

# Untersuchungen zur Brandentstehung und Brandausbreitung in Wohnungen

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von M.Sc. Sven Kaudelka  
geb. am 9. Juni 1986 in Magdeburg

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht (Vorsitz)  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Krause (Gutachter)  
Prof. Dr.-Ing. Uli Barth (Gutachter)  
Dr.-Ing. Anja Hofmann-Böllinghaus (Gutachterin)

eingereicht am: 28. August 2018  
Promotionskolloquium am: 25. Februar 2019



## Kurzreferat

Zur Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten in der Bundesrepublik Deutschland wurden im Jahr 1998 die Qualitätskriterien Hilfsfrist, Funktionsstärke und Erreichungsgrad für ein standardisiertes Schadensereignis erarbeitet. Das standardisierte Schadensereignis basiert auf Ergebnissen der O.R.B.I.T.-Studie aus dem Jahr 1978. Der dort dargestellte Rauchgastemperaturverlauf für einen standardisierten Wohnungsbrand stellt Ergebnisse von Brandversuchen in einer Wohnung aus dem Jahr 1939 dar. Die zur Untersuchung herangezogenen Einrichtungsgegenstände bestanden dabei überwiegend aus cellulosehaltigen Materialien wie Holz und Papier. Die zunehmende Verwendung von Werkstoffen auf der Basis von Holz und Polymeren führt jedoch zu einer veränderten stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen in Wohnungen. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde der Einfluss dieser veränderten stofflichen Zusammensetzung von gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen auf den Verlauf von Raumbränden sowie auf die damit verbundene Stoff- und Energiefreisetzung während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase untersucht. Im Fokus der Untersuchung stand der Raum der Brandentstehung sowie ein angrenzender Raum.

Die Ergebnisse zeigen, dass gegenwärtige Einrichtungsgegenstände sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in dem angrenzenden Raum zu höheren Rauchgastemperaturen und -konzentrationen führen. Grund hierfür sind neben den höheren Wärmefreisetzungsraten auch die höheren Stoffausbeuten der in den gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen verwendeten Materialzusammensetzungen. Vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass sich die auf Basis der O.R.B.I.T.-Studie definierten Standards nicht mehr als Grundlage zur Bedarfsplanung von Feuerwehren eignen. Diese können mit Hilfe der vorliegenden Ergebnisse einer Prüfung unterzogen werden, um den veränderten Brandverläufen im Rahmen einer zukünftigen Bedarfsplanung gerecht zu werden.



# Abstract

In 1998 the quality criterias auxiliary period, functional force and degree of achievement for a standardized damage event were developed for the demand planning of fire brigades in cities in the Federal Republic of Germany. The definition of the standardized damage event is based on the results of the O.R.B.I.T.-study from 1978. The temperature-time curve for a standardized apartment fire presented in the above-mentioned definition study represents results of fire tests in an apartment from 1939. The furniture used for the investigation consisted mainly of cellulosic materials like wood and paper. However the increasing use of materials based on wood and polymers leads to an altered material composition of furniture in apartments. In the present dissertation the influence of this altered material composition of current furniture on the course of a fire in an apartment as well as on the associated mass and energy release during the ignition of a fire and fire propagation was investigated. The investigation focused on the room where the fire starts and on an adjacent room.

As a result, it has been found that current furniture, both in the room where the fire starts and in an adjacent room, results in higher gas temperatures and higher gas concentrations. This is due to the higher heat release rates as well as the higher yields of the material compositions used in current furniture. Against this background, it becomes clear that the standards that were defined in the O.R.B.I.T.-study can no longer serve as the basis for demand planning of fire brigades. These should be reviewed with the help of the present results in order to adapt future demand planning to changing fire scenarios.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problembeschreibung . . . . .	1
1.2 Stand der Forschung . . . . .	2
1.3 Untersuchungsziel . . . . .	3
1.4 Methodische Vorgehensweise . . . . .	4
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Experimentelle Grundlagen . . . . .	5
2.1.1 SBI-Versuchsapparatur . . . . .	5
2.1.2 HRR . . . . .	6
2.1.3 Stofffreisetzung und -ausbeute . . . . .	11
2.1.4 Zündquelle . . . . .	14
2.2 Numerische Grundlagen . . . . .	17
2.2.1 Bilanzgleichungen . . . . .	17
2.2.2 Numerisches Verfahren . . . . .	19
2.2.3 Turbulenz . . . . .	20
2.2.4 Verbrennung . . . . .	21
2.2.5 Strahlung . . . . .	22
2.2.6 Fehlerbetrachtung . . . . .	23
<b>3 Ermittlung eines repräsentativen Brandszenarios</b>	<b>25</b>
3.1 Untersuchungsziel . . . . .	25
3.2 Brandtote in der Bundesrepublik Deutschland . . . . .	25
3.3 Orte der Brandentstehung und des Personenfundes . . . . .	27
3.4 Brandursachen . . . . .	28
3.5 Repräsentatives Brandszenario . . . . .	30
<b>4 Experimentelle Untersuchung von Materialzusammensetzungen</b>	<b>31</b>
4.1 Untersuchungsziel . . . . .	31
4.2 Untersuchungsmethode und -gegenstand . . . . .	31
4.2.1 Materialzusammensetzungen . . . . .	31
4.2.2 Experimentelles Design . . . . .	32

4.2.3	Versuchsaufbau . . . . .	33
4.2.4	Versuchskörper und Zündbedingungen . . . . .	34
4.2.5	Messtechnik und Messstellen . . . . .	36
4.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	37
4.3.1	Brandentwicklung . . . . .	37
4.3.2	MLR . . . . .	41
4.3.3	HRR . . . . .	45
4.3.4	Stofffreisetzung und -ausbeute . . . . .	48
4.3.5	Vergleich der Materialzusammensetzungen . . . . .	52
4.3.6	Skalierbarkeit der Untersuchungsergebnisse . . . . .	53
4.4	Schlussfolgerungen . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der Brandentstehung</b>	<b>55</b>
5.1	Untersuchungsziel . . . . .	55
5.2	Untersuchungsmethode und -gegenstand . . . . .	55
5.2.1	Experimentelles Design . . . . .	55
5.2.2	Versuchsapparaturen . . . . .	56
5.2.3	Versuchskörper und Zündbedingungen . . . . .	57
5.2.4	Modellbasierte HRR . . . . .	61
5.2.5	Messtechnik und Messstellen . . . . .	61
5.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	64
5.3.1	Flammen- und Rauchgasausbreitung . . . . .	64
5.3.2	HRR . . . . .	64
5.3.3	Rauchgastemperaturen . . . . .	69
5.4	Schlussfolgerungen . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der Brandausbreitung</b>	<b>73</b>
6.1	Untersuchungsziel . . . . .	73
6.2	Untersuchungsmethode und -gegenstand . . . . .	74
6.2.1	Experimentelles Design . . . . .	74
6.2.2	Gebäude- und Raumeometrien . . . . .	74
6.2.3	Einrichtungsgegenstände . . . . .	77
6.2.4	Brandlast und Brandlastdichte . . . . .	79
6.2.5	HRR . . . . .	81
6.2.6	Ventilations- und Klimabedingungen . . . . .	83
6.2.7	Zündbedingungen . . . . .	84
6.2.8	Messtechnik und Messstellen . . . . .	85
6.2.9	Auswertung . . . . .	87
6.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	90
6.3.1	Einfluss der stofflichen Zusammensetzung . . . . .	91
6.3.1.1	Rauchgasausbreitung . . . . .	91
6.3.1.2	Ansprechverhalten der Rauchwarnmelder . . . . .	91
6.3.1.3	Rauchgastemperaturen . . . . .	92
6.3.1.4	Rauchgaskonzentrationen . . . . .	97

6.3.2	Einfluss der Ventilationsbedingungen . . . . .	100
6.3.2.1	Rauchgasausbreitung . . . . .	100
6.3.2.2	Ansprechverhalten der Rauchwarnmelder . . . . .	102
6.3.2.3	Rauchgastemperaturen . . . . .	103
6.3.2.4	Rauchgaskonzentrationen . . . . .	107
6.4	Schlussfolgerungen . . . . .	113
<b>7</b>	<b>Numerische Untersuchung von Brandszenarien</b>	<b>115</b>
7.1	Untersuchungsziel . . . . .	115
7.2	Untersuchungsmethode und -gegenstand . . . . .	116
7.2.1	Brandszenarien . . . . .	116
7.2.2	Randbedingungen . . . . .	117
7.2.3	Auswertung . . . . .	118
7.2.4	Validierung . . . . .	120
7.3	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	122
7.3.1	Rauchgastemperaturen . . . . .	122
7.3.2	Rauchgaskonzentrationen . . . . .	125
7.4	Schlussfolgerungen . . . . .	125
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>129</b>
	<b>Literatur</b>	<b>133</b>
	<b>Verzeichnis der Anhänge</b>	<b>143</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Rauchgastemperaturen und CO-Konzentration. . . . .	2
1.2	Raumbrandspezifische Einflussfaktoren. . . . .	3
2.1	SBI-Versuchsapparatur. . . . .	6
2.2	Anordnung des Probenträgerwagens. . . . .	7
2.3	Stoffströme in der SBI-Versuchsapparatur. . . . .	7
2.4	Anordnung der Gaskonzentrationsmesstechnik im Messabschnitt. . . . .	8
2.5	Gasflamme zur Untersuchung der Entzündbarkeit von Polstermöbeln. . . . .	15
2.6	Brandentwicklung eines Papierkissens. . . . .	16
2.7	Vergleich der Zündquellen Gasflamme und Papierkissen. . . . .	17
2.8	Aufbau der Zündquelle Papierkissen. . . . .	18
2.9	Räumliche und zeitliche Diskretisierung. . . . .	20
2.10	Turbulenzskalen und Berechnungsansätze. . . . .	21
3.1	Methode zur Definition eines repräsentativen Brandszenarios. . . . .	26
3.2	Anzahl von Todesopfern in Abhängigkeit des Jahres und des Ortes. . . . .	27
3.3	Anzahl der Brände mit Todesfolge. . . . .	29
3.4	Anzahl der Ursachen von Bränden in Wohngebäuden mit Todesfolge. . . . .	30
4.1	Definition der Materialzusammensetzungen. . . . .	32
4.2	Experimentelles Design zur Untersuchung der Materialzusammensetzungen. . . . .	33
4.3	Versuchsaufbau. . . . .	34
4.4	Anordnung des Versuchsaufbaus. . . . .	35
4.5	Aufbau der Versuchskörper. . . . .	36
4.6	Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	38
4.7	Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Span und PUR (5 kg). . . . .	39
4.8	Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Span und PUR (10 kg). . . . .	39
4.9	Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Span und PUR (15 kg). . . . .	40
4.10	Brandentwicklungen eines Versuchskörpers aus Holz (20 kg). . . . .	40
4.11	Masse der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	41
4.12	Masse der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (5, 10, 15 und 20 kg). . . . .	42
4.13	MLR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	43
4.14	MLR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (5, 10, 15 und 20 kg). . . . .	44
4.15	HRR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	45
4.16	THR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	46
4.17	HRR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (5, 10, 15 und 20 kg). . . . .	47
4.18	Stoffmengenanteile der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	49

4.19	Stofffreisetzungsraten der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg).	50
4.20	Ges. Stofffreisetzung der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg).	51
4.21	HRR der Materialzusammensetzungen. . . . .	52
4.22	Skalierbarkeit der maximalen HRR. . . . .	54
5.1	Experimentelles Design zur Untersuchung der Brandentstehung. . . . .	56
5.2	Untersuchungsgeometrie. . . . .	57
5.3	Aufbau der Untersuchungsgeometrien. . . . .	58
5.4	Anordnung der Versuchskörper. . . . .	59
5.5	Anordnung des Sessels und Lage der Zündquelle. . . . .	60
5.6	Modellbasierte HRR. . . . .	62
5.7	Anordnung der Temperaturmessstellen. . . . .	63
5.8	Flammen- und Rauchgasausbreitung (Versuch 1 und 2). . . . .	65
5.9	Masse und MLR (Versuch 1 und 2). . . . .	66
5.10	Flammenausbreitung (Versuch 3). . . . .	67
5.11	Masse und MLR (Versuch 3). . . . .	68
5.12	HRR und THR (Versuch 3). . . . .	68
5.13	HRR und THR (Versuch 1 und 2). . . . .	69
5.14	Rauchgastemperaturen in der Messebene 1 (Versuch 1 und 2). . . . .	70
5.15	Rauchgastemperaturen im Messbaum 5 (Versuch 1 und 2). . . . .	71
6.1	Experimentelles Design zur Untersuchung der Brandausbreitung. . . . .	74
6.2	Gebäude zur Untersuchung der Brandausbreitung. . . . .	75
6.3	Raumgeometrien zur Untersuchung der Brandausbreitung. . . . .	76
6.4	Einrichtungsgegenstände im Raum der Brandentstehung. . . . .	77
6.5	Lage der Einrichtungsgegenstände. . . . .	78
6.6	Stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände. . . . .	79
6.7	Vergleich von Brandlastdichten. . . . .	82
6.8	Normativ geregelte HRR. . . . .	83
6.9	Lage der Ventilationsöffnungen. . . . .	83
6.10	Lage der Zündquelle auf dem Sessel. . . . .	85
6.11	Datenerfassungsgerät (Rauchgastemperaturen) und FTIR-Spektrometer. . . . .	86
6.12	Anordnung der Temperaturmessstellen. . . . .	87
6.13	Anordnung der Rauchgaskonzentrationsmessstellen (Versuch 1.1). . . . .	88
6.14	Anordnung der Rauchgaskonzentrationsmessstellen (Versuch 2.1 und 2.2). . . . .	89
6.15	Rauchgasausbreitung (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	92
6.16	Ansprechzeiten der Rauchwarnmelder (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	93
6.17	Rauchgastemp. im Raum der Brandentstehung (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	94
6.18	Rauchgastemp. im angrenzenden Raum (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	95
6.19	Rauchgaskonz. im angrenzenden Raum im MP 2 (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	98
6.20	Rauchgaskonz. im angrenzenden Raum im MP 1 (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	99
6.21	Rauchgasausbreitung (Versuch 2.1 und 2.2). . . . .	102
6.22	Ansprechzeiten der Rauchwarnmelder (Versuch 2.1 und 2.2). . . . .	103
6.23	Rauchgastemp. im Raum der Brandentstehung (Versuch 2.1 und 2.2). . . . .	105

---

6.24	Rauchgastemp. im angrenzenden Raum (Versuch 2.1 und 2.2).	106
6.25	Vergleich der Rauchgastemperaturen.	107
6.26	Rauchgaskonz. im angrenzenden Raum im MP 2 (Versuch 2.1 und 2.2).	109
6.27	Rauchgaskonz. im angrenzenden Raum im MP 1 (Versuch 2.1 und 2.2).	110
6.28	Vergleich der CO-Konzentrationen.	111
7.1	Brandszenarien.	116
7.2	In <i>SMV</i> visualisierte Raumgeometrien.	117
7.3	Anordnung der Auswertungsstellen.	119
7.4	Flammen- und Rauchgasausbreitung (Versuch 1 und 2).	120
7.5	Anordnung der Mess- und Auswertungsstellen.	121
7.6	Validierung der mit <i>FDS</i> berechneten Rauchgastemperaturen.	122
7.7	Mit <i>FDS</i> berechnete Rauchgastemperaturen.	123
7.8	Mit <i>SMV</i> visualisierte Rauchgastemperaturen.	124
7.9	Mit <i>FDS</i> berechnete CO-Konzentrationen.	126
7.10	Mit <i>SMV</i> visualisierte CO-Konzentrationen.	127
C.1	Brandentwicklung einer Zündquelle.	150
C.2	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Holz (1 kg).	151
C.3	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Holz (20 kg).	152
C.4	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (1 kg).	153
C.5	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (5 kg).	154
C.6	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (10 kg).	155
C.7	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (15 kg).	156
C.8	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (1 kg).	157
C.9	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (5 kg).	158
C.10	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (10 kg).	159
C.11	Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (15 kg).	160
C.12	Massen und MLR der Zündquelle.	161
C.13	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Holz (1 kg).	161
C.14	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Holz (20 kg).	162
C.15	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (1 kg).	162
C.16	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (5 kg).	163
C.17	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (10 kg).	163
C.18	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (15 kg).	164
C.19	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (1 kg).	164
C.20	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (5 kg).	165
C.21	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (10 kg).	165
C.22	Massen und MLR der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (15 kg).	166
C.23	HRR und THR der Zündquelle.	167
C.24	HRR und THR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Holz (1 kg).	167
C.25	HRR und THR der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (1 kg).	168
C.26	HRR und THR der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (1 kg).	168
C.27	Stoffmengenanteile aus der Zündquelle.	171

C.28 Stofffreisetzungsraten aus der Zündquelle. . . . .	172
C.29 Gesamte Stofffreisetzung aus der Zündquelle. . . . .	173
C.30 Stoffmengenanteile aus den Versuchskörpern 1 bis 3 aus Holz (1 kg). . . . .	174
C.31 Stofffreisetzungsraten der Versuchskörper 1 bis 3 aus Holz (1 kg). . . . .	175
C.32 Gesamte Stofffreisetzung der Versuchskörper 1 bis 3 aus Holz (1 kg). . . . .	176
C.33 Stoffmengenanteile aus den Versuchskörpern 1 bis 3 aus Span (1 kg). . . . .	177
C.34 Stofffreisetzungsraten der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (1 kg). . . . .	178
C.35 Gesamte Stofffreisetzung der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (1 kg). . . . .	179
C.36 Stoffmengenanteile aus den Versuchskörpern 1 bis 3 aus PUR (1 kg). . . . .	180
C.37 Stofffreisetzungsraten der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (1 kg). . . . .	181
C.38 Gesamte Stofffreisetzung der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (1 kg). . . . .	182
D.1 Experimentelle Erprobung der Zündbedingungen. . . . .	186
D.2 Masse und MLR (Zündversuch, Versuch 1 und 2). . . . .	187
D.3 Flammen- und Rauchgasausbreitung (Versuch 1). . . . .	188
D.4 Flammen- und Rauchgasausbreitung (Versuch 2). . . . .	189
D.5 Rauchgastemperaturen (Versuch 1 und 2). . . . .	190
E.1 Rauchgasausbreitung (Versuch 1.1). . . . .	194
E.2 Rauchgasausbreitung (Versuch 2.1). . . . .	195
E.3 Rauchgasausbreitung (Versuch 2.2). . . . .	196
E.4 Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung (Versuch 1.1). . . . .	197
E.5 Rauchgastemperaturen im angrenzenden Raum (Versuch 1.1). . . . .	198
E.6 Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung (Versuch 2.1). . . . .	199
E.7 Rauchgastemperaturen im angrenzenden Raum (Versuch 2.1). . . . .	200
E.8 Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung (Versuch 2.2). . . . .	201
E.9 Rauchgastemperaturen im angrenzenden Raum (Versuch 2.2). . . . .	202

# Tabellenverzeichnis

2.1	Klimabedingungen zur Konditionierung von Bauprodukten. . . . .	6
2.2	Vergleich der Zündquellen Gasflamme und Papierkissen. . . . .	16
4.1	Typenbezeichnungen und Dichten der Stoffe Holz, Span und PUR. . . . .	35
4.2	Maximale MLR. . . . .	43
4.3	Verbrennungswärmen der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	46
4.4	Stoffausbeuten der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (1 kg). . . . .	48
4.5	Effektive Verbrennungswärmen der Materialzusammensetzungen. . . . .	53
4.6	Stoffausbeuten der Materialzusammensetzungen. . . . .	53
5.1	Klimabedingungen der Umgebung. . . . .	60
5.2	Raumnutzungsabhängige Brandentwicklungsfaktoren. . . . .	61
5.3	Maximale und gemittelte MLR (Versuch 1 und 2). . . . .	65
5.4	Maximale und gemittelte HRR (Versuch 1 und 2). . . . .	67
5.5	Maximale Rauchgastemperaturen in der Messebene 1 (Versuch 1 und 2). . . . .	69
6.1	Stoffliche Zusammensetzung der älteren Einrichtungsgegenstände. . . . .	80
6.2	Stoffliche Zusammensetzung der gegenwärtigen Einrichtungsgegenstände. . . . .	81
6.3	Brandlast, Brandlastdichte und mittlerer Heizwert. . . . .	82
6.4	Variation der Ventilationsöffnungen. . . . .	84
6.5	Klimabedingungen. . . . .	84
6.6	Einsatztoleranzwerte (ETW) für CO <sub>2</sub> , CO und HCN. . . . .	90
6.7	Höhe der raucharmen Schicht (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	91
6.8	Maximale Rauchgastemperaturen (Versuch 1.1 und 1.2). . . . .	96
6.9	Dauer bis zur Grenztemperatur (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	96
6.10	Maximale Rauchgaskonzentrationen (Versuch 1.1 und 1.2). . . . .	100
6.11	Dauer bis zum Erreichen der ETW (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	101
6.12	Höhe der raucharmen Schicht (Versuche 2.1 und 2.2). . . . .	103
6.13	Maximale Rauchgastemperaturen (Versuch 2.1 und 2.2). . . . .	104
6.14	Dauer bis zur Grenztemperatur (Versuch 1.1 und 2.1). . . . .	108
6.15	Maximale Rauchgaskonzentrationen (Versuch 2.1 und 2.2). . . . .	111
6.16	Dauer bis zum Erreichen der ETW (Versuch 2.1 und 2.2). . . . .	112
7.1	Klimabedingungen. . . . .	117
B.1	Brände in mehrgeschossigen Wohngebäuden mit Todesfolge. . . . .	147
C.1	Zusammenfassung des experimentellen Designs. . . . .	149

