.65 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 900., F= 0.63 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 950., F= 0.61 /  
&RAMP ID='k_ramp_concrete', T= 1000., F= 0.59 /
```

10.6.2 Kohlenstoffstahl DIN EN 1993-1-2 [40]

```

&MATL ID = 'Stahl'
      FYI = 'DIN EN 1993-1-2'
      EMISSIVITY = 0.70
      DENSITY = 7850.
      SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_steel'
      CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_steel' /

```

```

&RAMP ID = 'c-steel', T = 0., F = 0.45 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 600., F = 0.76 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 680., F = 0.89 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 720., F = 1.39 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 735., F = 5.0 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 740., F = 2.53 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 760., F = 1.16 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 780., F = 0.91 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 800., F = 0.8 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 900., F = 0.65 /
&RAMP ID = 'c-steel', T = 1200., F = 0.65 /

```

```

&RAMP ID='k_steel', T = 20., F = 54. /
&RAMP ID='k_steel', T = 800., F = 28. /

```

10.6.3 Kalksandstein DIN EN 1996-1-2 [42]

```

&MATL ID = 'Kalksandstein'
      FYI = 'DIN EN 1996-1-2'
      EMISSIVITY = 0.80
      DENSITY = 1600.
      SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_ramp'
      CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_ramp' /

```

```

&RAMP ID='c_ramp', T= 0.0, F= 1.02 /
&RAMP ID='c_ramp', T= 20.0, F= 1.02 /
&RAMP ID='c_ramp', T= 99.9, F= 1.02 /
&RAMP ID='c_ramp', T= 100.0, F= 3.46 /
&RAMP ID='c_ramp', T= 200.0, F= 3.06 /
&RAMP ID='c_ramp', T= 400.0, F= 1.02 /
&RAMP ID='c_ramp', T= 1200.0, F= 1.02 /

```

```

&RAMP ID='k_ramp', T= 0.0, F= 1 /
&RAMP ID='k_ramp', T= 20.0, F= 1 /
&RAMP ID='k_ramp', T= 100.0, F= 4 /
&RAMP ID='k_ramp', T= 300.0, F= 2 /
&RAMP ID='k_ramp', T= 1200.0, F= 0 /

```

10.6.4 Porenbeton DIN EN 1996-1-2 [42]

&MATL ID = 'Porenbeton'
FYI = 'DIN EN 1996-1-2'
EMISSIVITY = 0.80
DENSITY = 600.
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_poren'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_poren/'

&RAMP ID='c_poren', T = 20. , F = 1.05 /
&RAMP ID='c_poren', T = 97.5, F = 1.05 /
&RAMP ID='c_poren', T = 100., F = 1.15 /
&RAMP ID='c_poren', T = 200. , F = 1.15 /
&RAMP ID='c_poren', T = 400. , F = 1.05 /
&RAMP ID='c_poren', T = 1200. , F = 1.05 /

&RAMP ID='k_poren', T = 20., F = 0.15 /
&RAMP ID='k_poren', T = 300., F = 0.17 /
&RAMP ID='k_poren', T = 600., F = 0.20 /
&RAMP ID='k_poren', T = 900., F = 0.28 /
&RAMP ID='k_poren', T = 1200., F = 0.39 /

10.6.5 Leichtbeton DIN 4108-4 [34]

&MATL ID = 'Leichtbeton'
FYI = 'DIN 4108-4'
EMISSIVITY = 0.70,
SPECIFIC_HEAT = 1.0,
DENSITY = 500.,
CONDUCTIVITY = 0.15 /

10.6.6 Fensterglas DIN EN ISO 10456 [44]

&MATL ID = 'GLAS'
FYI = 'DIN EN ISO 10456'
EMISSIVITY = 0.80
CONDUCTIVITY = 1.0
SPECIFIC_HEAT = 0.75
DENSITY = 2500.
ABSORPTION_COEFFICIENT = 600.0 /

10.6.7 Kalziumsilikatplatte (Promatect) [51]

```

&MATL ID = 'Promatect',
      FYI = 'Hersteller Angabe'
      EMISSIVITY = 0.80,
      SPECIFIC_HEAT = 0.975,
      CONDUCTIVITY = 0.175,
      DENSITY = 870./

```

10.6.8 Mineralwolle (Steinwolle)