C.2	Effektive Verbrennungswärmen der Zündquelle. . . . .	169
C.3	Effektive Verbrennungswärmen der Versuchskörper 1 bis 3 aus Holz (1 kg). 169	
C.4	Effektive Verbrennungswärmen der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (1 kg).170	
C.5	Effektive Verbrennungswärmen der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (1 kg).170	
C.6	Stoffausbeuten aus der Zündquelle. . . . .	183
C.7	Stoffausbeuten der Versuchskörper 1 bis 3 aus Holz (1 kg). . . . .	183
C.8	Stoffausbeuten der Versuchskörper 1 bis 3 aus Span (1 kg). . . . .	184
C.9	Stoffausbeuten der Versuchskörper 1 bis 3 aus PUR (1 kg). . . . .	184
D.1	Zusammenfassung des experimentellen Designs. . . . .	185
D.2	Bauphysikalische Eigenschaften der Gipskartonplatten. . . . .	185
E.1	Zusammenfassung des experimentellen Designs. . . . .	191
E.2	Bauphysikalische Eigenschaften der Einbaufenster. . . . .	192
E.3	Kindergößen zwischen 0 und 14 Jahren. . . . .	192
E.4	Obere Messbereichsgrenzen des FTIR-Spektrometers (ME 2). . . . .	193
F.1	Wärmeleitfähigkeit des Betons. . . . .	203
F.2	Spezifische Wärmekapazität des Betons. . . . .	203

# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

## Lateinische Großbuchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	[A]	Zustandsgröße
$A_B$	m <sup>2</sup>	Fläche
$A_E$	[A] · 1/(m <sup>3</sup> s)	volumenspezifische Rate (Veränderung von $A$ )
$A_Q$	[A] · 1/(m <sup>3</sup> s)	volumenspezifische Rate (Erzeugung oder Vernichtung von $A$ )
$A_R$	m <sup>2</sup>	Querschnittsfläche des Abzugsrohres
$C$	ppm	Konzentration
$C_{max}$	ppm	maximale Konzentration
$C_\nu$	-	Modell-Konstante
$C_{Ru\beta}^e$	-	Volumenkonzentration des Rußes
$D_{SBI}$	1/m	optische Dichte der abgesaugten Luft im Messabschnitt
$D^*$	m	charakteristischer Flammendurchmesser
$E$	J	Gesamtenergie
$E_C$	kJ/m <sup>3</sup>	Wärmefreisetzung je verbrauchtem Volumen O <sub>2</sub>
$F$	%	Feuchtigkeit des Betons
$G$	m <sup>2</sup>	Gebiet
$H$	%	relative Luftfeuchtigkeit
$H_i, \Delta H_{c,net}$	MJ/kg, kW h/kg	Heizwert (früher unterer Heizwert $H_u$ )
$H_R$	m	Höhe der raucharmen Schicht
$\Delta H_{c,eff\ VK}$	MJ/kg	effektive Verbrennungswärme des Versuchskörpers
$\Delta H_{c,net\ VK}$	MJ/kg	Heizwert des Versuchskörpers
$I$	W/sr	Intensität der einfallenden Strahlung
$I_b(x)$	W/sr	Strahlungsintensität (schwarzer Körper)
$I_0$	W/sr	Intensität der austretenden Strahlung
$M_a$	g/mol	molare Masse der angesaugten Umgebungsluft
$M_{CO}$	g/mol	molare Masse des CO
$M_{CO_2}$	g/mol	molare Masse des CO <sub>2</sub>
$M_{US}$	kg	Masse (ungeschützte brennbare Stoffe)
$O(\Delta x)^2$	-	Abbruchfehlerterm zweiter Ordnung
$Q_{VK,ges}$	MJ	gesamte freigesetzte Wärme (engl. Total Heat Release, THR) des Versuchskörpers

$Q_R$	MJ	Brandlast
$\dot{Q}(t)$	kW	Wärmefreisetzungsrate (engl. Heat Release Rate, HRR)
$\dot{Q}_{ges}(t)$	kW	gesamte Wärmefreisetzungsrate
$\dot{Q}_{max}(t)$	kW	maximale Wärmefreisetzungsrate
$\dot{Q}_{max}^*(t)$	MW/kg	maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate
$\dot{Q}_{max,b}(t)$	MW	maximale brandlastgesteuerte Wärmefreisetzungsrate
$\dot{Q}_{VK}(t)$	kW	Wärmefreisetzungsrate des Versuchskörpers
$\dot{Q}_{\overline{ZQ}}(t)$	kW	arithmetisch gemittelte Wärmefreisetzungsrate der Zündquelle
$RHR$	MW/m <sup>2</sup>	maximale flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate
$T$	K	Temperatur
$\overline{T}_{ms}(t)$	K	arithmetisch gemittelte Temperatur
$U(x)$	W	über $G$ integrierte Strahlungsintensität
$V$	m <sup>3</sup>	Kontrollvolumen
$\dot{V}^e(t)$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom der abgesaugten Luft
$\dot{V}_{298}^e(t)$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom (Bezugstemperatur: 298 K)
$\dot{V}_f(t)$	m <sup>3</sup> /s	brennstoffspezifischer Volumenstrom
$dV$	m <sup>3</sup>	infinitesimal kleines Volumenelement
$Y_{CO, VK}$	gCO/gVK	CO-Ausbeute des Versuchskörpers
$Y_{CO_2, VK}$	gCO <sub>2</sub> /gVK	CO <sub>2</sub> -Ausbeute des Versuchskörpers
$Y_{Ru\beta, VK}$	gRu $\beta$ /gVK	Ru $\beta$ ausbeute des Versuchskörpers
$Z_A$	-	Massenanteil der Luft
$Z_F$	-	Massenanteil des Brennstoffs

## Lateinische Kleinbuchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	[A] · l/kg	spezifische Form der Zustandsgröße $A$
$c$	K <sup>0,5</sup> m <sup>1,5</sup> kg <sup>-0,5</sup>	Konstante
$c_B$	kJ/(kg K)	spezifische Wärmekapazität des Betons
$c_p$	kJ/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
$c_{\alpha Ch}$	kg/kg	Konzentration der Komponente $\alpha Ch$
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$k_\rho$	-	Korrekturfaktor der Reynolds-Zahl ( $Re$ )
$k_{sgs}$	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	kinetische Energie
$k_t$	-	Strömungsprofilfaktor
$l$	m	Länge der Lichtmessstrecke
$m$	kg	Masse, Versuchskörpermasse
$m_{Af}$	-	Abbrandfaktor

---

$m_{\alpha Ch}$	kg	Masse der Komponente $\alpha Ch$
$m_{CO, ges}$	gCO	gesamte CO-spezifische freigesetzte Masse
$m_{CO, VK}$	gCO	gesamte CO-spezifische freigesetzte Masse des Versuchskörpers
$m_{CO, \overline{ZQ}}$	gCO	gesamte CO-spezifische freigesetzte Masse der Zündquelle
$m_{CO_2, ges}$	gCO <sub>2</sub>	gesamte CO <sub>2</sub> -spezifische freigesetzte Masse
$m_{CO_2, VK}$	gCO <sub>2</sub>	gesamte CO <sub>2</sub> -spezifische freigesetzte Masse des Versuchskörpers
$m_{CO_2, \overline{ZQ}}$	gCO <sub>2</sub>	gesamte CO <sub>2</sub> -spezifische freigesetzte Masse der Zündquelle
$m_{Ru\beta, ges}$	gRuß	gesamte Ruß-spezifische freigesetzte Masse
$m_{Ru\beta, VK}$	gRuß	gesamte Ruß-spezifische freigesetzte Masse des Versuchskörpers
$m_{Ru\beta, \overline{ZQ}}$	gRuß	gesamte Ruß-spezifische freigesetzte Masse der Zündquelle
$m''$	kg/m <sup>2</sup>	flächenspezifische Masse
$\dot{m}(t)$	kg/s	Massenabbrandrate (engl. Mass Loss Rate, MLR)
$\dot{m}_f(t)$	kg/s	brennstoffspezifischer Massenstrom
$\dot{m}_e(t)$	g/s	gesamter Stoffstrom der abgesaugten Luft
$\dot{m}_{ges}(t)$	kg/s	gesamte Massenabbrandrate
$\dot{m}_{max}(t)$	kg/s	maximale Massenabbrandrate
$\dot{m}_{VK}(t)$	kg/s	Massenabbrandrate des Versuchskörpers
$\dot{m}_{\overline{ZQ}}(t)$	kg/s	Massenabbrandrate der Zündquelle
$\dot{m}_{CO}^a(t)$	g/s	Stoffstrom des CO in der angesaugten Umgebungsluft
$\dot{m}_{CO}^e(t)$	g/s	Stoffstrom des CO in der abgesaugten Luft
$\dot{m}_{CO, ges}(t)$	g/s	gesamte CO-Freisetzungsrate
$\dot{m}_{CO, VK}(t)$	g/s	CO-Freisetzungsrate des Versuchskörpers
$\dot{m}_{CO, \overline{ZQ}}(t)$	g/s	CO-Freisetzungsrate der Zündquelle
$\dot{m}_{CO_2}^a(t)$	g/s	Stoffstrom des CO <sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft
$\dot{m}_{CO_2}^e(t)$	g/s	Stoffstrom des CO <sub>2</sub> in der abgesaugten Luft
$\dot{m}_{CO_2, ges}(t)$	g/s	gesamte CO <sub>2</sub> -Freisetzungsrate
$\dot{m}_{CO_2, VK}(t)$	g/s	CO <sub>2</sub> -Freisetzungsrate des Versuchskörpers
$\dot{m}_{CO_2, \overline{ZQ}}(t)$	g/s	CO <sub>2</sub> -Freisetzungsrate der Zündquelle
$\dot{m}_{Ru\beta, ges}(t)$	g/s	gesamte Rußfreisetzungsrate
$\dot{m}_{Ru\beta, VK}(t)$	g/s	Rußfreisetzungsrate des Versuchskörpers
$\dot{m}_{Ru\beta, \overline{ZQ}}(t)$	g/s	Rußfreisetzungsrate der Zündquelle
$\dot{m}_F'''$	kg/(m <sup>3</sup> s)	volumenspezifische Massenproduktionsrate des Brennstoffs
$\Delta m$	kg	Massenabbrand

$\Delta m_{VK,ges}$	kg	gesamter Massenabbrand des Versuchskörpers
$n$	-	Anzahl der Einzelversuche
$p_a$	Pa	Luftdruck (außen)
$p_U$	Pa	Druck der Umgebung
$\Delta p(t)$	Pa	Druckdifferenz
$q_R$	MJ/m <sup>2</sup>	gesamte rechnerische Brandbelastung
$q_{R,g}$	MJ/m <sup>2</sup>	rechnerische Brandbelastung geschützter Stoffe
$q_{R,u}$	MJ/m <sup>2</sup>	rechnerische Brandbelastung ungeschützter Stoffe
$\dot{q}_r''$	J/(m <sup>2</sup> s)	strahlungsbasierter flächenspezifischer Wärmestrom
$\dot{q}_r'''$	J/(m <sup>3</sup> s)	strahlungsbasierter volumenspezifischer Wärmestrom
$s$	-	stöchiometrischer Koeffizient des Oxidationsmittels
$t$	s	Zeit, gesamte Branddauer
$t_0$	s	Dauer der Zünd- und Schwelbrandphase
$v_i$	m/s	Komponente des Impulsvektors
$\vec{v}$	m/s	Geschwindigkeitsvektor
$\bar{x}$	[x]	arithmetischer Mittelwert von x
$\bar{\mathbf{x}}$	m	arithmetisch gemittelte Körpergröße
$x_{H_2O}^a$	-	Stoffmengenanteil des Wassers in der angesaugten Umgebungsluft
$x_{O_2}^a$	-	Stoffmengenanteil des O <sub>2</sub> in der Umgebungsluft einschließlich des Wasserdampfes
$x_{O_2}^a$	-	Stoffmengenanteil des O <sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft
$x_{CO_2}^a$	-	Stoffmengenanteil des CO <sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft
$x_{O_2}^e$	-	Stoffmengenanteil des O <sub>2</sub> in der abgasaugten Luft
$x_{CO}^e$	-	Stoffmengenanteil des CO in der abgasaugten Luft
$x_{CO_2}^e$	-	Stoffmengenanteil des CO <sub>2</sub> in der abgasaugten Luft
$\bar{x}_{O_2}^a$	-	arithmetisch gemittelter Stoffmengenanteil des O <sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft
$\bar{x}_{CO_2}^a$	-	arithmetisch gemittelter Stoffmengenanteil des CO <sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft

---

## Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	$\text{kW/s}^2$	raumnutzungsabhängiger Brandentwicklungsfaktor
$\alpha_{Ch}$	-	chemische Komponente
$\alpha_V$	-	volumenspezifischer Ausdehnungsfaktor
$\Delta$	m	Filter-Längenmaß
$\delta x, \delta y, \delta z$	m	Gitter-Längenmaß in x-Richtung, y-Richtung, und z-Richtung
$\vartheta$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$\vartheta_a$	$^{\circ}\text{C}$	Außentemperatur
$\vartheta_B$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur des Betons
$\vartheta_i$	$^{\circ}\text{C}$	Raumtemperatur
$\vartheta_{max}$	$^{\circ}\text{C}$	Maximaltemperatur
$\vartheta_U$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der Umgebung
$\kappa(x)$	1/m	Absorptionskoeffizient
$\lambda$	$\mu\text{m}$	Wellenlänge
$\lambda_B$	$\text{W}/(\text{m K})$	Wärmeleitfähigkeit des Betons
$\lambda_{SBI}$	$\mu\text{m}$	Wellenlänge der Lichtquelle
$\mu_t$	$\text{Pa s}$	dynamische Viskosität der Wirbel
$\pi$	-	Kreiszahl
$\phi$	-	Sauerstoffverbrauchs-Faktor
$\phi_T$	-	allgemeine Transportgröße
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Dichte
$\rho_B$	$\text{kg/m}^3$	Dichte des Betons
$\rho_f$	$\text{kg/m}^3$	brennstoffspezifische Dichte
$\rho_{Ru\beta}$	$\text{g/m}^3$	Dichte des Rußes
$\tau_{mix}$	second	mischungsbasierte Zeitskala
$\varphi_a$	%	relative Luftfeuchtigkeit (außen)
$\varphi_i$	%	relative Luftfeuchtigkeit (innen)
$\varphi_U$	%	relative Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft
$\chi_{VK}$	-	Verbrennungseffizienz, Verbrennungseffektivität
$\Omega_{Ru\beta}$	-	Extinktionskoeffizient des Rußes

## Dimensionslose Kennzahlen

Formelzeichen	Bedeutung
$Re$	Reynolds-Zahl

## Indizes

<b>Indize</b>	<b>Bedeutung</b>
<i>i</i>	1, 2, 3
<i>j</i>	1, 2, 3
<i>sgs</i>	Untergitter-Skalierung (engl. subgrid-scale, SGS)

## Stoffe

<b>Summenformel</b>	<b>Bedeutung</b>
<i>CO</i>	Kohlenstoffmonoxid
<i>CO<sub>2</sub></i>	Kohlenstoffdioxid
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Wasser
<i>HCN</i>	Cyanwasserstoff (Blausäure)
<i>O<sub>2</sub></i>	Sauerstoff

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BB	Berechnungsbaum
BE	Berechnungsebene
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BP	Berechnungspunkt
BZ	Brandszenario
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direkte Numerische Simulation
EDC	Eddy-Dissipation-Concept
EnEV	Energieeinsparverordnung
ETW	Einsatztoleranzwert
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FDS	Fire Dynamics Simulator
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
HRR	Heat Release Rate
ICD	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems
LES	Large Eddy Simulation

---

MB	Messbaum
ME	Messebene
MLR	Mass Loss Rate
MP	Messpunkt
MZ	Materialzusammensetzung
NIST	National Institute of Standards and Technologie
O.R.B.I.T	Entwicklung eines Systems zur Optimierten Rettung Brandbekämpfung mit Integrierter Technischer Hilfeleistung
VK	Versuchskörper
PUR	Polyurethane
PVC	Polyvinylchlorid
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes equations
RTE	Radiation Transport Equation
SAN	Styrol-Acrylnitril
SBI	Single Burning Item
SGS	Subgrid-Scale
SMV	Smokeview
THR	Total Heat Release
T.I.B.RO.	Taktisch-Strategisch Innovativer Brandschutz auf Grundlage Risikobasierter Optimierung
TTS	Testgelände Technische Sicherheit
VKF	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
WAP	Wandprüfstand
WHO	Weltgesundheitsorganisation
ZQ	Zündquelle

## Mathematische Operatoren

<b>Operatur</b>	<b>Bedeutung</b>
$\nabla$	Nabla-Operator: Divergenz des Vektorfeldes



# KAPITEL 1

---

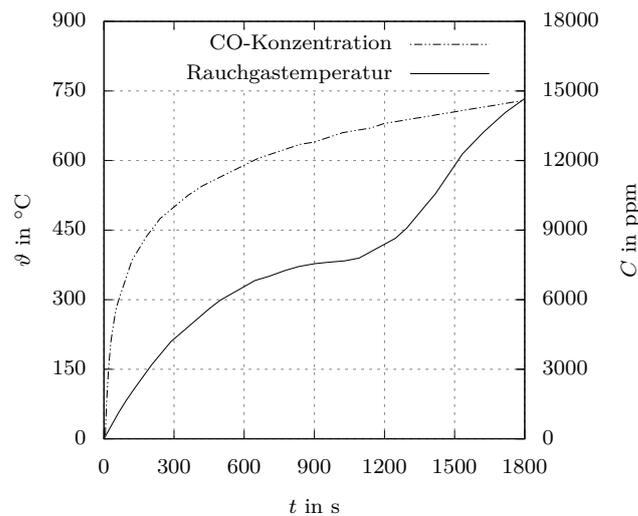
## Einleitung

### 1.1 Problembeschreibung

Zur Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten in der Bundesrepublik Deutschland wurden durch die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) im Jahr 1998 die Qualitätskriterien Hilfsfrist, Funktionsstärke und Erreichungsgrad [1] für ein standardisiertes Schadensereignis erarbeitet. Diese wurden im Jahr 2015 fortgeschrieben und um Einsatzmittel ergänzt. Das standardisierte Schadensereignis ist definiert als Wohnungsbrand im Obergeschoss eines mehrgeschossigen Gebäudes. Dabei wird sowohl ein Brandereignis in einer Wohnung als auch der Raucheintrag in Rettungswege angenommen. Als Ziele werden neben dem Verhindern einer weiteren Brandausbreitung auch die Rettung der in der Brandwohnung befindlichen Personen definiert.

Zur zeitlichen Quantifizierung der Hilfsfrist verweist die AGBF in ihrer Empfehlung aus dem Jahr 1998 auf die Definitionsstudie „Feuerwehrsystem - O.R.B.I.T.: Entwicklung eines Systems zur Optimierten Rettung Brandbekämpfung mit Integrierter Technischer Hilfeleistung“ (O.R.B.I.T.-Studie) [2, 3] aus dem Jahr 1978. Der in der genannten Definitionsstudie dargestellte Rauchgastemperaturverlauf für einen standardisierten Wohnungsbrand ist [4] entnommen und stellt Ergebnisse von Brandversuchen in einer Wohnung aus dem Jahr 1939 [5] dar (Abbildung 1.1). Die zur Untersuchung herangezogenen Einrichtungsgegenstände bestanden dabei überwiegend aus cellulosehaltigen Materialien wie Holz und Papier.

Im Vergleich zu dem in Abbildung 1.1 dargestellten Temperaturverlauf zeigen aktuellere Brandversuche in Wohnungen abweichende Temperaturverläufe. So wurden in den in [6–10] beschriebenen Brandversuchen (vgl. Kapitel 1.2) zum Teil höhere Rauchgastemperaturen erfasst. Gleichzeitig stellten sich die gemessenen Rauchgastemperaturen wesentlich früher ein als in dem in [5] beschriebenen Versuch. Die Untersuchungen wurden jedoch im Rahmen unterschiedlicher Untersuchungsziele und Fragestellungen durchgeführt und können nicht ohne Weiteres als allgemeine Grundlage für die Beschreibung repräsentativer Brandverläufe in Wohnungen herangezogen werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundvorhabens „T.I.B.R.O.: Taktisch-Strategisch Innovativer Brandschutz auf



**Abbildung 1.1:** In der O.R.B.I.T.-Studie [2, 3] publizierte zeitabhängige Rauchgastemperaturen eines Raumbrandes aus dem Jahr 1939 sowie die für die Bedarfsplanung von Feuerwehren herangezogene zeitabhängige CO-Konzentration.

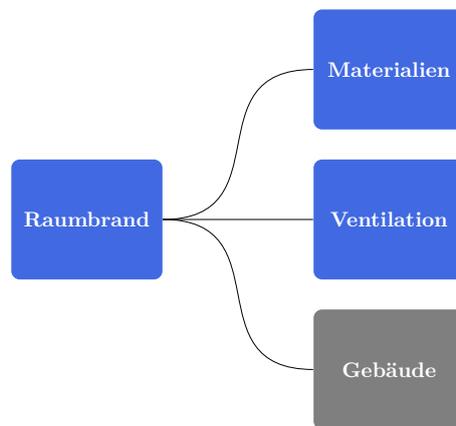
Grundlage Risikobasierter Optimierung“ (T.I.B.R.O.-Studie) [11] verschiedene Brand-szenarien untersucht. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden Untersuchungs-methodik und -ergebnisse hinsichtlich eines repräsentativen Brandszenarios für Wohnun-gen vorgestellt.

## 1.2 Stand der Forschung

Die experimentelle Untersuchung von Raumbränden ist aktueller Gegenstand der For-schung. Die in [6] beschriebenen und zu Beginn der 2000er-Jahre durchgeführten origi-nalmaßstäblichen Brandversuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, verschiedene Tech-nologien für Rauchwarnmelder zu untersuchen. Dazu wurden Brandszenarien in unter-schiedlichen Wohnungen betrachtet. Rauchgastemperaturen und Rauchgaskonzentratio-nen ( $O_2$ ,  $CO_2$  und  $CO$ ) wurden überwiegend im Bereich des ersten brennenden Einrich-tungsgegenstandes erfasst. Der Einfluss zeitabhängiger und ferngesteuerter Ventilations-öffnungen auf den Brandverlauf wurde im Jahr 2006 im Rahmen originalmaßstäblicher Brandversuche in identisch eingerichteten Wohnungen eines Hochhauses untersucht [7]. Neben Rauchgastemperaturen wurden vorrangig Daten zur Validierung numerischer Mo-delle erfasst. Der ebenfalls im Jahr 2006 durchgeführte und in [8] beschriebene origi-nalmaßstäbliche Brandversuch in einem Kinderzimmer diente neben der experimentellen Be-stimmung von Rauchgastemperaturen primär der Validierung numerischer Modelle. Der Einfluss von Brandbeschleunigern auf den Brandverlauf sowie Möglichkeiten des Nach-weises von Brandbeschleunigern wurde im Jahr 2012 im Rahmen originalmaßstäblicher

Brandversuche in einem Wohnzimmer untersucht [9]. Die in [10] beschriebenen originalmaßstäblichen Brandversuche in einer Wohnung aus dem Jahr 2012 dienten der experimentellen Untersuchung der Brandausbreitung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Ventilations- und Zündbedingungen.

Die theoretische Beschreibung und Modellierung von Raumbränden sowie der damit einhergehenden Effekte ist ebenfalls aktueller Gegenstand der Forschung [12–19]. Demnach ist der zeitliche Verlauf eines Raumbrandes in Wohnungen sowie die damit verbundene Stoff- und Energiefreisetzung neben den gebäude- und raumspezifischen Randbedingungen (bspw. Wärmedämmung) auch von den im Brandraum vorhandenen Materialien in Form von Einrichtungsgegenständen abhängig. Des Weiteren beeinflussen die gegebenen und sich während des Brandes einstellenden Ventilationsbedingungen den Brandverlauf (Abbildung 1.2).



**Abbildung 1.2:** Darstellung raumbrandspezifischer Einflussfaktoren sowie Gegenstand der Untersuchung (blau).

### 1.3 Untersuchungsziel

Die zunehmende Verwendung von Werkstoffen auf der Basis von Holz und Polymeren führt zu einer veränderten stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen in Wohnungen [20]. Ziel der Untersuchung war die Beschreibung des Einflusses dieser veränderten stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen auf den Verlauf von Raumbränden sowie auf die damit verbundene Stoff- und Energiefreisetzung. Darüber hinaus wurde der Einfluss von Ventilationsbedingungen untersucht. Die Untersuchungen beziehen sich sowohl zeitbezogen auf die Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase als auch ortsbezogen auf den Raum der Brandentstehung sowie einen angrenzenden Raum.

## 1.4 Methodische Vorgehensweise

Auf der Grundlage amtlicher Statistiken, erhobener Daten von Feuerwehren sowie versicherungsrelevanter Daten zu Brandschäden wurde ein repräsentatives Brandszenario für Wohnungen definiert (Kapitel 3). Dabei wurden sowohl die häufigsten Orte der Brandentstehung als auch die häufigsten Brandursachen bestimmt, die zu Todesopfern führen. Auf der Basis des repräsentativen Brandszenarios wurden sowohl kleinmaßstäbliche Brandversuche an Materialien als auch originalmaßstäbliche Brandversuche an einzelnen Einrichtungsgegenständen sowie möblierten Wohnzimmern durchgeführt.

Zur Quantifizierung abbrandspezifischer Parameter repräsentativer Materialien in älteren und gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen wurden die kleinmaßstäblichen Brandversuche sowohl in der Single Burning Item-Versuchsapparatur (SBI-Versuchsapparatur) als auch in weiteren modifizierten Versuchsständen durchgeführt (Kapitel 4). Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen wurden originalmaßstäbliche Brandversuche an einem Einrichtungsgegenstand (Sessel) mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung durchgeführt (Kapitel 5). Dabei wurde die Brandentstehung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen sowohl in einer Untersuchungsgeometrie als auch in der SBI-Versuchsapparatur untersucht. Des Weiteren wurden originalmaßstäbliche Brandversuche an einem möbliertem Wohnzimmer durchgeführt (Kapitel 6). In Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände sowie unterschiedlicher Ventilationsbedingungen wurde die Brandausbreitung sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einem angrenzenden Raum experimentell untersucht.

Auf der Grundlage der experimentellen Untersuchungen wurden abschließend numerische Untersuchungen durchgeführt (Kapitel 7). In Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen wurden Stoff- und Energiefreisetzungen während der Brandentstehungsphase sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einem angrenzenden Raum untersucht.

# KAPITEL 2

---

## Grundlagen

In dem folgenden Kapitel werden die Grundlagen für die experimentellen und numerischen Untersuchungen beschrieben. Die experimentelle Bestimmung der Wärmefreisetzungsraten (engl. Heat Release Rate, HRR) sowie der Stoffausbeuten erfolgte in der SBI-Versuchsapparatur. Ebenfalls wird die in allen experimentellen Untersuchungen verwendete Zündquelle erläutert. Abschließend erfolgt die Beschreibung des numerischen Verfahrens sowie das zur Anwendung herangezogene Programm.

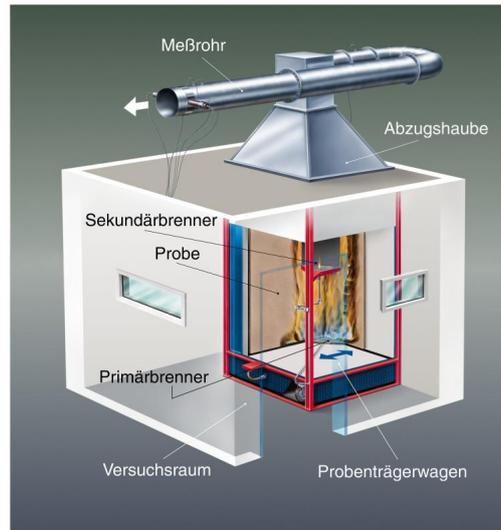
### 2.1 Experimentelle Grundlagen

#### 2.1.1 SBI-Versuchsapparatur

Die SBI-Versuchsapparatur ist nach [21] eine Apparatur, in der Untersuchungen zum Brandverhalten von Bauprodukten vollzogen werden (Abbildung 2.1). Dabei wird das zu untersuchende Bauprodukt, mit Ausnahme von Bodenbelägen, durch einen simulierten, einzelnen brennenden Gegenstand thermisch beansprucht. Die Untersuchungsergebnisse dienen im weiteren Verlauf zur Klassifizierung des Brandverhaltens des Bauproduktes nach [22].

Die SBI-Versuchsapparatur besteht aus einem Versuchsraum mit definierten Zu- und Abluftöffnungen, einem Probenträgerwagen, der in den Versuchsraum hinaus- und hineingeschoben werden kann und auf dem der Versuchskörper angebracht wird (Abbildung 2.2), einem Sekundärbrenner zur Kalibrierung, einem Primärbrenner zur thermischen Beanspruchung des Versuchskörpers sowie einer auf der Decke des Versuchsraumes angebrachten Abzugshaube, über die das sich im Versuchsraum einstellende Gasgemisch aus Zu- bzw. Umgebungsluft und Verbrennungsprodukten angesaugt und in das Abzugsrohr geleitet wird (Abbildung 2.3). Im Messabschnitt des Abzugsrohres befinden sich jeweils eine Druck- und Gasentnahmesonde, vier Thermoelemente sowie eine Lichtmessstrecke (Abbildung 2.4). Die lichten Innenmaße des Versuchsraumes betragen  $3,0\text{ m} \times 3,0\text{ m} \times 2,4\text{ m}$  (Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe).

Abweichend vom beschriebenen normativen Versuchsaufbau wurde zur experimentellen Bestimmung der HRR (vgl. Kapitel 2.1.2) sowie der Stoffausbeuten (vgl. Kapitel 2.1.3)



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung der SBI-Versuchsapparatur zur Quantifizierung abbrandspezifischer Parameter von Bauprodukten. Bild: Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen [23].

ein modifizierter Versuchsaufbau verwendet. Dabei wurde anstelle des Primär- und Sekundärbrenners eine für die Versuchsdurchführung definierte Zündquelle verwendet (vgl. Kapitel 2.1.4). Der auf dem Probenträgerwagen konzipierte Versuchsaufbau ist in Kapitel 4.2.3 genauer beschrieben.

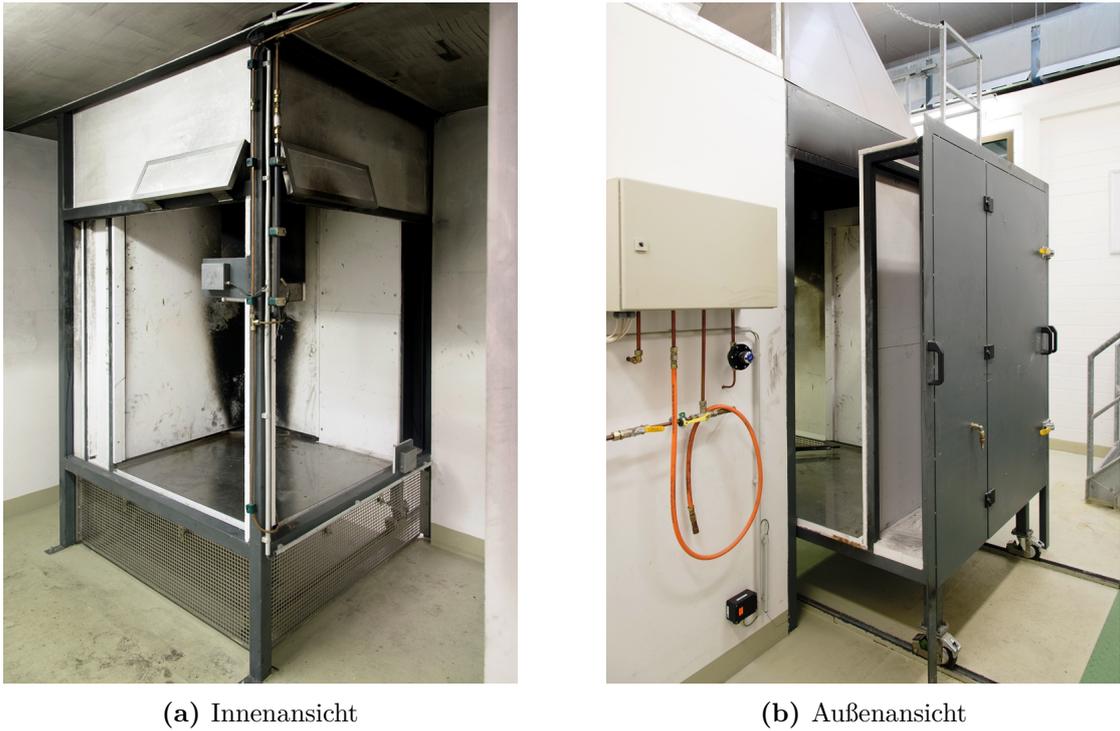
Die Konditionierung der Versuchskörper erfolgt nach dem Konditionierungsverfahren zur Untersuchung des Brandverhaltens von Bauprodukten nach [26] (Tabelle 2.1).

**Tabelle 2.1:** Klimabedingungen zur Konditionierung von Bauprodukten nach [26].

Größe	Wert
Lufttemperatur	$(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$
relative Luftfeuchtigkeit	$(50 \pm 5) \%$
Konditionierungsdauer	4 Wochen

### 2.1.2 HRR

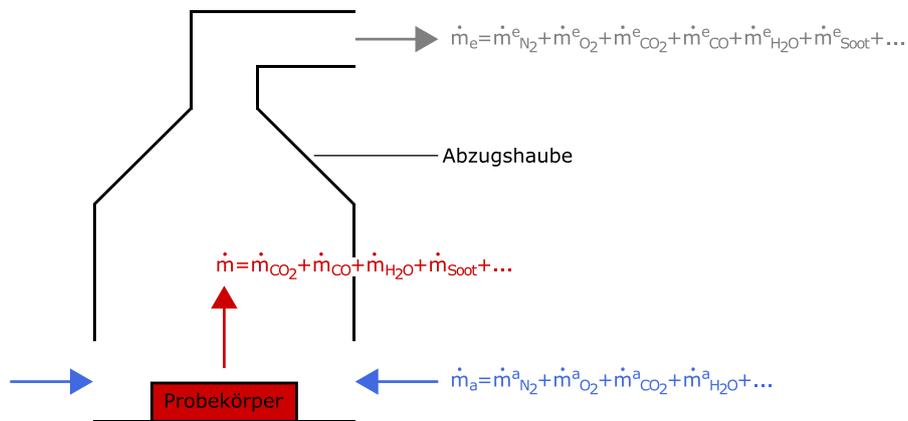
Zur Berechnung der HRR stehen zwei Verfahren zur Verfügung. Das erste Verfahren ist ein kalorimetrisches Verfahren (auch Sauerstoffverbrauchsmethode) und basiert auf der in [25] beschriebenen Massenbilanzgleichung für Versuchsaapparaturen wie der SBI-Versuchsapparatur. Es wurde in [27] eingeführt. Das zweite Verfahren berücksichtigt die



(a) Innenansicht

(b) Außenansicht

**Abbildung 2.2:** Anordnung des Probenträgerwagens in der SBI-Versuchsapparatur. Bild: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) [24].



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung der sich in der SBI-Versuchsapparatur bei der Verbrennung des Versuchskörpers einstellenden Stoffströme nach [25].

Massenabbrandrate (engl. Mass Loss Rate, MLR) des Versuchskörpers (auch Massenabbrandmethode).



**Abbildung 2.4:** Anordnung der Gaskonzentrationsmesstechnik im Messabschnitt des Abzugsrohres der SBI-Versuchsapparatur (Versuch 3). Bild: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) [24].

**Sauerstoffverbrauchsmethode** Die Berechnung der HRR unter Verwendung der Sauerstoffverbrauchsmethode ist für die SBI-Versuchsapparatur in [21] normativ geregelt und erfolgt nach Gleichung 2.1.

$$\dot{Q}(t) = E_C \cdot \dot{V}_{298}^e(t) \cdot x_{\text{O}}^a \cdot \left( \frac{\phi}{1 + 0,105 \cdot \phi} \right) \quad (2.1)$$

$E_C$  ist die Wärmefreisetzung je verbrauchtem Volumen  $\text{O}_2$  bei einer Temperatur von 298 K in  $\text{kJ}/\text{m}^3$ . Der Wert beträgt  $17\,200 \text{ kJ}/\text{m}^3$ .  $\dot{V}_{298}^e(t)$  ist der Volumenstrom der abgasaugten Luft im Messabschnitt, bezogen auf eine Temperatur von 298 K in  $\text{m}^3/\text{s}$ .  $x_{\text{O}}^a$  ist der Stoffmengenanteil des  $\text{O}_2$  in der angesaugten Umgebungsluft einschließlich des Wasserdampfes.  $\phi$  ist der Sauerstoffverbrauchs-Faktor.

Der Volumenstrom der abgasaugten Luft im Messabschnitt, bezogen auf eine Temperatur von 298 K, wird nach Gleichung 2.2 berechnet.

$$\dot{V}_{298}^e(t) = c \cdot A_R \cdot \frac{k_t}{k_\rho} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p(t)}{\bar{T}_{ms}(t)}} \quad (2.2)$$

$c$  ist eine Konstante und definiert als  $(2T_0/\rho_0)^{0,5}$  [28]. Der Wert beträgt  $22,4 \text{ K}^{0,5} \text{ m}^{1,5} \text{ kg}^{-0,5}$ .  $A_R$  ist die Querschnittsfläche des Abzugsrohres im Messabschnitt in  $\text{m}^2$ .  $k_t$  ist der Strömungsprofilfaktor (Bestimmungsverfahren siehe [21]).  $k_\rho$  ist der Korrekturfaktor der Reynolds-Zahl ( $Re$ ) für die Differenzdruck-Messsonde. Der Wert beträgt 1,08.  $\Delta p(t)$  ist die Druckdifferenz in Pa.  $\bar{T}_{ms}(t)$  ist die aus den drei Einzeltemperaturen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  arithmetisch gemittelte Temperatur im Messabschnitt in K.

Der Stoffmengenanteil des O<sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft einschließlich des Wasserdampfes wird nach Gleichung 2.3 berechnet.

$$x_O^a = \bar{x}_{O_2}^a \cdot \left[ 1 - \frac{H}{100 \cdot p_U} \cdot \exp \left\{ 23,2 - \frac{3816}{\bar{T}_{ms60} - 46} \right\} \right] \quad (2.3)$$

$\bar{x}_{O_2}^a$  ist der arithmetische Mittelwert des Stoffmengenanteils des O<sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft im Zeitintervall von 30 s bis 90 s nach Beginn der Untersuchung.  $H$  ist die relative Luftfeuchtigkeit in %.  $p_U$  ist der Umgebungsdruck in Pa.  $\bar{T}_{ms60}$  ist die aus den drei Einzeltemperaturen  $T_1$ ,  $T_2$  und  $T_3$  arithmetisch gemittelte Temperatur der abgesaugten Luft im Messabschnitt im Zeitintervall von 30 s bis 90 s nach Beginn der Untersuchung in K.

Der Sauerstoffverbrauchs-Faktor wird nach Gleichung 2.4 berechnet.

$$\phi = \frac{\bar{x}_{O_2}^a \cdot (1 - x_{CO_2}^e) - x_{O_2}^e \cdot (1 - \bar{x}_{CO_2}^a)}{\bar{x}_{O_2}^a \cdot (1 - x_{O_2}^e - x_{CO_2}^e)} \quad (2.4)$$

$x_{CO_2}^e$  ist der Stoffmengenanteil des CO<sub>2</sub> in der abgesaugten Luft im Messabschnitt.  $x_{O_2}^e$  ist der Stoffmengenanteil des O<sub>2</sub> in der abgesaugten Luft im Messabschnitt.  $\bar{x}_{CO_2}^a$  ist der arithmetische Mittelwert des Stoffmengenanteils des CO<sub>2</sub> in der angesaugten Umgebungsluft im Zeitintervall von 30 s bis 90 s nach Beginn der Untersuchung.

Zur Berechnung der HRR des Versuchskörpers muss die arithmetisch gemittelte HRR der Zündquelle von der gesamten im Versuch bestimmten HRR (entspricht Gleichung 2.1) subtrahiert werden. Die Berechnung erfolgt nach Gleichung 2.5.

$$\dot{Q}_{VK}(t) = \dot{Q}_{ges}(t) - \dot{Q}_{\bar{ZQ}}(t) \quad (2.5)$$

$\dot{Q}_{ges}(t)$  ist die gesamte HRR, bestehend aus der HRR des Versuchskörpers und der HRR der Zündquelle in kW.  $\dot{Q}_{\bar{ZQ}}(t)$  ist die arithmetisch gemittelte HRR der Zündquelle in kW.

Die arithmetisch gemittelte HRR der Zündquelle wird nach Gleichung 2.6 berechnet.

$$\dot{Q}_{\bar{ZQ}}(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{Q}_{ZQ_i}(t) \quad (2.6)$$

$n$  ist die Anzahl der Einzelversuche. Im vorliegenden Fall wurden insgesamt vier Einzelversuche ( $n = 4$ ) zur Bildung des arithmetischen Mittelwertes durchgeführt<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.23 zu entnehmen.

**Massenabbrandmethode** Die Berechnung der HRR unter Berücksichtigung der MLR erfolgt durch Gleichung 2.7 nach [27].

$$\dot{Q}_{VK}(t) = \dot{m}_{VK}(t) \cdot \Delta H_{c,eff\,VK} \quad (2.7)$$

$\dot{m}_{VK}(t)$  beschreibt die MLR (Massenstrom) des Versuchskörpers in kg/s und  $\Delta H_{c,eff\,VK}$  die effektive Verbrennungswärme des Versuchskörpers in MJ/kg.

Die MLR des Versuchskörpers wird nach Gleichung 2.8 berechnet.

$$\dot{m}_{VK}(t) = \dot{m}_{ges}(t) - \dot{m}_{\overline{ZQ}}(t) \quad (2.8)$$

$\dot{m}_{ges}(t)$  ist die gesamte MLR, bestehend aus der MLR des Versuchskörpers und der MLR der Zündquelle in kg/s.  $\dot{m}_{\overline{ZQ}}(t)$  ist die arithmetisch gemittelte MLR der Zündquelle in kg/s.

Die allgemeine Berechnung der MLR erfolgt durch Gleichung 2.9 nach [20], welche näherungsweise durch den Differenzenquotienten beschrieben wird.

$$\dot{m}(t) = \frac{dm}{dt} \approx \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_1 - m_0}{t_1 - t_0} \quad (2.9)$$

$\Delta m$  ist der Massenabbrand in kg und  $t$  die Zeit in s.

Die Berechnung der effektiven Verbrennungswärme erfolgt durch Gleichung 2.10 nach [27] und ist dort definiert als die Verbrennungswärme eines Stoffes, der unter Realbrandbedingungen unvollständig verbrennt.

$$\Delta H_{c,eff\,VK} = \Delta H_{c,net\,VK} \cdot \chi_{VK} \quad (2.10)$$

$\Delta H_{c,net\,VK}$  beschreibt den Heizwert des Versuchskörpers (früher unterer Heizwert  $H_u$ , [29–33]) in MJ/kg und  $\chi_{VK}$  die Verbrennungseffizienz (auch Verbrennungseffektivität) des Versuchskörpers.