```

&MATL ID = 'Mineralwolle'
      FYI = 'engineer toolbox'
      EMISSIVITY = 0.80
      DENSITY = 125.
      SPECIFIC_HEAT = 0.84
      CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_miwo' /

```

```

&RAMP ID='k_miwo', T= 20., F=0.040 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 50., F=0.040 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 100., F=0.045 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 150., F=0.051 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 200., F=0.058 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 250., F=0.066 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 300., F=0.075 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 400., F=0.096 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 500., F=0.123 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 600., F=0.157 /
&RAMP ID='k_miwo', T= 680., F=0.188 /

```

10.6.9 Keramikfaserplatte [72]

```

&MATL ID = 'Keramikfaserplatte',
      FYI = 'ISOWOOL 1260 BOARD'
      EMISSIVITY = 0.8,
      DENSITY = 250. ,
      CONDUCTIVITY_RAMP = 'c-Platte',
      SPECIFIC_HEAT = 1.0 /

```

```

&RAMP ID = 'c-Platte', T = 0., F = 0.07 /
&RAMP ID = 'c-Platte', T = 400., F = 0.07 /
&RAMP ID = 'c-Platte', T = 600., F = 0.12 /
&RAMP ID = 'c-Platte', T = 800., F = 0.16 /
&RAMP ID = 'c-Platte', T = 1000., F = 0.23 /

```

10.6.10 Keramikfaserisolierung [72]

```

&MATL ID           = 'Keramikfaserisolierung'
FYI                = 'ISOWOOL 1260 BLANKET'
EMISSIONITY        = 0.8,
DENSITY            = 128.
SPECIFIC_HEAT      = 1.13
CONDUCTIVITY_RAMP  = 'k_keramik_ramp' /

```

```

&RAMP ID='k_keramik_ramp', T= 20., F= 0.06 /
&RAMP ID='k_keramik_ramp', T= 200., F= 0.06 /
&RAMP ID='k_keramik_ramp', T= 400., F= 0.09 /
&RAMP ID='k_keramik_ramp', T= 600., F= 0.15 /
&RAMP ID='k_keramik_ramp', T= 800., F= 0.22 /
&RAMP ID='k_keramik_ramp', T= 1000., F= 0.31 /

```

10.6.11 Plattenthermoelement

```

&MATL ID           = 'INCONEL'
FYI                = 'FDS-User-Forum'
EMISSIONITY        = 0.85
DENSITY            = 8470.
CONDUCTIVITY_RAMP  = 'k_inc'
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_inc' /

```

```

&RAMP ID='k_inc', T = 20., F = 14.9 /
&RAMP ID='k_inc', T = 100., F = 15.9 /
&RAMP ID='k_inc', T = 200., F = 17.3 /
&RAMP ID='k_inc', T = 300., F = 19.0 /
&RAMP ID='k_inc', T = 400., F = 20.5 /
&RAMP ID='k_inc', T = 500., F = 22.1 /
&RAMP ID='k_inc', T = 600., F = 23.9 /
&RAMP ID='k_inc', T = 700., F = 25.7 /
&RAMP ID='k_inc', T = 800., F = 27.5 /

```

```

&RAMP ID='c_inc', T = 20., F = 0.444 /
&RAMP ID='c_inc', T = 100., F = 0.465 /
&RAMP ID='c_inc', T = 200., F = 0.486 /
&RAMP ID='c_inc', T = 300., F = 0.502 /
&RAMP ID='c_inc', T = 400., F = 0.519 /
&RAMP ID='c_inc', T = 500., F = 0.536 /
&RAMP ID='c_inc', T = 600., F = 0.578 /
&RAMP ID='c_inc', T = 700., F = 0.595 /
&RAMP ID='c_inc', T = 800., F = 0.611 /
&RAMP ID='c_inc', T = 900., F = 0.628 /

```

```

&MATL ID           = 'CERABLANKET'
EMISSIONITY        = 0.8
DENSITY            = 128.
CONDUCTIVITY_RAMP  = 'k_ins'
SPECIFIC_HEAT      = 1.13 /

```