Die Berechnung der effektiven Verbrennungswärme kann ebenfalls durch Gleichung 2.11 erfolgen.

$$\Delta H_{c,eff\,VK} = \frac{Q_{VK,ges}}{\Delta m_{VK,ges}} \quad (2.11)$$

$Q_{VK,ges}$  beschreibt die gesamte freigesetzte Wärme (engl. Total Heat Release, THR) des Versuchskörpers in MJ und  $\Delta m_{VK,ges}$  den gesamten Massenabbrand des Versuchskörpers in kg.

Die arithmetisch gemittelte MLR der Zündquelle wird nach Gleichung 2.12 berechnet.

$$\dot{m}_{\overline{ZQ}}(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ZQ_i}(t) \quad (2.12)$$

Im vorliegenden Fall werden insgesamt vier Einzelversuche ( $n = 4$ ) zur Bildung des arithmetischen Mittelwertes durchgeführt<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.12 zu entnehmen.

### 2.1.3 Stofffreisetzung und -ausbeute

**Kohlenstoffdioxid** Die  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates des Versuchskörpers wird nach Gleichung 2.13 berechnet.

$$\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{VK}}(t) = \dot{m}_{\text{CO}_2, \text{ges}}(t) - \dot{m}_{\text{CO}_2, \overline{\text{ZQ}}}(t) \quad (2.13)$$

$\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{ges}}(t)$  ist die gesamte  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates, bestehend aus der  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates des Versuchskörpers und der  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates der Zündquelle in g/s.  $\dot{m}_{\text{CO}_2, \overline{\text{ZQ}}}(t)$  ist die arithmetisch gemittelte  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates der Zündquelle in g/s.

Die Berechnung der Stofffreisetzungsrates des  $\text{CO}_2$  basiert ebenfalls auf der in [25] beschriebenen Massenbilanzgleichung für Versuchsaapparaturen wie der SBI-Versuchsaapparatur und wurde in [27] eingeführt. Sie wird allgemein nach Gleichung 2.14 berechnet.

$$\dot{m}_{\text{CO}_2, \text{ges}}(t) = \dot{m}_{\text{CO}_2}^e(t) - \dot{m}_{\text{CO}_2}^a(t) \quad (2.14)$$

$\dot{m}_{\text{CO}_2}^e(t)$  ist der Stoffstrom des  $\text{CO}_2$  in der abgasaugten Luft im Messabschnitt in g/s.  $\dot{m}_{\text{CO}_2}^a(t)$  ist der Stoffstrom des  $\text{CO}_2$  in der angesaugten Umgebungsluft in g/s.

Die Berechnung der Differenz aus dem Stoffstrom des  $\text{CO}_2$  in der abgasaugten Luft im Messabschnitt sowie dem Stoffstrom des  $\text{CO}_2$  in der angesaugten Umgebungsluft erfolgt nach Gleichung 2.15.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{CO}_2}^e(t) - \dot{m}_{\text{CO}_2}^a(t) = & \frac{x_{\text{CO}_2}^e \cdot (1 - x_{\text{O}_2}^a) - x_{\text{CO}_2}^a \cdot (1 - x_{\text{O}_2}^e - x_{\text{CO}}^e)}{1 - x_{\text{O}_2}^e - x_{\text{CO}_2}^e - x_{\text{CO}}^e} \\ & \cdot \frac{\dot{m}_e(t)}{1 + \phi \cdot (\alpha_V - 1)} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_a} \cdot (1 - x_{\text{H}_2\text{O}}^a) \end{aligned} \quad (2.15)$$

$x_{\text{O}_2}^a$  ist der Stoffmengenanteil des  $\text{O}_2$  in der angesaugten Umgebungsluft.  $x_{\text{CO}_2}^a$  ist der Stoffmengenanteil des  $\text{CO}_2$  in der angesaugten Umgebungsluft.  $x_{\text{CO}}^e$  ist der Stoffmengenanteil des  $\text{CO}$  in der abgasaugten Luft im Messabschnitt.  $\dot{m}_e(t)$  ist der gesamte Stoffstrom der abgasaugten Luft im Messabschnitt in g/s.  $\alpha_V$  ist der volumenspezifische Ausdehnungsfaktor. Er beträgt nach [27] 1,105.  $M_{\text{CO}_2}$  ist die molare Masse des  $\text{CO}_2$ . Sie beträgt 44,01 g/mol.  $M_a$  ist die molare Masse der angesaugten Umgebungsluft. Sie beträgt 28,95 g/mol.  $x_{\text{H}_2\text{O}}^a$  ist der Stoffmengenanteil des  $\text{H}_2\text{O}$  in der angesaugten Umgebungsluft.

Die arithmetisch gemittelte  $\text{CO}_2$ -Freisetzungsrates der Zündquelle wird nach Gleichung 2.16 berechnet.

$$\dot{m}_{\text{CO}_2, \overline{\text{ZQ}}}(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}_{\text{CO}_2, \text{ZQ}_i}(t) \quad (2.16)$$

Im vorliegenden Fall wurden insgesamt vier Einzelversuche ( $n = 4$ ) zur Bildung des arithmetischen Mittelwertes durchgeführt<sup>3</sup>.

<sup>3</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.28 zu entnehmen.

Die CO<sub>2</sub>-Ausbeute des Versuchskörpers wird nach [34] nach Gleichung 2.17 berechnet.

$$Y_{CO_2, VK} = \frac{m_{CO_2, VK}}{\Delta m_{VK, ges}} = \frac{m_{CO_2, ges} - m_{CO_2, \overline{ZQ}}}{\Delta m_{VK, ges}} \quad (2.17)$$

$m_{CO_2, ges}$  in gCO<sub>2</sub> ist die gesamte CO<sub>2</sub>-spezifische freigesetzte Masse, bestehend aus der gesamten CO<sub>2</sub>-spezifischen freigesetzten Masse des Versuchskörpers  $m_{CO_2, VK}$  in gCO<sub>2</sub> sowie der gesamten CO<sub>2</sub>-spezifischen freigesetzten Masse der Zündquelle  $m_{CO_2, \overline{ZQ}}$  in gCO<sub>2</sub>.

**Kohlenstoffmonoxid** Die CO-Freisetzungsrates des Versuchskörpers wird nach Gleichung 2.18 berechnet.

$$\dot{m}_{CO, VK}(t) = \dot{m}_{CO, ges}(t) - \dot{m}_{CO, \overline{ZQ}}(t) \quad (2.18)$$

$\dot{m}_{CO, ges}(t)$  ist die gesamte CO-Freisetzungsrates, bestehend aus der CO-Freisetzungsrates des Versuchskörpers und der CO-Freisetzungsrates der Zündquelle in g/s.  $\dot{m}_{CO, \overline{ZQ}}(t)$  ist die arithmetisch gemittelte CO-Freisetzungsrates der Zündquelle in g/s.

Die Berechnung der Stofffreisetzungsrates des CO basiert ebenfalls auf der in [25] beschriebenen Massenbilanzgleichung für Versuchsapparaturen wie der SBI-Versuchsapparatur und wird in [27] eingeführt. Sie wird allgemein nach Gleichung 2.19 berechnet.

$$\dot{m}_{CO, ges}(t) = \dot{m}_{CO}^e(t) - \dot{m}_{CO}^a(t) \quad (2.19)$$

$\dot{m}_{CO}^e(t)$  ist der Stoffstrom des CO in der abgesaugten Luft im Messabschnitt in g/s.  $\dot{m}_{CO}^a(t)$  ist die Stofffreisetzungsrates des CO in der angesaugten Umgebungsluft in g/s. Der Wert beträgt 0 g/s.

Die Berechnung des Stoffstroms des CO in der abgesaugten Luft im Messabschnitt erfolgt nach Gleichung 2.20.

$$\dot{m}_{CO}^e(t) = \frac{x_{CO}^e \cdot (1 - x_{O_2}^a - x_{CO_2}^a)}{1 - x_{O_2}^e - x_{CO_2}^e - x_{CO}^e} \cdot \frac{\dot{m}_e(t)}{1 + \phi \cdot (\alpha_V - 1)} \cdot \frac{M_{CO}}{M_a} \cdot (1 - x_{H_2O}^a) \quad (2.20)$$

$M_{CO}$  ist die molare Masse des CO. Sie beträgt 28,01 g/mol.

Die arithmetisch gemittelte CO-Freisetzungsrates der Zündquelle wird nach Gleichung 2.21 berechnet.

$$\dot{m}_{CO, \overline{ZQ}}(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}_{CO, ZQ_i}(t) \quad (2.21)$$

Im vorliegenden Fall wurden insgesamt vier Einzelversuche ( $n = 4$ ) zur Bildung des arithmetischen Mittelwertes durchgeführt<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.28 zu entnehmen.

Die CO-Ausbeute des Versuchskörpers wird nach [34] nach Gleichung 2.22 berechnet.

$$Y_{CO, VK} = \frac{m_{CO, VK}}{\Delta m_{VK, ges}} = \frac{m_{CO, ges} - m_{CO, \overline{ZQ}}}{\Delta m_{VK, ges}} \quad (2.22)$$

$m_{CO, ges}$  in  $g_{CO}$  ist die gesamte CO-spezifische freigesetzte Masse, bestehend aus der gesamten CO-spezifischen freigesetzten Masse des Versuchskörpers  $m_{CO, VK}$  in  $g_{CO}$  sowie der gesamten CO-spezifischen freigesetzten Masse der Zündquelle  $m_{CO, \overline{ZQ}}$  in  $g_{CO}$ .

**Ruß** Die Rußfreisetzungsrates des Versuchskörpers wird nach Gleichung 2.23 berechnet.

$$\dot{m}_{Ru\beta, VK}(t) = \dot{m}_{Ru\beta, ges}(t) - \dot{m}_{Ru\beta, \overline{ZQ}}(t) \quad (2.23)$$

$\dot{m}_{Ru\beta, ges}(t)$  ist die gesamte Rußfreisetzungsrates, bestehend aus der Rußfreisetzungsrates des Versuchskörpers und der Rußfreisetzungsrates der Zündquelle in  $g/s$ .  $\dot{m}_{Ru\beta, \overline{ZQ}}(t)$  ist die arithmetisch gemittelte Rußfreisetzungsrates der Zündquelle in  $g/s$ .

Die Berechnung der Stofffreisetzungsrates des Rußes basiert auf der in der Lichtmessstrecke des Messabschnittes der SBI-Versuchsapparatur gemessenen Extinktion (auch optische Dichte). Die Stofffreisetzungsrates wird allgemein nach [35] durch Gleichung 2.24 berechnet.

$$\dot{m}_{Ru\beta, ges}(t) = C_{Ru\beta}^e \cdot \dot{V}^e(t) \cdot \rho_{Ru\beta} \quad (2.24)$$

$C_{Ru\beta}^e$  ist die Volumenkonzentration des Rußes in der abgesaugten Luft im Messabschnitt.  $\dot{V}^e(t)$  ist der Volumenstrom der abgesaugten Luft im Messabschnitt in  $m^3/s$ .  $\rho_{Ru\beta}$  ist die Dichte des Rußes. Der Wert beträgt nach [35]  $1,1 \cdot 10^6 g/m^3$ .

Die Volumenkonzentration des Rußes wird nach [35] durch Gleichung 2.25 berechnet.

$$C_{Ru\beta}^e = \frac{D_{SBI} \cdot \lambda_{SBI} \cdot 10^{-6}}{\Omega_{Ru\beta}} \quad (2.25)$$

$D_{SBI}$  ist die optische Dichte der abgesaugten Luft im Messabschnitt in  $1/m$ .  $\lambda_{SBI}$  ist die Wellenlänge der Lichtquelle in der Lichtmessstrecke des Messabschnittes in  $\mu m$ . Der Wert beträgt nach [35]  $0,6328 \mu m$ .  $\Omega_{Ru\beta}$  ist der Extinktionskoeffizient des Rußes. Der Wert beträgt nach [35] 7.

Die optische Dichte wird nach [35] durch Gleichung 2.26 berechnet.

$$D_{SBI} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{l} \quad (2.26)$$

$(I_0/I)$  ist der Quotient aus austretender und einfallender Strahlung in der Lichtmessstrecke des Messabschnittes der SBI-Versuchsapparatur.  $l$  ist die Lichtmessstrecke im

Messabschnitt und entspricht dem Durchmesser des Abzugsrohres. Der Wert beträgt nach [21] 0,315 m.

Die arithmetisch gemittelte Rußfreisetzungsrates der Zündquelle wird nach Gleichung 2.27 berechnet.

$$\dot{m}_{Ru\beta, \overline{ZQ}}(t) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{m}_{Ru\beta, ZQ_i}(t) \quad (2.27)$$

Im vorliegenden Fall wurden insgesamt vier Einzelversuche ( $n = 4$ ) zur Bildung des arithmetischen Mittelwertes durchgeführt<sup>5</sup>.

Die Rußausbeute des Versuchskörpers wird nach [34] durch Gleichung 2.28 berechnet.

$$Y_{Ru\beta, VK} = \frac{m_{Ru\beta, VK}}{\Delta m_{VK, ges}} = \frac{m_{Ru\beta, ges} - m_{Ru\beta, \overline{ZQ}}}{\Delta m_{VK, ges}} \quad (2.28)$$

$m_{Ru\beta, ges}$  in  $g_{Ru\beta}$  ist die gesamte Ruß-spezifische freigesetzte Masse, bestehend aus der gesamten Ruß-spezifischen freigesetzten Masse des Versuchskörpers  $m_{Ru\beta, VK}$  in  $g_{Ru\beta}$  sowie der gesamten Ruß-spezifischen freigesetzten Masse der Zündquelle  $m_{Ru\beta, \overline{ZQ}}$  in  $g_{Ru\beta}$ .

#### 2.1.4 Zündquelle

Um eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu ermöglichen, wurden zur Durchführung aller Versuche identische Zündbedingungen wie Zündort und Zündquelle definiert.

Die Entzündung der in dieser Arbeit verwendeten Einrichtungsgegenstände und Materialien erfolgte in Anlehnung an das Prüfverfahren zur Bewertung der Entzündbarkeit von Polstermöbeln nach [36]. Gemäß Prüfverfahren wird ein Einrichtungsgegenstand aus Polyesterwerkstoffen einer Gasflamme, die als Zündquelle dient, ausgesetzt. Die Länge der Gasflamme von ca. 0,035 m ist vergleichbar mit der eines brennenden Streichholzes oder handelsüblichen Feuerzeuges (Abbildung 2.5). Das Verfahren zielt auf die Bestimmung der Entzündbarkeit der gesamten Werkstoffkombination und nicht auf die Entzündbarkeit einzelner Bestandteile ab.

Abweichend von dem genannten Prüfverfahren wurde als Zündquelle ein brennendes Papierkissen in Anlehnung an das Verfahren zur Untersuchung von Sitzen für Schienenfahrzeuge nach [37] sowie an das Verfahren zur Untersuchung des Brennverhaltens und der Brandnebenerscheinungen von Werkstoffen und Bauteilen in Schienenfahrzeugen nach [38] ausgewählt. Das dem Verfahren zugrunde gelegte Szenario ermöglicht neben der Berücksichtigung des Sitzes auch reale Umgebungsbedingungen, wie auf der Polsteroberfläche liegende Printmedien in Form von Papier. Dadurch wird gemäß [37]

---

<sup>5</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.28 zu entnehmen.



**Abbildung 2.5:** Normierte Gasflamme zur Untersuchung der Entzündbarkeit von Polstermöbeln.

das Brandverhalten innerhalb der Brandentstehungsphase ausreichend sicher beurteilt. Nachfolgend werden die Zündquellen Gasflamme und Papierkissen anhand ihrer HRR sowie ihrer THR verglichen.

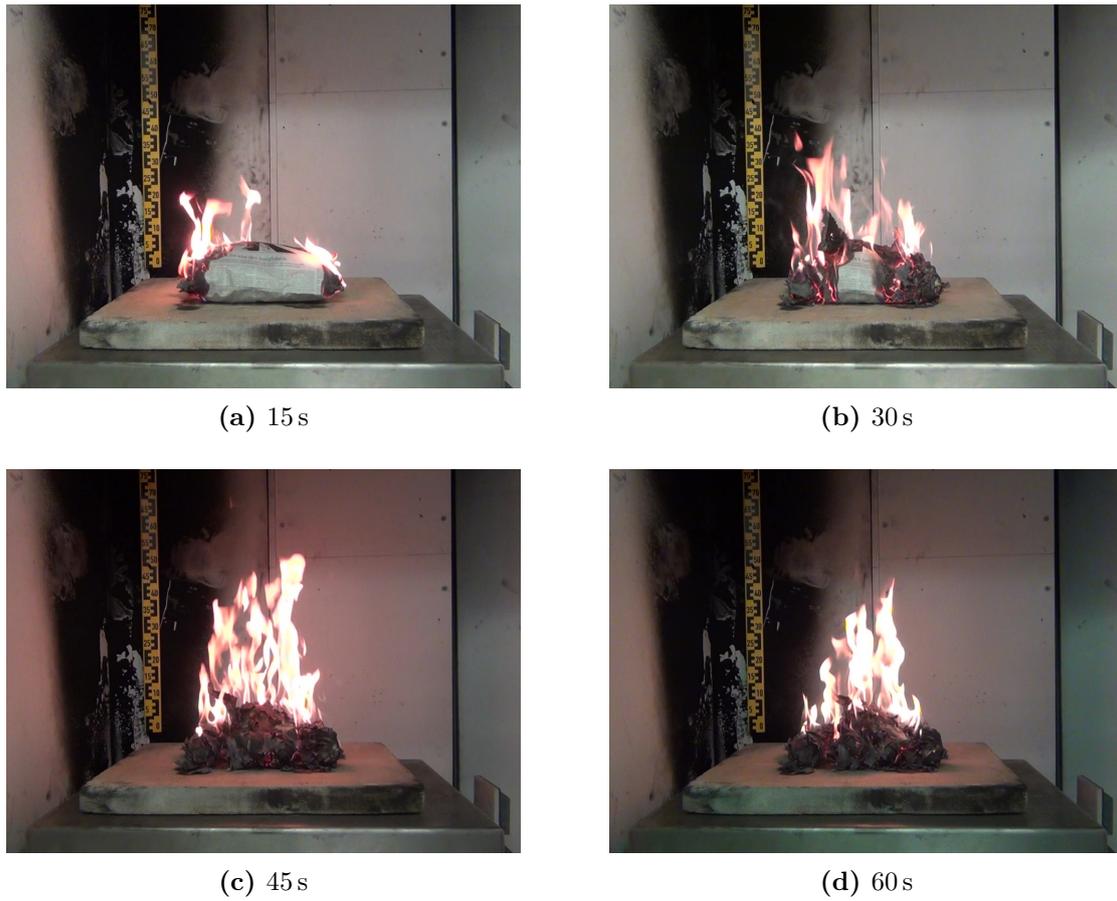
Die Berechnung der HRR sowie der THR der Gasflamme (Brennstoff, engl. fuel: *n*-Butan) erfolgte unter Anwendung der Massenabbrandmethode (vgl. Kapitel 2.1.2)<sup>6</sup>. Die Bestimmung der HRR des Papierkissens erfolgte in der SBI-Versuchsapparatur unter Anwendung der Sauerstoffverbrauchsmethode (vgl. Kapitel 2.1.2).

Die Entzündung der Papierkissen erfolgte mithilfe eines handelsüblichen Feuerzeuges. Binnen einer Zeitdauer von 10 s wurden die Ecken des Papierkissens entzündet. Die am Feuerzeug zuvor eingestellte Flammenlänge betrug ca. 0,025 m. Die maximale Flammenlänge betrug nach 45 s ca. 0,65 m (Abbildung 2.6).

Der Vergleich der HRR und der THR zwischen den Zündquellen Gasflamme und Papierkissen (Abbildung 2.7, Tabelle 2.2) zeigt, dass das Papierkissen mit Bezug auf die maximale HRR und der THR das Szenario der Entzündung des Sessels durch eine Streichholz- oder Feuerzeugflamme sowie Rauch- und Tabakwaren (entspricht der häufigsten Ursache von Bränden mit Todesfolge in Wohngebäuden, vgl. Kapitel 3.4) abdeckt<sup>7</sup>. Darüber hinaus berücksichtigt es im Vergleich zu der Gasflamme auch mögliche schnellere Brandentwicklungsgeschwindigkeiten an der Polsteroberfläche, die durch die Entzündung von in Wohnbereichen typischen Gebrauchsgegenständen wie Printmedien auftreten können. Vorversuche haben bestätigt, dass die direkte Beanspruchung der Polsteroberfläche des verwendeten Sessels durch eine streichholzähnliche Flamme längere Brandentwicklungszeiten zur Folge hat.

<sup>6</sup>Die Berechnung ist dem Anhang A.1 zu entnehmen.

<sup>7</sup>Die HRR sowie die THR der Einzelversuche mit den daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerten sind dem Anhang C, Abbildung C.23 zu entnehmen.

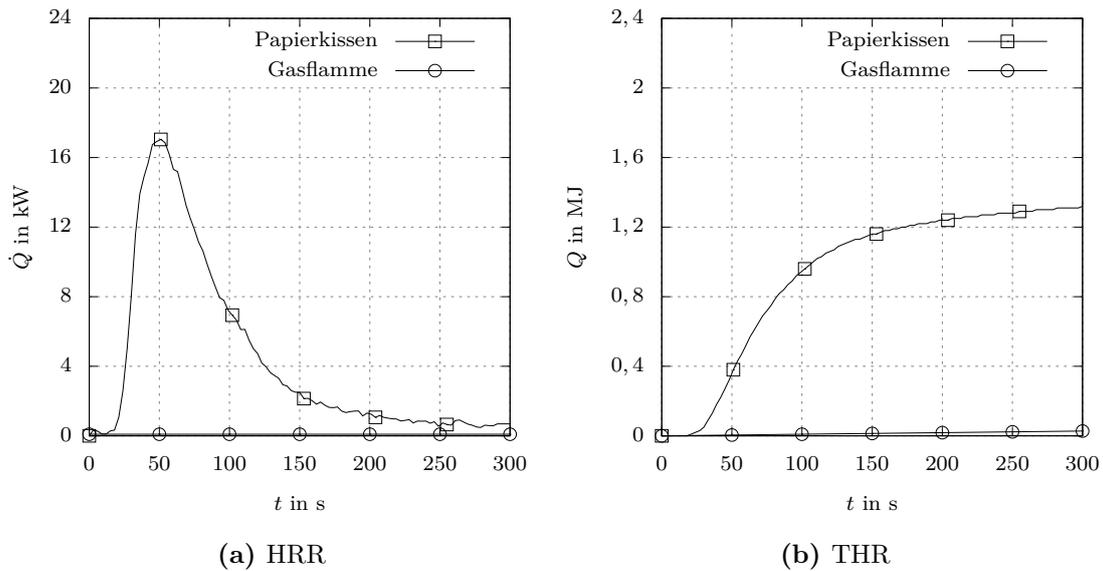


**Abbildung 2.6:** Brandentwicklung eines Papierkissens nach der Zündung in Abhängigkeit von der Zeit.

**Tabelle 2.2:** Vergleich der in einem Zeitraum von 300 s arithmetisch gemittelten HRR sowie der THR der Zündquellen Gasflamme und Papierkissen.

Zündquelle	HRR	THR
-	$\dot{Q}$ in kW	$Q$ in MJ
Gasflamme	0,093	0,028
Papierkissen	4,387	1,317

Die Herstellung der Papierkissen erfolgte in Anlehnung an die zuvor genannten Normen. Sie wurden zur Gewährleistung realitätsnaher Zündbedingungen aus bedrucktem, handelsüblichem Papier einer Tageszeitung hergestellt. Die zur Herstellung verwendeten Papierseiten wiesen mit den Abmaßen von 0,57 m × 0,4 m (Länge × Breite) und einer durchschnittlichen Masse von 0,009 58 kg eine durchschnittliche flächenspezifische Masse von 0,042 kg/m<sup>2</sup> auf. Dies entspricht annähernd der in der Norm vorgeschriebenen



**Abbildung 2.7:** Vergleich (a) der arithmetisch gemittelten HRR des Papierkissens mit der berechneten HRR der Gasflamme und (b) der arithmetisch gemittelten THR des Papierkissens mit der berechneten THR der Gasflamme.

flächenspezifische Masse von  $(0,0500 \pm 0,0025) \text{ kg/m}^2$ . Mit Bezug auf die Gesamtmasse des Papierkissens von 0,1 kg und der damit verbundenen HRR ist der Einfluss dieser Abweichung von  $0,0055 \text{ kg/m}^2$  vernachlässigbar.

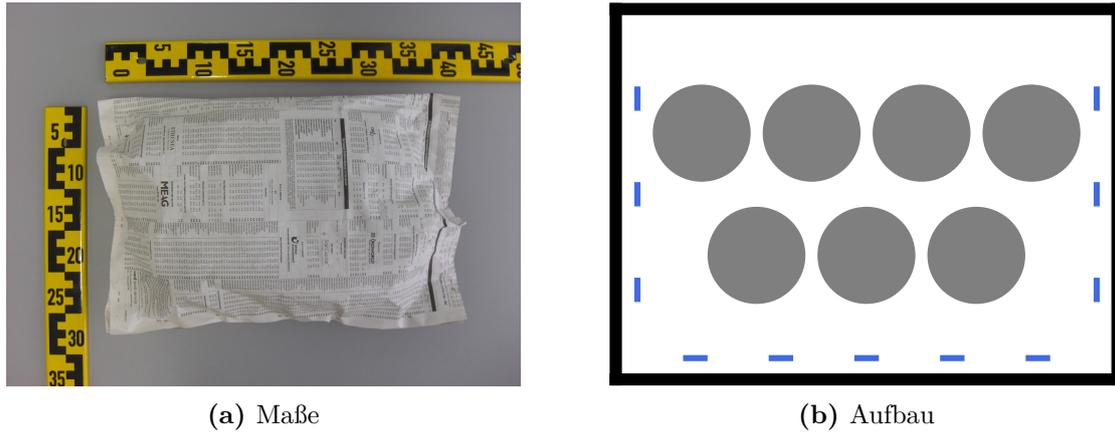
Jedes Papierkissen bestand aus bis zu acht einzelnen Papierseiten. Die erste Papierseite diente als Hülle, die quer zu Längsrichtung mittig gefaltet war. Die übrigen, bis zu sieben, Papierseiten wurden zu einzelnen Kugeln mit einem Durchmesser von ca. 0,08 m geformt. Die siebente Papierkugel wurde so dimensioniert, dass jedes Papierkissen in einem genormten Klima eine Masse von 0,1 kg besaß. Das Verschließen der Hülle erfolgte durch drei gleich verteilte Heftklammern jeweils an den Außenseiten sowie durch fünf gleich verteilte Heftklammern an der Unterseite in einem Abstand von ca. 0,01 m zum jeweiligen Rand (Abbildung 2.8). Die Höhe des Papierkissens betrug ca. 0,1 m.

Die Konditionierung der Papierkissen erfolgte nach dem Konditionierungsverfahren zur Untersuchungen des Brandverhaltens von Bauprodukten nach [26] (Tabelle 2.1).

## 2.2 Numerische Grundlagen

### 2.2.1 Bilanzgleichungen

Zur mathematischen Beschreibung von Strömungen werden Bilanzgleichungen herangezogen [39]. Sie können sowohl in Integralform für ein endliches Kontrollvolumen  $V$



**Abbildung 2.8:** Hergestelltes Papierkissen zur Verwendung als Zündquelle.

als auch in Differentialform für ein infinitesimal kleines Volumenelement  $dV$  angegeben werden und sind ineinander überführbar [40].

Gleichung 2.29 repräsentiert die allgemeine Bilanz einer spezifischen Zustandsgröße für ein infinitesimal kleines Volumenelement  $dV$  in Differentialform nach [41].

$$\frac{\partial(\rho \cdot a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot a \cdot \vec{v}) = A_E + A_Q \quad (2.29)$$

$\rho$  ist die Dichte in  $\text{kg}/\text{m}^3$ .  $a$  ist die spezifische Form der Zustandsgröße  $A$  in  $\text{A}/\text{kg}$ .  $\nabla$  ist die Divergenz des Vektorfeldes.  $\vec{v}$  ist der Geschwindigkeitsvektor in  $\text{m}/\text{s}$ .  $A_E$  ist die volumenspezifische Rate der durch externe Einflüsse bewirkten Veränderung von  $A$  in  $\text{A}/(\text{m}^3 \text{s})$ .  $A_Q$  ist die volumenspezifische Rate der Erzeugung oder Vernichtung von  $A$  in  $\text{A}/(\text{m}^3 \text{s})$ .

Aus der allgemeinen Bilanzgleichung können entsprechende Erhaltungsgleichungen für die Erhaltungsgrößen Masse, Impuls und Energie abgeleitet werden. Die Beschreibung reaktiver Strömungen erfolgt additiv durch die Bilanz der einzelnen Partialmassen [41].

Massen-Erhaltungsgleichung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (2.30)$$

Impuls-Erhaltungsgleichung:

$$\frac{\partial(\rho \cdot v_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v_i \cdot \vec{v}) = (m \cdot v_i)_E \quad (2.31)$$

Energie-Erhaltungsgleichung:

$$\frac{\partial(\rho \cdot E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot E \cdot \vec{v}) = E_E \quad (2.32)$$

Partialmassen-Bilanzgleichung:

$$\frac{\partial (\rho \cdot c_{\alpha_{Ch}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot c_{\alpha_{Ch}} \cdot \vec{v}) = m_{\alpha_{Ch}E} + m_{\alpha_{Ch}Q} \quad (2.33)$$

$v_i$  ist Komponente des Impulsvektors  $m \cdot \vec{v}$  mit  $i = 1, 2, 3$  in m/s.  $E$  ist die Gesamtenergie in J.  $c_{\alpha_{Ch}}$  ist die Konzentration der Komponente  $\alpha_{Ch}$  in kg/kg.  $m_{\alpha_{Ch}}$  ist die Masse der Komponente  $\alpha_{Ch}$  in kg.

### 2.2.2 Numerisches Verfahren

Die in Kapitel 2.2.1 dargestellten Bilanzgleichungen entsprechen partiellen Differentialgleichungen und können nur in einigen Spezialfällen analytisch gelöst werden [39]. Aus diesem Grund werden numerische Verfahren zur Lösung dieser partiellen Differentialgleichungen herangezogen. Dabei werden die partiellen Differentialgleichungen zunächst durch algebraische Näherungsgleichungen approximiert, wodurch dann Näherungslösungen für diskrete Punkte im Rechengebiet (auch Numerisches Gitter) berechnet werden können [42]. Die Untersuchung von Strömungen durch diese Methode ist auch als numerische Strömungsmechanik (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) bekannt.

Die Approximation der partiellen Differentialgleichungen durch algebraische Näherungsgleichungen erfolgt im Rahmen der Finite-Differenzen-Methode (FDM) durch die Umwandlung der partiellen Ableitungen (Differentialiale) in endliche Differenzen. Dieser Vorgang wird auch Diskretisierung genannt. Neben der FDM existieren die Finite-Volumen-Methode (FVM) sowie die Finite-Elemente-Methode (FEM) [40].

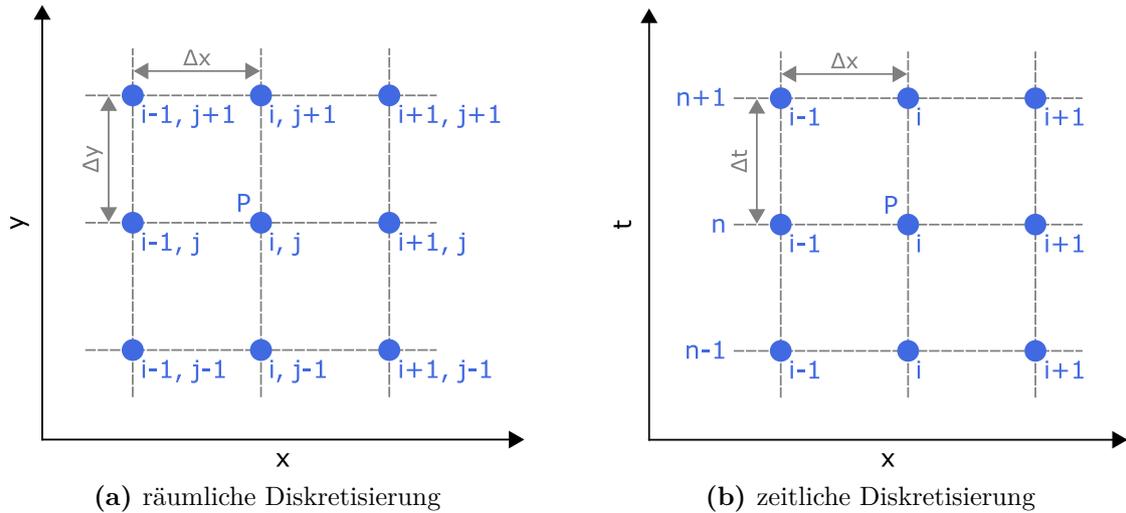
Das im Rahmen dieser Arbeit (vgl. Kapitel 7) verwendete und maßgeblich vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelte Programm *Fire Dynamics Simulator (FDS)*<sup>8</sup> verwendet die FDM zur räumlichen und zeitlichen Diskretisierung (Abbildung 2.9). Das Rechengebiet wird dabei durch ein strukturiertes orthogonales Gitter beschrieben, in dem die Gitterlinien parallel zu den Achsen des gewählten Koordinatensystems verlaufen. Die diskreten Punkte liegen auf den Kreuzungen dieser Gitterlinien.

Die Lösungsfunktion wird an einem diskreten Punkt des Rechengebietes über ein Intervall in eine Taylor-Reihe überführt und berechnet. Das Intervall entspricht dabei dem Abstand zu einem der nächsten diskreten Punkte. Die Taylor-Reihe wird nach einer definierten Anzahl von Reihengliedern abgebrochen. Die Genauigkeit der Diskretisierung wird dabei durch die zu definierende Anzahl der Reihenglieder bestimmt [39]. Gleichung 2.34 beschreibt nach [42] die Grundidee einer Finiten-Differenzen-Approximation.

$$\left( \frac{\partial \phi_T}{\partial x} \right)_{x_i} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\phi_T \cdot (x_i + \Delta x) - \phi_T \cdot (x_i)}{\Delta x} \quad (2.34)$$

Dabei repräsentiert  $\phi_T$  eine allgemeine Transportgröße.

<sup>8</sup>*Fire Dynamics Simulator (FDS)*, Version 6.6.0 vom 1. November 2017 [43–46].



**Abbildung 2.9:** Exemplarische Darstellung einer (a) räumlichen und (b) zeitlichen Diskretisierung nach [40].

*FDS* nutzt zur zeitlichen Diskretisierung ein explizites Verfahren zweiter Ordnung nach dem in [43] beschriebenen Prädiktor-Korrektor-Verfahren. Das von *FDS* verwendete Verfahren zur räumlichen Diskretisierung ist ebenfalls ein Verfahren zweiter Ordnung [43]. Gleichung 2.35 beschreibt die partielle Ableitung in Form der zentralen Differenz zweiter Ordnung in einem diskreten Punkt nach [40].

$$\left(\frac{\partial \phi_T}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{\phi_{T_{i+1,j}} - \phi_{T_{i-1,j}}}{2 \cdot \Delta x} + O \cdot (\Delta x)^2 \quad (2.35)$$

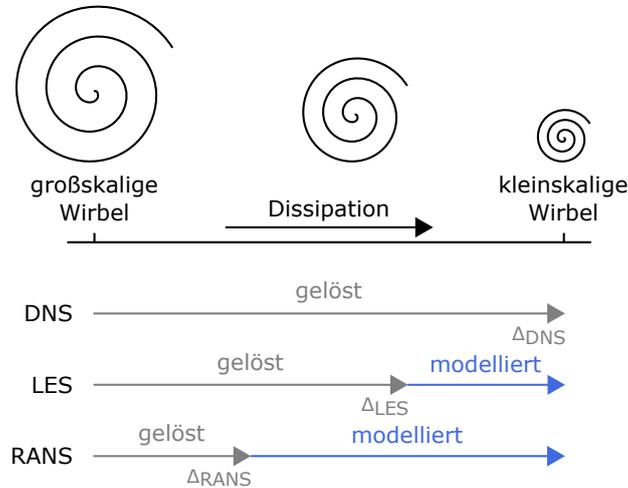
$O \cdot (\Delta x)^2$  ist der Abbruchfehlerterm zweiter Ordnung.

### 2.2.3 Turbulenz

Grundsätzlich können Strömungen in laminarer und turbulenter Form auftreten [39]. Im Unterschied zu laminaren Strömungen sind turbulente Strömungen durch eine deutlich erhöhte Diffusivität, Viskosität und Wärmeleitung gekennzeichnet [47].

Zur numerischen Berechnung turbulenter Strömungen ist die Lösung der beschriebenen Bilanzgleichungen erforderlich. Dazu werden verschiedene Ansätze verfolgt, die einem unterschiedlich hohen Modellierungsgrad unterliegen (Abbildung 2.10). Die Ansätze lassen sich mit zunehmendem Modellierungsgrad allgemein in Direkte Numerische Simulation (engl. Direct Numerical Simulation, DNS), in Grobstruktursimulation (engl. Large Eddy Simulation, LES) sowie in das Lösen der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (engl. Reynolds-Averaged-Navier-Stokes equations, RANS)

unterscheiden [48]. Die durch eine Energiezufuhr entstandenen großskaligen Wirbel werden dabei durch Dissipationsprozesse zu kleinskaligen Wirbeln abgebaut. Die kinetische Energie des Fluids wird dabei unumkehrbar in innere Energie umgewandelt [42].



**Abbildung 2.10:** Gegenüberstellung von Turbulenzskalen und Ansätze zur numerischen Berechnung turbulenter Strömungen.

Das Programm *FDS* verwendet standardmäßig die LES zur Berechnung turbulenter Strömungen. Dabei werden großskalige Wirbel vollständig berechnet. Kleinskalige Wirbel, die durch die gewählte Gittergröße nicht aufgelöst und somit nicht direkt berechnet werden können, werden auf einem Untergitter (engl. Subgrid) modelliert und berechnet. Die dynamische Viskosität kleinskaliger Wirbel wird im *FDS* standardmäßig mit einer Variation des Deardorff-Modells nach Gleichung 2.36 berechnet [43, 49].

$$\mu_t = \rho \cdot C_\nu \cdot \Delta \cdot \sqrt{k_{sgs}} \quad (2.36)$$

$\mu_t$  ist die dynamische Viskosität der Wirbel (auch Wirbelviskosität oder turbulente Viskosität, engl. Eddy Viscosity oder Turbulent Viscosity) in Pa·s.  $C_\nu$  ist eine Modellkonstante. Der Wert beträgt nach [50] 0,1.  $\Delta$  ist das Filterlängenmaß in m und wird berechnet mit  $\Delta = (\delta x \delta y \delta z)^{\frac{1}{3}}$ .  $k_{sgs}$  ist die kinetische Energie in  $\text{m}^2/\text{s}^2$ . Dabei steht *sgs* für den Begriff Untergitter-Skalierung (engl. subgrid-scale, SGS).

## 2.2.4 Verbrennung

Die Modellierung und numerische Berechnung von Verbrennungsprozessen basiert nach [47] auf einer irreversiblen Bruttoreaktion (auch Globalreaktion) und wird nach [15] durch Gleichung 2.37 beschrieben.



Dabei können Brennstoff und Oxidationsmittel (z. B. in der Luft enthaltener  $O_2$ ) sowohl in vorgemischter als auch in nicht vorgemischter Form vorliegen. Der Verbrennungsprozess kann für beide zuvor genannten Fälle sowohl turbulent als auch laminar erfolgen [51]. Weiterführende theoretische Grundlagen von Verbrennungsprozessen sind der Literatur, beispielsweise [52], zu entnehmen.

Im *FDS* werden turbulente Verbrennungsprozesse als Einschrittreaktion in der Gasphase nach Gleichung 2.37 modelliert und berechnet [43]. Dabei basiert die Verbrennungsmodellierung auf der Annahme, dass Brennstoff und Oxidationsmittel nur in gemischter oder in ungemischter Form vorliegen. Für den ersten genannten Fall ist das Mischungsverhältnis dafür ausschlaggebend, ob eine Verbrennung stattfindet. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Verbrennung wird dabei als infinit hoch betrachtet. Diese Betrachtungsart der turbulenten Verbrennung wird auch als Mixing-Controlled Fast Chemistry (engl.) bezeichnet und ist der im *FDS* verwendete Standard.

Die Modellierung der Mixing-Controlled Fast Chemistry erfolgt auf dem Untergitter durch Verwendung des Wirbelzerfallsmodells (engl. Eddy-Dissipation-Concept, EDC) nach [53]. Dabei hängt die Reaktionsrate allein von der Geschwindigkeit der Durchmischung des Brennstoffs mit dem Oxidationsmittel ab [39, 42, 47]. Gleichung 2.38 zeigt die im EDC verwendete Gleichung zur Beschreibung des brennstoffspezifischen Quellterms nach [43].

$$\dot{m}_F''' = -\rho \cdot \frac{\min\left(Z_F, \frac{Z_A}{s}\right)}{\tau_{mix}} \quad (2.38)$$

$\dot{m}_F'''$  ist die volumenspezifische Massenproduktionsrate des Brennstoffs in  $\text{kg}/(\text{m}^3 \text{s})$ .  $Z_F$  ist der Massenanteil des Brennstoffs.  $Z_A$  ist der Massenanteil der Luft.  $s$  ist der massenspezifische stöchiometrische Koeffizient (auch Stöchiometriezahl oder Stöchiometriefaktor) des Oxidationsmittels.  $\tau_{mix}$  ist eine für die Mischung modellierte Zeitskala in s.

### 2.2.5 Strahlung

Wärmeübertragungsprozesse finden in Form von Wärmeleitung (auch Konduktion), Konvektion und Wärmeübertragung durch Strahlung statt. Während die Wärmeübertragungsprozesse der Wärmeleitung und der Konvektion auf der Wechselwirkung benachbarter Moleküle basieren, ist die Wärmeübertragung durch Strahlung das Ergebnis der Wirkung von elektromagnetischen Feldern auf Moleküle. Elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von

$$0,1 \mu\text{m} < \lambda < 1000 \mu\text{m} \quad (2.39)$$

weisen dabei die höchsten Energiedichten auf (Gleichung 2.39) [54].

Wärmeübertragung durch Strahlung macht nach [55] einen signifikanten Anteil der bei Bränden übertragenen Wärmeenergie aus. Die bei einem Brand dominierenden Strahlungsquellen sind nach [56] sowohl die bei den Verbrennungsprozessen entstehenden Flammen als auch die sich einstellende Heißgasschicht in Räumen. Dabei beeinflussen die bei Verbrennungsprozessen entstehenden Produkte (Gleichung 2.37) in Form von Gasen und Rußpartikeln das Absorptions- und Emissionsverhalten [55].