```
&RAMP ID='k_ins', T = 20., F = 0.06 /
&RAMP ID='k_ins', T = 260., F = 0.06 /
&RAMP ID='k_ins', T = 400., F = 0.10 /
&RAMP ID='k_ins', T = 600., F = 0.15 /
&RAMP ID='k_ins', T = 800., F = 0.20 /
&RAMP ID='k_ins', T =1000., F = 0.27 /
```

```
&SURF ID = 'plateback',
COLOR = 'WHITE',
MATL_ID(1,1) = 'CERABLANKET',
MATL_ID(2,1) = 'INCONEL',
MATL_MASS_FRACTION(1,1) = 1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1) = 1.0,
THICKNESS(1:2) = 0.01,7.0E-4,/,
```

```
&SURF ID = 'platefront',
COLOR = 'BLACK',
MATL_ID(1,1) = 'INCONEL',
MATL_ID(2,1) = 'CERABLANKET',
MATL_MASS_FRACTION(1,1) = 1.0,
MATL_MASS_FRACTION(2,1) = 1.0,
THICKNESS(1:2) = 7.0E-4,0.01,/,
```

```
&OBST XB = -1.0,-1.1, 0.2, 0.21, 4.4,4.5,
SURF_ID6='INERT','INERT','platefront','plateback','INERT','INERT'/
```

```
&DEVC ID= '10', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ= -1.1, 0.2, 4.5, IOR=2/
```

Thomas Merkwitsch

Ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen

Aufgrund von eingetretenen Brandereignissen im Zusammenhang mit brennbaren Außenwandbekleidungen wurde die öffentliche Diskussion über eine ausreichende Brandsicherheit von Fassaden in der jüngeren Vergangenheit in Deutschland und in Europa deutlich verstärkt. Zudem herrscht national sowie international eine große Unsicherheit darüber, wie zukünftig Außenwandbekleidungen einheitlich in Europa geprüft werden sollen, um eine ausreichende Sicherheit zu erzielen und dabei gleichzeitig einen marktgerechten Handel innerhalb Europas zu gewährleisten.

Aus diesem Grund ist es Ziel dieser Arbeit, ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen zu entwickeln, das es ermöglicht, auftretende kritische Brandszenarien in einer Brandprüfung ausreichend sicher abzudecken und gleichzeitig realitätsnah zu simulieren. Dabei soll der technologische Aufwand zur Umsetzung des Prüfverfahrens auf das notwendigste Maß begrenzt sowie eine hohe Reproduzierbarkeit und Wiederholbarkeit der Brandprüfung gewährleistet werden können.

Zur Entwicklung des Prüfverfahrens werden dazu numerische Modelle für unterschiedliche, in Brandprüfungen eingesetzte Prüffeuertypen bestimmt, die an verschiedenen Prüfstandsgeometrien von mittel und groß skalierten Brandversuchen validiert werden. Somit soll auf kostenintensive Brandversuche zur Bestimmung der wesentlichen Einflussparameter verzichtet werden.

Zum Nachweis einer realitätsnahen Brandbeanspruchung im Brandversuch wird im Rahmen einer Parameterstudie die maßgebende thermische Beanspruchung auf eine Außenwand infolge eines Raumbrandszenarios anhand analytischer Berechnungsmethoden bestimmt und mit den Simulationsmodellen für die untersuchten Prüffeuertypen an einem repräsentativen Prüfstand auf Übereinstimmung überprüft.

Auf Grundlage des bestimmten Prüffeuers werden die geometrischen und material-spezifischen Einflüsse des Prüfstandes sowie die Auswirkungen der Umgebungsbedingungen zur Herleitung notwendiger, festzulegender Randbedingungen im Prüfverfahren bestimmt. Des Weiteren werden Randbedingungen zum Prüfablauf erarbeitet, die es ermöglichen, eine gute Reproduzierbarkeit der Prüfung zu erzielen.

Durch Vergleichsbetrachtungen mit dem nationalen Sockelbrandversuch und den wesentlichen europäischen groß skalierten Brandversuchen für Außenwandbekleidungen wird die Gleichwertigkeit des entwickelten Brandversuchs nachgewiesen, sodass das Prüfverfahren sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene Anerkennung finden kann.

ISBN 978-3-7388-0361-7



9 783738 803617