Neben der Verbrennung wird auch die Wärmeübertragung durch Strahlung als Teil der Energiebilanz (Gleichung 2.32) auf dem Untergitter modelliert. Die im *FDS* verwendete Strahlungstransportgleichung (engl. Radiation Transport Equation, RTE) wird mittels FVM gelöst. Gleichung 2.40 beschreibt die Wärmeübertragung durch Strahlung nach [43].

$$\dot{q}_r''' \equiv -\nabla \cdot \dot{q}_r''(x) = \kappa(x) \cdot [U(x) - 4 \cdot \pi \cdot I_b(x)] \quad (2.40)$$

$\dot{q}_r'''$  ist der strahlungsbasierte volumenspezifische Wärmestrom (auch Wärmefluss) in  $\text{J}/(\text{m}^3 \text{s})$ .  $\dot{q}_r''$  ist der strahlungsbasierte flächenspezifische Wärmestrom in  $\text{J}/(\text{m}^2 \text{s})$ .  $\kappa(x)$  ist der Absorptionskoeffizient in  $1/\text{m}$ .  $U(x)$  ist die gesamte über ein Gebiet  $G$  integrierte Strahlungsintensität in  $\text{W}$ . Sie wird nach Gleichung 2.41 berechnet.  $I_b(x)$  ist die Strahlungsintensität eines schwarzen Körpers in  $\text{W}/\text{sr}$ .

$$U(x) = \int_G I(x, s') \cdot ds' \quad (2.41)$$

Standardmäßig werden im *FDS* zur Lösung der Strahlungstransportgleichung 100 diskrete Raumwinkel verwendet [43].

### 2.2.6 Fehlerbetrachtung

Die numerische Modellierung und Berechnung reaktiver Strömungen ist fehlerbehaftet. Die Ergebnisse stellen keine exakten Lösungen dar, sondern sind als Näherungslösungen zu betrachten [39, 42]. In der genannten Literatur wird zwischen Modell-, Diskretisierungs- und Iterationsfehlern (auch Abbruchfehler) unterschieden.

Modellfehler beschreiben die Differenz zwischen den realen Werten einer Zielgröße (tatsächliche Strömung) sowie der genauen Lösung der verwendeten Modellgleichungen. Diskretisierungsfehler beschreiben die Differenz zwischen den genauen Lösungen der Erhaltungsgleichungen sowie den genauen Lösungen der algebraischen Gleichungssysteme, die durch die Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen entstanden sind. Iterationsfehler beschreiben die Differenz zwischen den genauen Lösungen der algebraischen Gleichungssysteme, die durch die Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen entstanden sind sowie den iterativen Lösungen dieser Gleichungssysteme.



# KAPITEL 3

---

## Ermittlung eines repräsentativen Brandszenarios

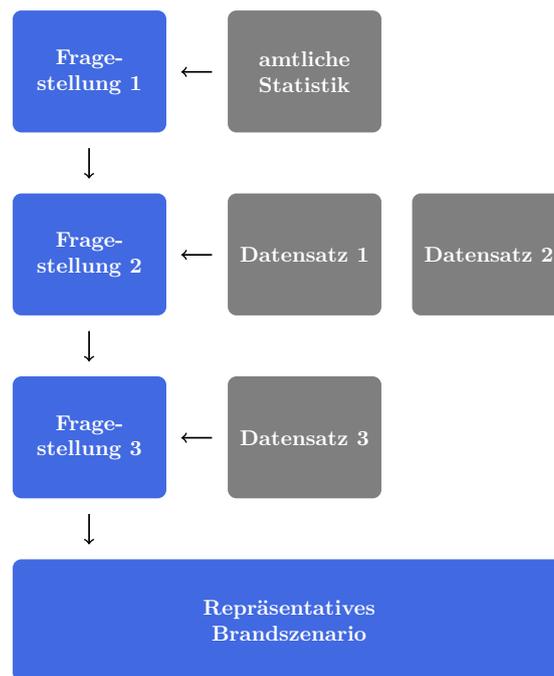
Auf der Grundlage amtlicher Statistiken, erhobener Daten von Feuerwehren sowie versicherungsrelevanter Daten zu Brandschäden wurde ein repräsentatives Brandszenario für Wohnungen definiert. Dazu wurden sowohl die häufigsten Orte der Brandentstehung als auch die häufigsten Brandursachen ermittelt, die zu Todesopfern führen.

### 3.1 Untersuchungsziel

Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung ist die Ermittlung eines repräsentativen Brandszenarios als Grundlage für die experimentelle und numerische Untersuchung der Brandentstehung und Brandausbreitung in Wohnungen. Dazu wurde untersucht, bei welcher Gebäudenutzung Brände die höchste Anzahl an Todesopfern in der Bundesrepublik Deutschland (BRD) verursachen (Fragestellung 1). Davon ausgehend wurde der häufigste Ort der Brandentstehung sowie der häufigste Ort des Personenfundes ermittelt (Fragestellung 2). Abschließend wurde untersucht, welche Brandursachen zu der höchsten Anzahl von Todesopfern führen (Fragestellung 3). Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden verschiedene Datensätze systematisch ausgewertet (Abbildung 3.1).

### 3.2 Brandtote in der Bundesrepublik Deutschland

Zur Beantwortung der Fragestellung 1, bei welcher Gebäudenutzung Brände die höchste Anzahl an Todesopfern in der BRD verursachen, wurde die gesamte Anzahl der durch Brände verursachten Todesopfer untersucht. Die Untersuchung erfolgte in Abhängigkeit des Jahres unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums auf der Grundlage der in der Fachserie 12, Reihe 4 des Statistischen Bundesamtes erhobenen Daten zu Todesursachen in Deutschland [57–64]. Die verwendeten Datensätze umfassen die Bevölkerungszahl sowie die gesamte Anzahl von Todesursachen infolge der Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen (X00-X09). Die Auswertung der Datensätze für den Untersuchungszeitraum 2007 bis 2014 ergab, dass 77 % der Brände mit Todesfolge auf den Wohnbereich entfallen (Abbildung 3.2a).



**Abbildung 3.1:** Methode zur Definition eines repräsentativen Brandszenarios als Grundlage für die experimentelle Untersuchung der Brandentstehung und Brandausbreitung in Wohnungen.

Ausgehend vom Wohnbereich und auf Basis der vom Statistischen Bundesamt publizierten Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland [65–72] wurde weiterführend die Anzahl der Todesopfer in Abhängigkeit des Ortes der zum Tod führenden Exposition untersucht. Bei der genannten Statistik handelt es sich um eine ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation<sup>1</sup>. Sie erscheint seit dem Jahr 2007 jährlich als Ergänzung zu der zuvor genannten Fachserie 12, Reihe 4. Jeder Datensatz enthält neben den vierstelligen Positionen nach der ausführlichen ICD-10 Systematik für Deutschland, gegliedert nach Altersgruppen und Geschlecht, auch Angaben zu allen äußeren Ursachen und Unfallkategorien, ebenfalls gegliedert nach Altersgruppen und Geschlecht. Summiert wurden alle Todesfälle des jeweiligen Jahres im Wohnbereich<sup>2</sup>: X00.\_\_.0 bis X03.\_\_.0 sowie X08.\_\_.0 und X09.\_\_.0). Die Auswertung der Datensätze ergab, dass der Ort der zum Tod führenden Exposition in 63 % der untersuchten Fälle innerhalb des Gebäudes lag (Abbildung 3.2b).

<sup>1</sup>Die ICD (englisch, International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems) ist die internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme. Sie ist ein Diagnoseklassifikationssystem der Medizin und wird von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) herausgegeben.

<sup>2</sup>Im jeweiligen Datensatz mit dem Begriff „Zu Hause“ gekennzeichnet.

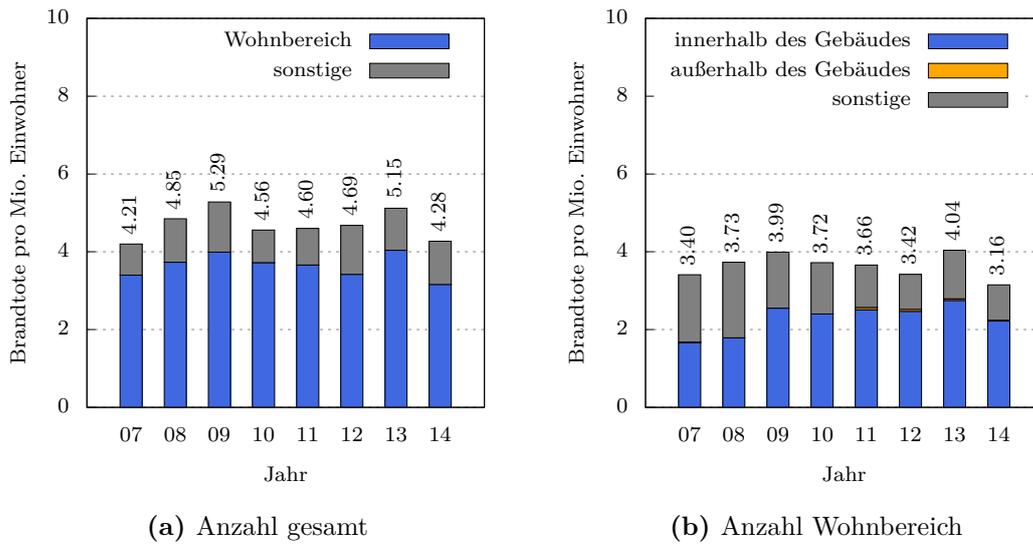


Abbildung 3.2: Anzahl von Todesopfern in Abhängigkeit des Jahres und des Ortes der zum Tod führenden Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen (BRD).

### 3.3 Orte der Brandentstehung und des Personenfundes

In Kapitel 3.2 wurden Brände innerhalb von Wohngebäuden als die häufigste Todesursache identifiziert. Zur Beantwortung der Fragestellung 2, welcher Ort der Brandentstehung innerhalb eines Wohngebäudes die höchste Anzahl an Todesopfern verursacht und an welchem Ort der Personenfund stattgefunden hat, wurden zwei Datensätze von Feuerwehren in der BRD untersucht.

Die Erhebung des ersten Datensatzes (Datensatz 1) erfolgte durch einen Projektpartner im Rahmen des Verbundvorhabens T.I.B.R.O. [11] und umfasst 258 personenbezogene Daten zu Brandereignissen in zehn deutschen Großstädten<sup>3</sup> in den Jahren von 1997 bis 2012, bei denen Personen durch Brandereignisse verletzt oder verstorben sind. Zur Auswertung der personenbezogenen Daten mit Bezug auf die Fragestellung, welcher Ort der Brandentstehung innerhalb eines Wohngebäudes die höchste Anzahl an Todesopfern verursacht und an welchem Ort der Personenfund stattgefunden hat, wurden zuvor Datenelemente mit dazugehörigen Werten definiert, anhand derer die Daten selektiert wurden. Die selektierten personenbezogenen Daten wurden abschließend in einsatzbezogene Daten zusammengefasst. Im Ergebnis wurden 132 einsatzbezogene Daten zu Bränden in mehrgeschossigen Wohngebäuden mit insgesamt 153 Todesopfern selektiert und zusammengefasst.

Der zweite Datensatz (Datensatz 2) umfasst insgesamt 4121 einsatzbezogene Daten der Berliner Feuerwehr zwischen dem 01.01.2005 und dem 30.06.2005 [74]. Zur Selektierung

<sup>3</sup>Anzahl der Einwohner  $\geq 100\,000$  nach [73].

der einsatzbezogenen Daten mit Bezug auf die Fragestellung, welcher Ort der Brandentstehung innerhalb eines Wohngebäudes die höchste Anzahl an Todesopfern verursacht und an welchem Ort der Personenfund stattgefunden hat, wurden mit Bezug auf den Datensatz 1 inhaltlich identische Datenelemente mit dazugehörigen Werten definiert, anhand derer die Daten selektiert wurden. Im Ergebnis wurden fünf einsatzbezogene Daten zu Bränden in mehrgeschossigen Wohngebäuden mit insgesamt sechs Todesopfern selektiert.

Durch die Zusammenführung der selektierten einsatzbezogenen Daten der Datensätze 1 und 2 standen im Ergebnis insgesamt 136 einsatzbezogene Daten<sup>4</sup> zu Bränden in mehrgeschossigen Wohngebäuden mit Todesfolge zwischen den Jahren 1999 und 2012 aus zehn deutschen Großstädten zur Auswertung zur Verfügung. Identische selektierte einsatzbezogene Daten (Anzahl = 1) wurden entfernt. Die Anzahl der Todesopfer betrug insgesamt 157. Daraus ergibt sich, bezogen auf den untersuchten Stichprobenumfang, eine arithmetisch gemittelte Anzahl von 1,15 Todesopfern, die bei einem Brand oder in Folge eines Brandes in oder an einem Wohngebäuden verstorben sind.

Die Auswertung der selektierten einsatzbezogenen Daten aus den Datensätzen 1 und 2 ergab, dass nur 57 % der untersuchten Daten Angaben zum Ort der Brandentstehung enthielten. Mit 28 % führen Brandentstehungsorte im Wohnzimmer zu den häufigsten Todesopfern in mehrgeschossigen Wohngebäuden, gefolgt vom Schlafzimmer mit 14 % (Abbildung 3.3a).

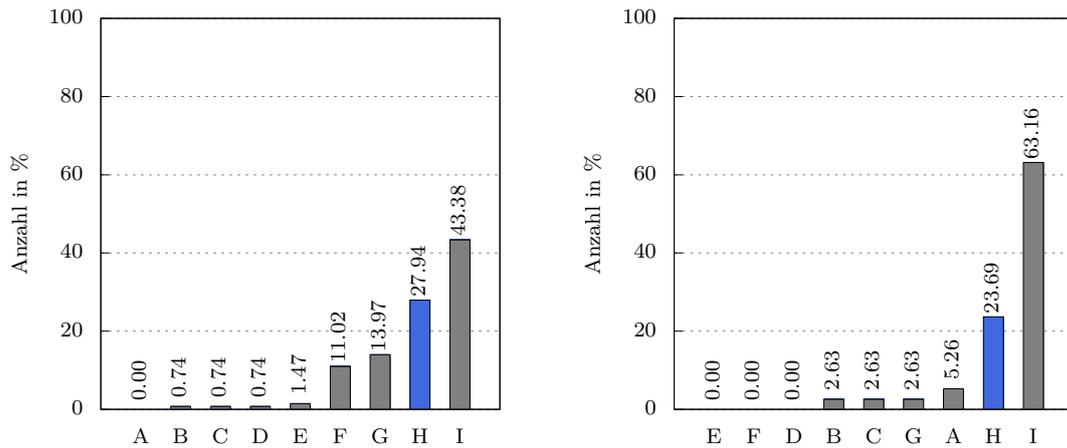
Ausgehend vom häufigsten Ort der Brandentstehung mit Todesfolge (Wohnzimmer) ergab die Untersuchung des Ortes des Personenfundes, dass in 24 % der untersuchten Fälle die Person auch im Wohnzimmer aufgefunden wurde (Abbildung 3.3b). In 13 % der untersuchten Fälle befand sich der Ort des Personenfundes außerhalb des Raumes der Brandentstehung. Aufgrund der inhaltlichen Struktur (Datenelemente) der Datensätze 1 und 2 war eine Differenzierung der Wohnungscharakteristika hinsichtlich der Anzahl der Räume nicht möglich. Da in 63 % der 136 einsatzbezogene Daten keine Angaben zum Ort des Personenfundes getroffen wurden, beziehen sich die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit sowohl auf den Raum der Brandentstehung als auch auf einen angrenzenden Raum.

### 3.4 Brandursachen

Zur Beantwortung der Fragestellung 3, welche Ursache von Bränden innerhalb eines Wohngebäudes zu der häufigsten Anzahl an Todesopfern führt, wurden Daten von versicherungsrelevanten Schadensereignissen der Schweiz untersucht. Die Erhebung des Datensatzes (Datensatz 3 [75]) erfolgte durch den Interkantonalen Rückversicherungsverband IRV und wurde für das Verbundvorhaben T.I.B.R.O. [11] zu Forschungszwecken

---

<sup>4</sup>Die Verteilung der selektierten einsatzbezogenen Daten bezogen auf das Jahr und den Ort (Stadt) des Brandereignisses ist dem Anhang B, Tabelle B.1 zu entnehmen.



(a) Orte der Brandentstehung. A: Flur, B: Bad, C: Balkon, D: Treppenraum, E: Kinderzimmer, F: Küche, G: Schlafzimmer, H: Wohnzimmer, I: unbekannt  
 (b) Orte des Personenfundes. A: Flur, B: Bad, C: Balkon, D: Treppenraum, E: Kinderzimmer, F: Küche, G: Schlafzimmer, H: Wohnzimmer, I: unbekannt

**Abbildung 3.3:** Anzahl der Brände mit Todesfolge in mehrgeschossigen Wohngebäuden in Abhängigkeit (a) des Ortes der Brandentstehung und (b) des Ortes des Personenfundes bei der Brandentstehung im Wohnzimmer (BRD).

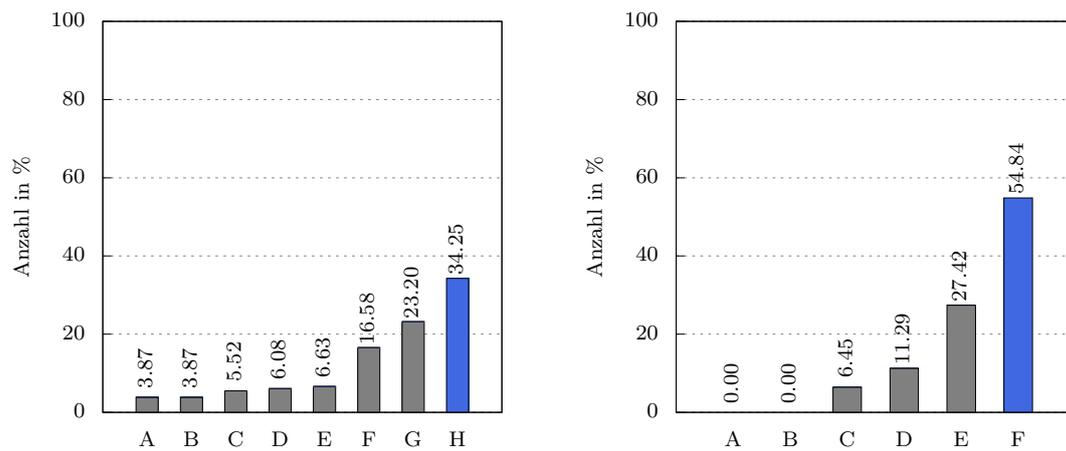
zur Verfügung gestellt. Der Datensatz umfasst 291 Daten von versicherungsrelevanten Schadenereignissen zu Bränden in Gebäuden mit Todesfolge im Zeitraum von 2000 bis 2012.

Zur Auswertung des Datensatzes wurden die Daten im Hinblick auf reine Wohngebäude<sup>5</sup> selektiert. Im Ergebnis wurden 181 Daten von versicherungsrelevanten Schadenereignissen zu Bränden in Wohngebäuden mit Todesfolge selektiert. Die Auswertung der selektierten Daten ergab, dass mit 34 % die häufigste Ursache von Bränden in Wohngebäuden mit Todesfolge das bestimmungsmäßige Feuer (ohne Feuerungsanlagen)<sup>6</sup> ist, gefolgt von unbekanntem Ursachen (23 %) und Elektrizität (17 %) (Abbildung 3.4a).

Die Auswertung der detaillierten Ursachen des bestimmungsmäßigen Feuers (ohne Feuerungsanlagen) von Bränden in Wohngebäuden mit Todesfolge ergab, dass Rauch- und Tabakwaren („Rauchzeug“ gemäß VKF-Code) mit 55 % die häufigste Brandursache darstellen, gefolgt von Kerzen (27 %) (Abbildung 3.4b).

<sup>5</sup>VKF-Code - Zweckbestimmung nach [76]: 20.

<sup>6</sup>VKF-Code - Schadenursache nach [76]: 21-29.



- (a) Anzahl gesamt. A: Andere, B: Selbstentzündung, C: Feuerungsanlage, D: Brandstiftung, E: Explosion, F: Elektrizität, G: unbekannt, H: bestimmungsmäßiges Feuer (ohne Feuerungsanlagen)
- (b) Anzahl detaillierte Ursachen bestimmungsmäßiges Feuer (ohne Feuerungsanlagen): A: Schweißen/Löten, B: Feuerwerk, C: Feuerzeug/Zündholz, D: Übrige, E: Kerzen, F: Rauch- und Tabakwaren

Abbildung 3.4: Anzahl der Ursachen von Bränden in Wohngebäuden mit Todesfolge (Schweiz).

### 3.5 Repräsentatives Brandszenario

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wird das repräsentative Brandszenario als Grundlage zur experimentellen und numerischen Untersuchung und Modellierung der Brandentstehung und Brandausbreitung wie folgt definiert: Brand in einer Wohnung eines Wohngebäudes, Ort der Brandentstehung: Wohnzimmer, Zündquelle: mit Rauch- und Tabakwaren oder Kerze vergleichbare Zündenergie, Untersuchungsgegenstand: Raum der Brandentstehung sowie angrenzender Raum.

# KAPITEL 4

---

## Experimentelle Untersuchung von Materialzusammensetzungen

Zur Untersuchung des Einflusses der stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen auf die Stoff- und Energiefreisetzung bei Bränden in Wohnungen wurden kleinmaßstäbliche Brandversuche an repräsentativen Materialien in älteren und gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen durchgeführt. In Abhängigkeit von Material und Masse wurden abbrandspezifische Parameter erfasst und ausgewertet.

### 4.1 Untersuchungsziel

In Kapitel 1 wurde beschrieben, dass die in den Brandversuchen aus dem Jahr 1939 verwendeten Einrichtungsgegenstände überwiegend aus cellulosehaltigen Materialien bestanden. Die gegenwärtige stoffliche Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen in Wohnungen hat sich jedoch aufgrund der zunehmenden Verwendung von Werkstoffen auf der Basis von Holz und Polymeren verändert. Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung ist die Beantwortung der Fragestellung, wie sich unterschiedliche stoffliche Zusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen in Form von Materialzusammensetzungen auf die Stoff- und Energiefreisetzung bei Bränden in Wohnungen auswirken. Dazu wurden neben MLR und HRR auch effektive Verbrennungswärmen und Stoffausbeuten einzelner Materialien und Materialzusammensetzungen experimentell bestimmt.

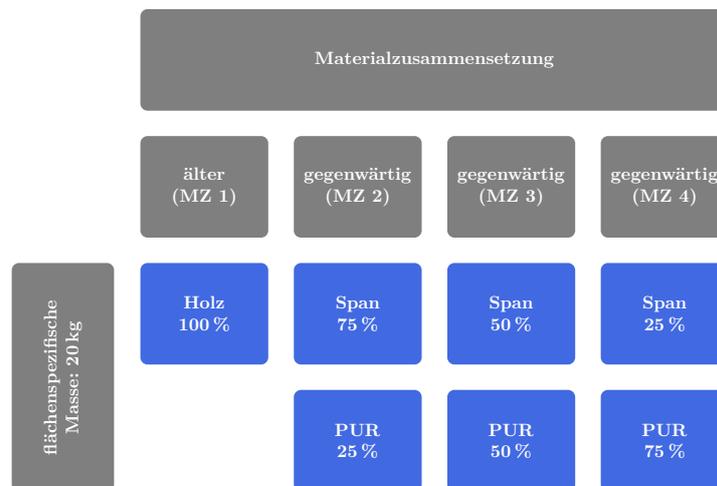
### 4.2 Untersuchungsmethode und -gegenstand

#### 4.2.1 Materialzusammensetzungen

Zur Definition repräsentativer Materialzusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen mit älterer und gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung wurden Daten aus dem Kapitel 6.2.3 herangezogen. Während die Materialzusammensetzung älterer Einrichtungsgegenstände überwiegend auf der Grundlage cellulosehaltiger Materialien wie Holz

und Papier basiert, weist die Materialzusammensetzung gegenwärtiger Einrichtungsgegenstände sowohl einen höheren Anteil polymerer Werkstoffe als auch einen höheren Anteil von Holzwerkstoffen (insbesondere Span) auf.

Als Repräsentant älterer stofflicher Zusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen wurde daher Holz herangezogen (MZ 1). Als Repräsentanten gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen wurden Materialzusammensetzungen aus Span und Polyurethane (PUR) definiert. Um den Einfluss des Anteils polymerer Werkstoffe zu quantifizieren, wurde der Anteil des Polyurethans variiert (MZ 2 bis MZ 4) (Abbildung 4.1). Zur Untersuchung wurde die in Kapitel 6.2.3 herangezogenen flächenspezifischen Masse an Einrichtungsgegenständen von  $20,0 \text{ kg/m}^2$  berücksichtigt.

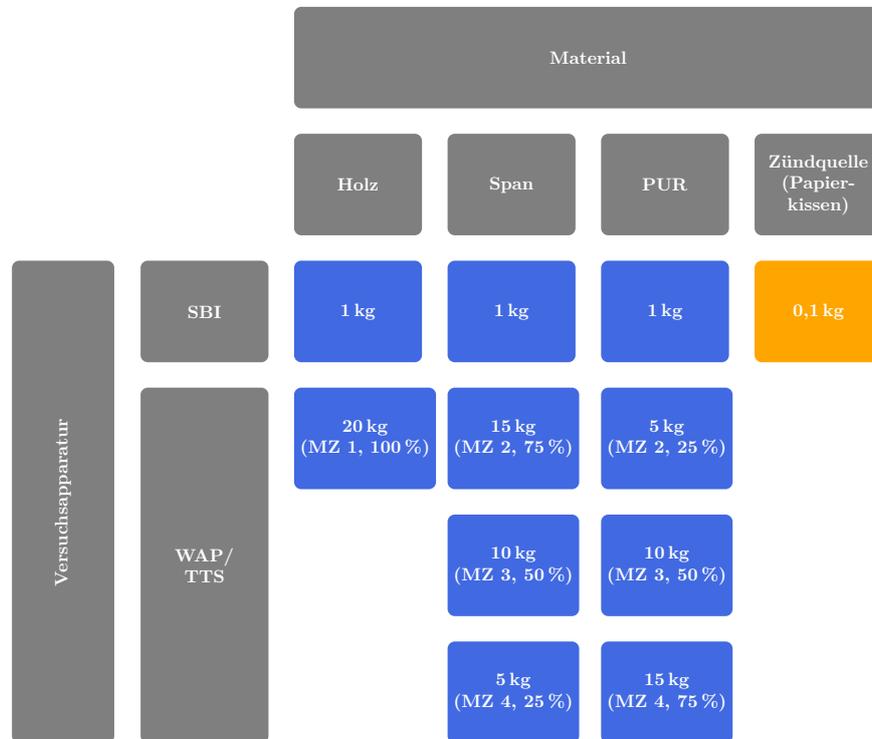


**Abbildung 4.1:** Definition der Materialzusammensetzungen zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Stoff- und Energiefreisetzung bei Bränden in Wohnungen.

#### 4.2.2 Experimentelles Design

Die experimentelle Bestimmung der HRR bei gleichzeitiger Bestimmung der MLR erfolgte in der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen SBI-Versuchsapparatur unter ventilerten Abbrandbedingungen. Gleichzeitig wurden Rauchgaskonzentrationen zur Bestimmung der Stofffreisetzung und -ausbeute gemessen. Die Masse der in der SBI-Versuchsapparatur verwendeten Versuchskörper betrug  $1 \text{ kg}$ . Die Bestimmung der MLR der Versuchskörper mit einer Masse von  $5 \text{ kg}$ ,  $10 \text{ kg}$ ,  $15 \text{ kg}$  und  $20 \text{ kg}$  erfolgte in einem modifizierten Versuchsstand zur Untersuchung des Feuerwiderstandes nichttragender Wände (Wandprüfstand, WAP) unter ebenfalls ventilerten Abbrandbedingungen sowie im Freien auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) der Bundesanstalt für Materialforschung

und -prüfung (BAM) (Abbildung 4.2)<sup>1</sup>. Zur ausreichenden Erfassung und Quantifizierung der abbrandspezifischen Parameter wurde die Versuchsdauer aller Versuche auf 1800 s begrenzt.

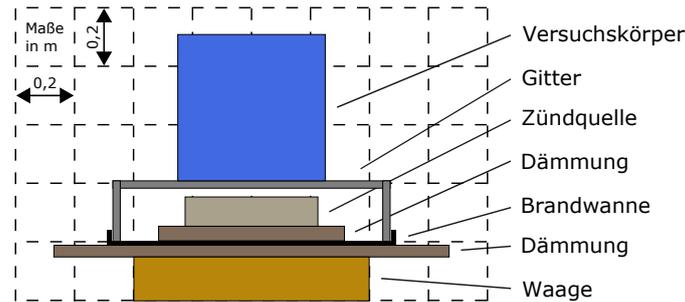


**Abbildung 4.2:** Experimentelles Design zur Quantifizierung abbrandspezifischer Parameter der aus den Materialzusammensetzungen definierten Versuchskörper aus Holz, Span und PUR sowie der Zündquelle.

### 4.2.3 Versuchsaufbau

In der SBI-Versuchsapparatur wurde der Versuchsaufbau (Abbildung 4.3) mittig auf dem Probenträgerwagen positioniert (Abbildung 4.4a). Zum Schutz der Waage vor Wärmeübertragung durch thermische Strahlung und Wärmeleitung sowie vor herabfallenden Teilen wurde zwischen Waage und Versuchskörper eine auf Mineralfaserwolle basierende, nicht brennbare Dämmung und eine aus Stahlblech bestehende Brandwanne installiert.

<sup>1</sup>Die Zusammenfassung des experimentellen Designs ist dem Anhang C, Tabelle C.1 zu entnehmen.



**Abbildung 4.3:** Aufriss des Versuchsaufbaus zur Quantifizierung abbrandspezifischer Parameter von Versuchskörpern aus Holz, Span und PUR in den Massen von 1 kg, 5 kg, 10 kg, 15 kg und 20 kg.

Aufgrund der Unterkonstruktion betrug der Abstand zwischen Versuchskörper und Boden des Probenträgerwagens 0,4 m. In dem Wandprüfstand wurde der Versuchsaufbau mittig, bezogen auf die Grundfläche des Raumes, angeordnet (Abbildung 4.4b). Aufgrund des identischen Versuchsaufbaus betrug der Abstand zwischen Versuchskörper und Boden ebenfalls 0,4 m. Der Abstand auf dem Versuchsstand des TTS betrug zwischen Versuchskörper und Boden 0,5 m (Abbildung 4.4c).

Der Abstand der Zündquellenoberseite zum Gitter und somit zur Versuchskörperunterseite betrug ca. 0,05 m. Die Dicke der aus Stahl bestehenden Gitterstäbe betrug 0,005 m, die Maschenweite 0,05 m × 0,05 m (Länge × Breite). Die Versuchskörper wurden mittig über der Zündquelle positioniert. Zur Minimierung weiterer stofflicher Einflüsse auf das Brandverhalten wurden alle übrigen brennbaren Materialien sowohl in der SBI-Versuchsapparatur als auch im Wandprüfstand bzw. in der Umgebung des Versuchsstandes auf dem TTS entfernt.

#### 4.2.4 Versuchskörper und Zündbedingungen

Die Versuchskörper wurden aus den Materialien Holz und Span in Krippenbauweise hergestellt. Bezogen auf das Krippenvolumen betrug das Verhältnis von Material zu Luft 1:1. Die Breite der Holz- bzw. Spankrippenstäbe betrug jeweils 0,025 m. Der Abstand der Holz- bzw. Spankrippenstäbe zueinander betrug ebenfalls jeweils 0,025 m. Alle Versuchskörper besaßen eine annähernd kubische Geometrie (Abbildung 4.5).

Die Auswahl der Stofftypen orientierte sich an der für den Möbel- und Einrichtungsbaubau typischen Materialverwendung (Tabelle 4.1). So entspricht die Spanplatte P2 den Anforderungen an Platten für Inneneinrichtungen (einschließlich Möbel) zur Verwendung im Trockenbereich gemäß [77]. Der Einsatz von PUR 3554 erfolgt nach Angaben des Herstellers überwiegend in Form von Sitzpolstern und Matratzen. Als Holzart wurde Fichte herangezogen, da es sich nach [78] hierbei um die am häufigsten verwendete einheimische Holzart handelt.



(a) SBI-Versuchsapparatur



(b) WAP



(c) TTS

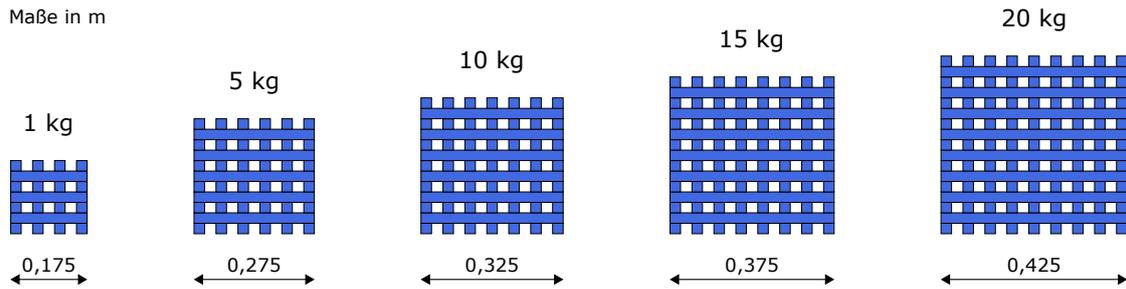
**Abbildung 4.4:** Anordnung des Versuchsaufbaus (a) in der SBI-Versuchsapparatur, (b) dem Wandprüfstand (WAP) und (c) auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) zur Quantifizierung abbrandspezifischer Parameter.

**Tabelle 4.1:** Typenbezeichnungen und Dichten der in den Materialzusammensetzungen definierten Stoffe Holz, Span und PUR.

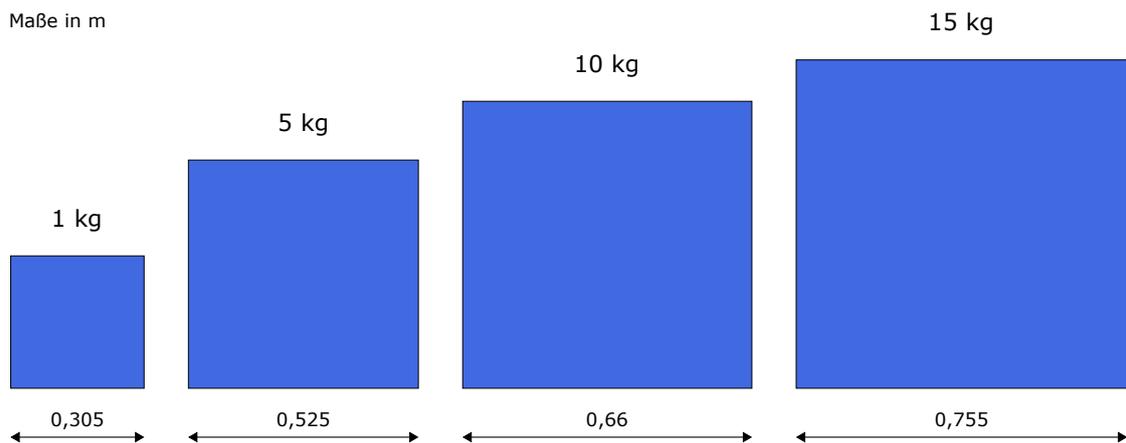
Stoff	Typenbezeichnung	Dichte
-	-	$\rho$ in $\text{kg/m}^3$
Holz	Fichte	479,8 <sup>a</sup>
Span	P2 (V20)	608,8 <sup>a</sup>
PUR	3554	35,0 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>eigene Messung

Die Entzündung der Versuchskörper erfolgte durch die in Kapitel 2.1.4 beschriebene Zündquelle. Die Brandbeanspruchung erfolgte jeweils mittig unterhalb des Versuchskör-



(a) Versuchskörper aus Holz (Versuchskörpermassen: 1 kg und 20 kg) und Span (Versuchskörpermassen: 1 kg, 5 kg, 10 kg und 15 kg)



(b) Versuchskörper aus PUR (Versuchskörpermassen: 1 kg, 5 kg, 10 kg und 15 kg)

**Abbildung 4.5:** Aufbau der Versuchskörper zur Quantifizierung abbrandspezifischer Parameter.

pers (Abbildung 4.3). Je Versuchskörper wurden drei Versuche durchgeführt, aus denen der jeweilige arithmetische Mittelwert berechnet wurde.

Alle Versuche wurden näherungsweise nach den in [21] beschriebenen Klimabedingungen zur Untersuchung des Brandverhaltens von Bauprodukten durchgeführt. Alle Versuchskörper wurden bis unmittelbar vor dem jeweiligen Versuchsbeginn dem Klima zur Konditionierung von Bauprodukten gemäß [26] ausgesetzt (Tabelle 2.1).

#### 4.2.5 Messtechnik und Messstellen

**Rauchgaskonzentration** Die Messung der im Rauchgas enthaltenen Konzentrationen von  $O_2$ ,  $CO_2$  und  $CO$  erfolgte in der SBI-Versuchseinrichtung (Versuchskörpermasse: 1 kg) mittels der zur Versuchsanordnung dazugehörigen Gasanalysegeräte. Die Gasent-

nahmesonde des Gasanalysegerätes war im Messabschnitt angeordnet (Abbildung 2.4). Das Messintervall betrug 3 s.

**MLR** Die Bestimmung der MLR zur Berechnung der HRR und Stofffreisetzungsraten erfolgte in allen Versuchen mit elektronischen Waagen. Das Messintervall betrug 10 s.

## 4.3 Ergebnisse und Diskussion

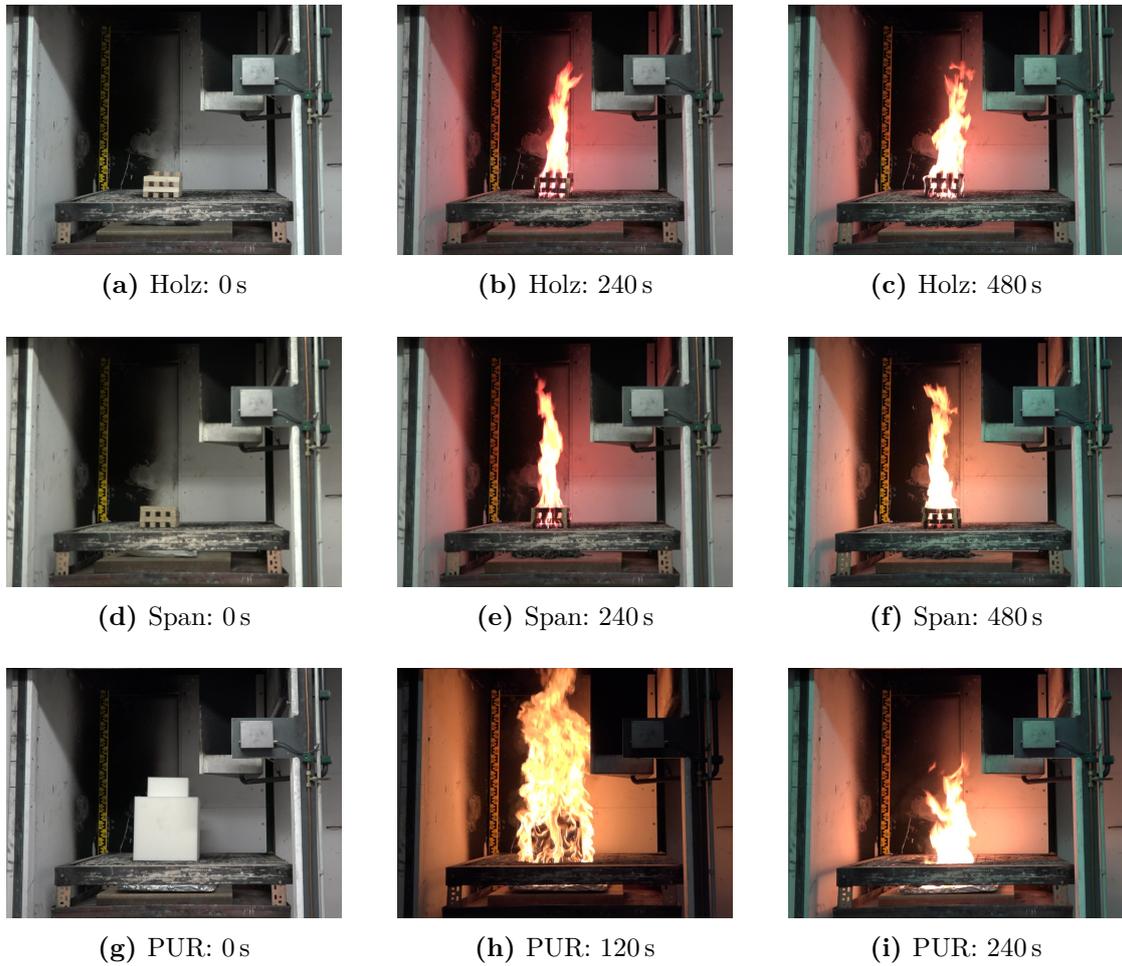
Die Untersuchungsergebnisse werden hinsichtlich Brandentwicklung, MLR, HRR, effektiver Verbrennungswärme sowie Stofffreisetzung und -ausbeute ausgewertet und vergleichend dargestellt.

### 4.3.1 Brandentwicklung

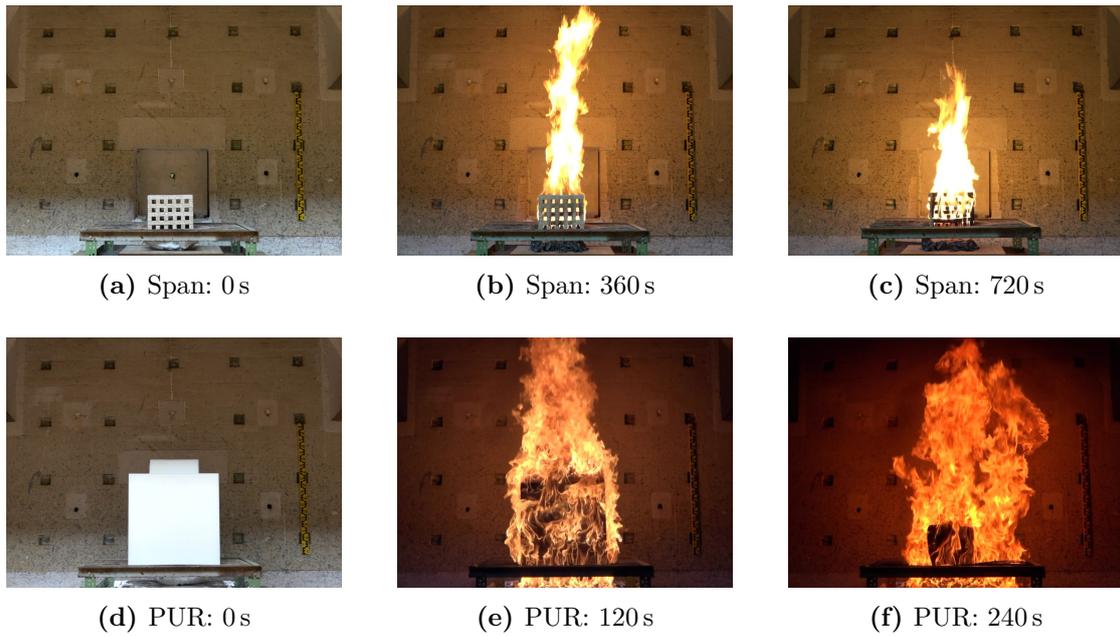
Während die Versuchskörper aus Holz und Span mit einer Versuchskörpermasse von 1 kg eine vergleichbare Brandentwicklung aufwiesen (Abbildung 4.6 bis Abbildung 4.10), verlief der Abbrand der Versuchskörper aus PUR in der jeweils gleichen Versuchskörpermasse schneller (vgl. Kapitel 4.3.2)<sup>2</sup>. Des Weiteren blieb die Struktur der Versuchskörper aus Holz und Span im Verlauf der Versuchszeit innerhalb der ersten 1200 s nach Zündung weitestgehend erhalten, während sich bei den Versuchskörpern aus PUR ein brennendes Abtropfen innerhalb der ersten 60 s nach Zündung einstellte. Die brennende PUR-Schmelze sammelte sich in der Brandwanne unterhalb des Versuchskörpers.

---

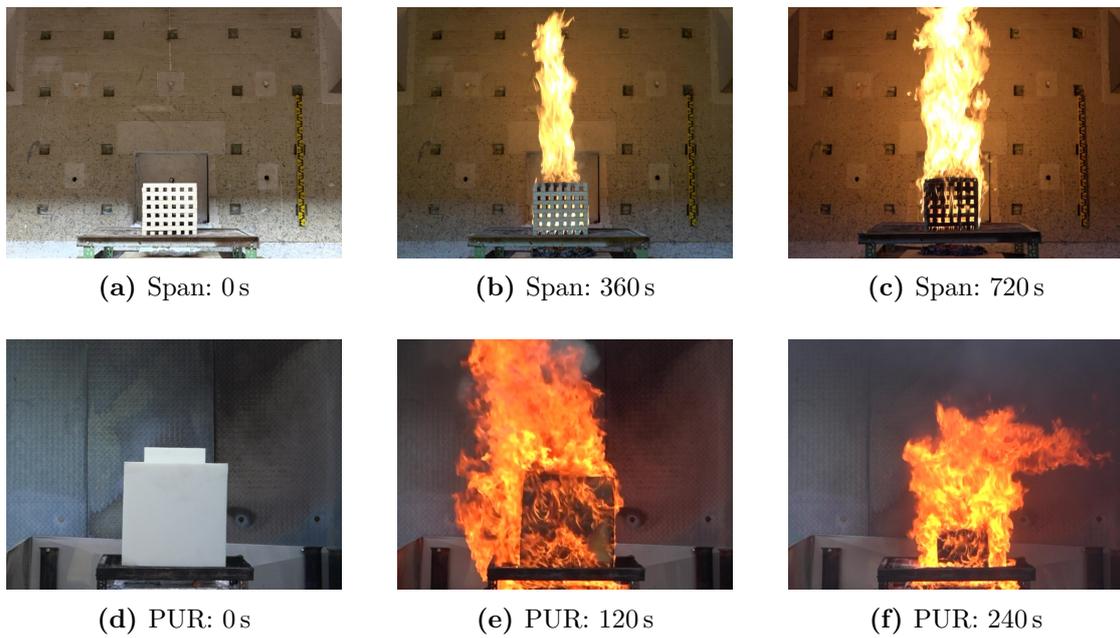
<sup>2</sup>Die Brandentwicklungen der Zündquelle sowie der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR sind bezogen auf die gesamte Versuchszeit dem Anhang C, Abbildung C.1 bis Abbildung C.11 zu entnehmen.



**Abbildung 4.6:** Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abbildung 4.7:** Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Span und PUR (Versuchskörpermasse: 5 kg) im Wandprüfstand (WAP) in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abbildung 4.8:** Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Span und PUR (Versuchskörpermasse: 10 kg) im Wandprüfstand (WAP) in Abhängigkeit von der Zeit.



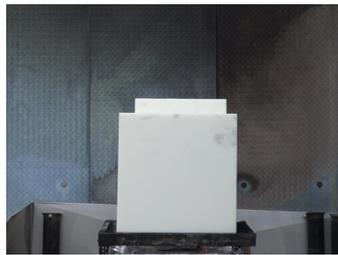
(a) Span: 0 s



(b) Span: 360 s



(c) Span: 720 s



(d) PUR: 0 s



(e) PUR: 120 s



(f) PUR: 240 s

**Abbildung 4.9:** Brandentwicklungen der Versuchskörper aus Span und PUR (Versuchskörpermasse: 15 kg) im Wandprüfstand (WAP) und auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) in Abhängigkeit von der Zeit.



(a) Holz: 0 s



(b) Holz: 360 s

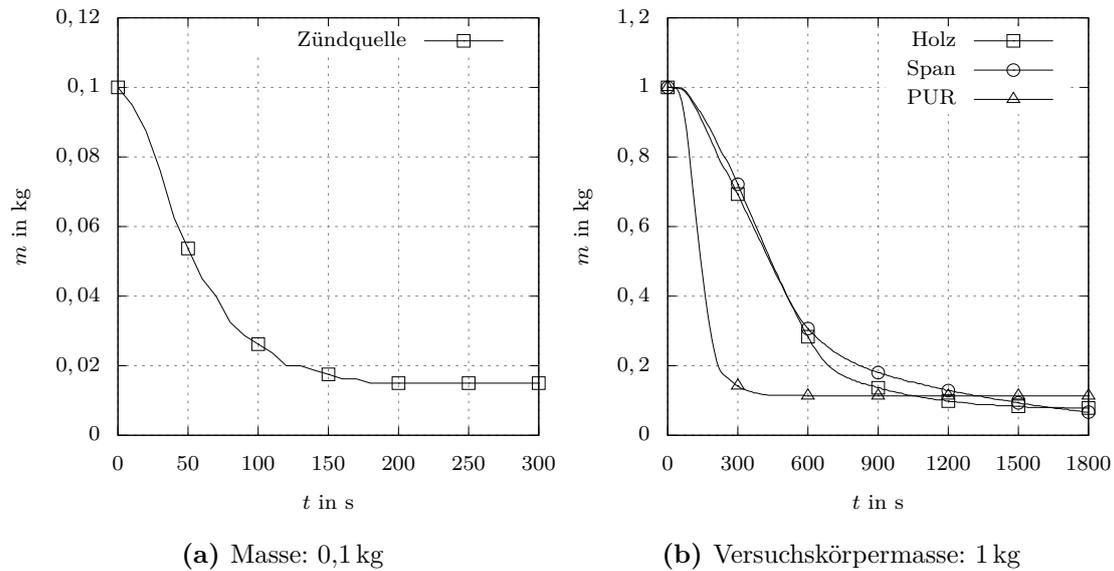


(c) Holz: 720 s

**Abbildung 4.10:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Holz (Versuchskörpermasse: 20 kg) im Wandprüfstand (WAP) in Abhängigkeit von der Zeit.

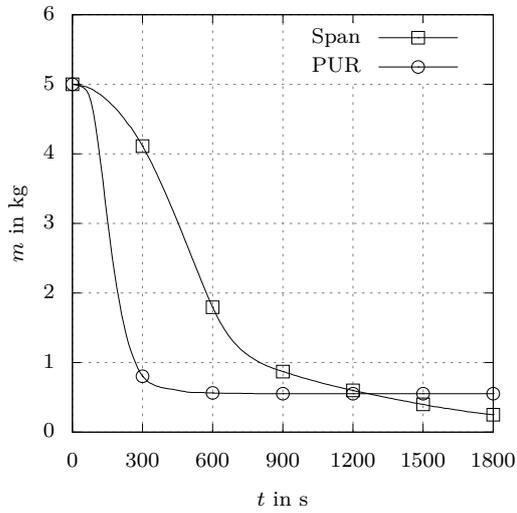
### 4.3.2 MLR

Aus den experimentell bestimmten und arithmetisch gemittelten Massen der Zündquelle sowie der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12) wurden nach Gleichung 2.9 die jeweiligen MLR berechnet (Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14)<sup>3</sup>. Der Vergleich der MLR der Versuchskörper aus Span und PUR in der jeweils gleichen Versuchskörpermasse zeigt, dass sich bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus PUR in jeder zur Untersuchung herangezogenen Versuchskörpermasse höhere maximale MLR eingestellt haben (1 kg: +260 %, 5 kg: +250 %, 10 kg: +258 %, 15 kg: +227 %). Des Weiteren traten diese maximalen MLR früher ein als bei den Versuchskörpern aus Span (Tabelle 4.2).

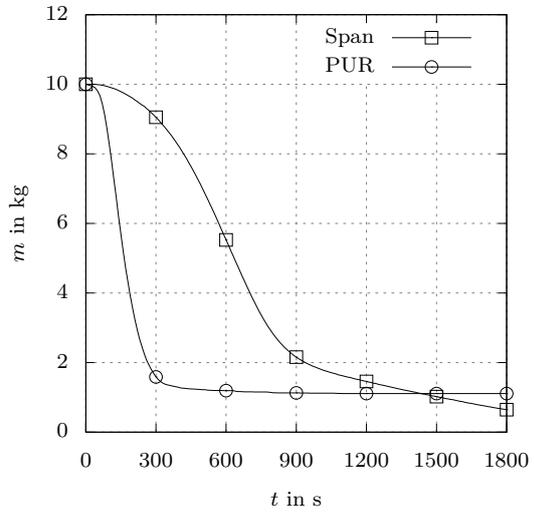


**Abbildung 4.11:** Experimentell bestimmte und arithmetisch gemittelte Massen (a) der Zündquelle und (b) der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.

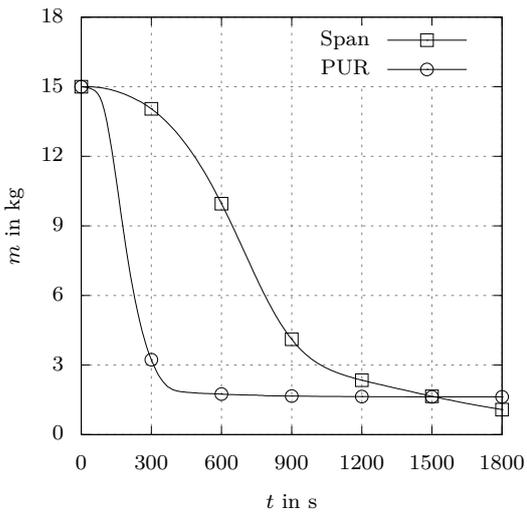
<sup>3</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.12 bis Abbildung C.22 zu entnehmen.



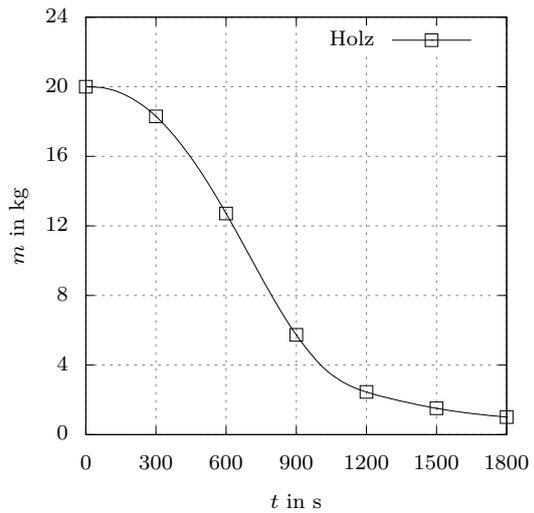
(a) Versuchskörpermasse: 5 kg



(b) Versuchskörpermasse: 10 kg

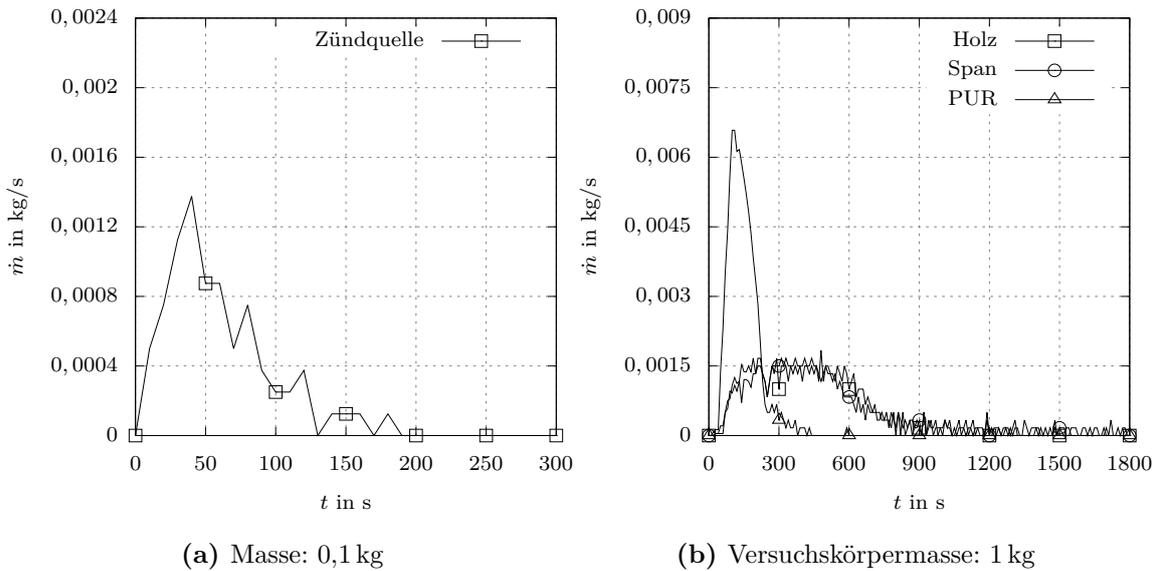


(c) Versuchskörpermasse: 15 kg



(d) Versuchskörpermasse: 20 kg

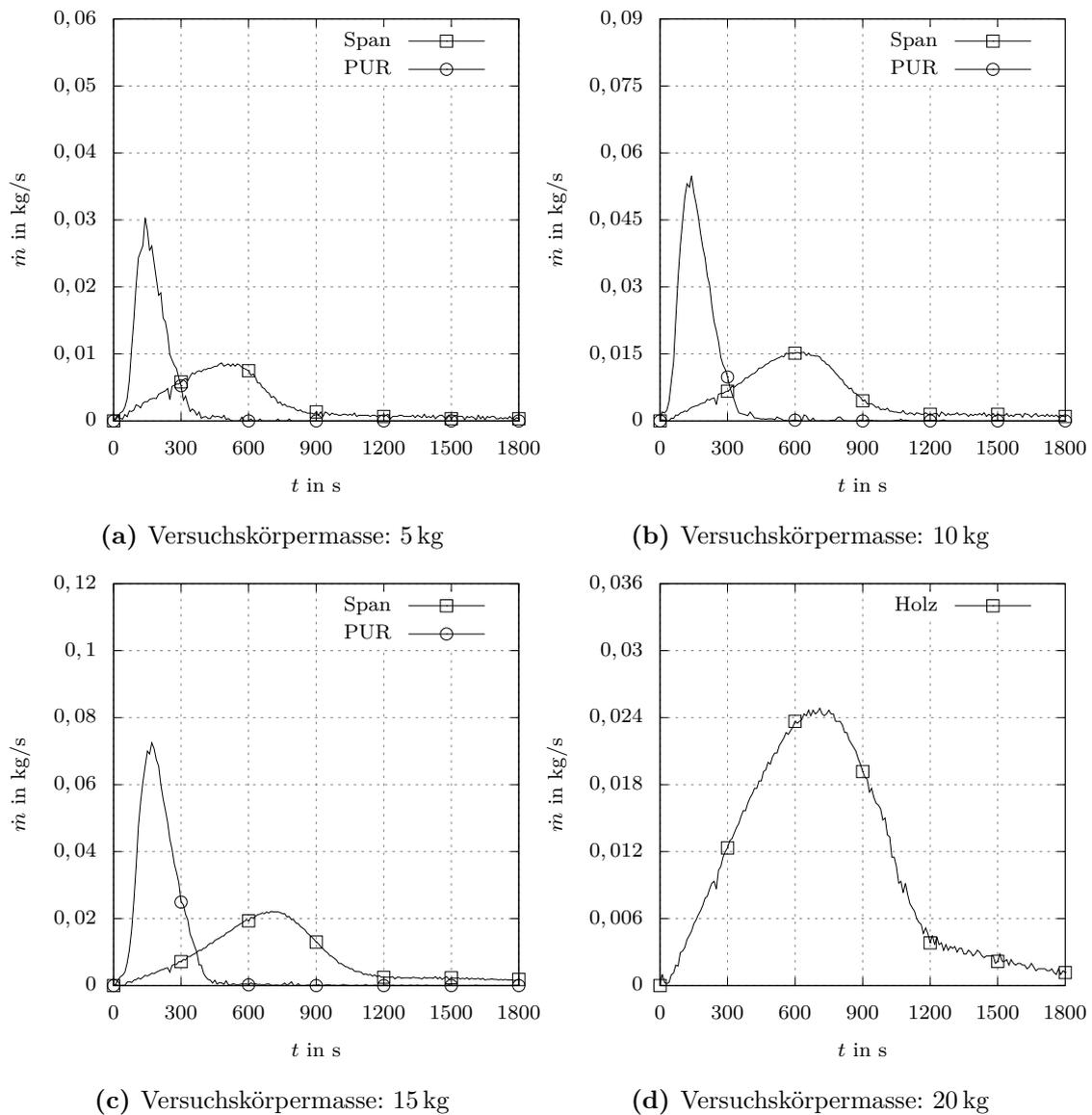
**Abbildung 4.12:** Experimentell bestimmte und arithmetisch gemittelte Massen der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR im Wandprüfstand (WAP) und auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) in Abhängigkeit von der Versuchskörpermasse (5 kg, 10 kg, 15 kg und 20 kg) und der Zeit.



**Abbildung 4.13:** Arithmetisch gemittelte MLR (a) der Zündquelle und (b) der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.

**Tabelle 4.2:** Vergleich der arithmetisch gemittelten maximalen MLR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR in Abhängigkeit von der Versuchskörpermasse (1 kg, 5 kg, 10 kg, 15 kg und 20 kg) und der Zeit.

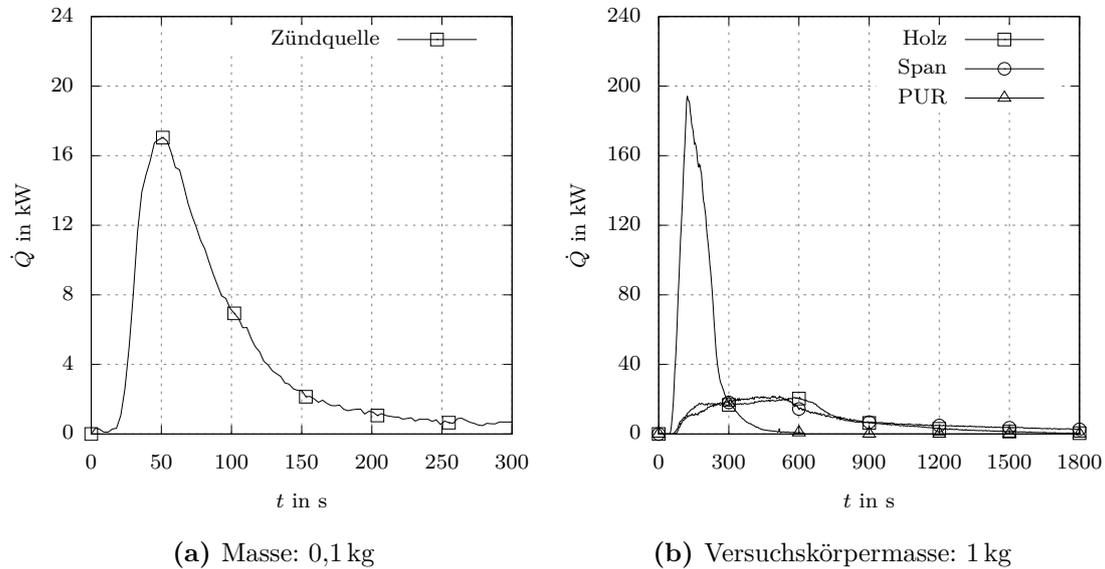
Versuchskörper	Versuchskörpermasse	maximale MLR	Zeit
-	$m$ in kg	$\dot{m}_{max}(t)$ in kg/s	$t$ in s
Holz	1	0,00167	130
	20	0,02483	710
Span	1	0,00183	480
	5	0,00867	480
	10	0,01533	610
	15	0,02217	700
PUR	1	0,00658	100
	5	0,03032	140
	10	0,05485	140
	15	0,07252	170



**Abbildung 4.14:** Arithmetisch gemittelte MLR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR im Wandprüfstand (WAP) und auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) in Abhängigkeit von der Versuchskörpermasse (5 kg, 10 kg, 15 kg und 20 kg) und der Zeit.

### 4.3.3 HRR

Aus den nach Gleichung 2.5 experimentell bestimmten und arithmetisch gemittelten HRR der Zündquelle sowie der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Abbildung 4.15) wurden die jeweiligen THR berechnet (Abbildung 4.16).



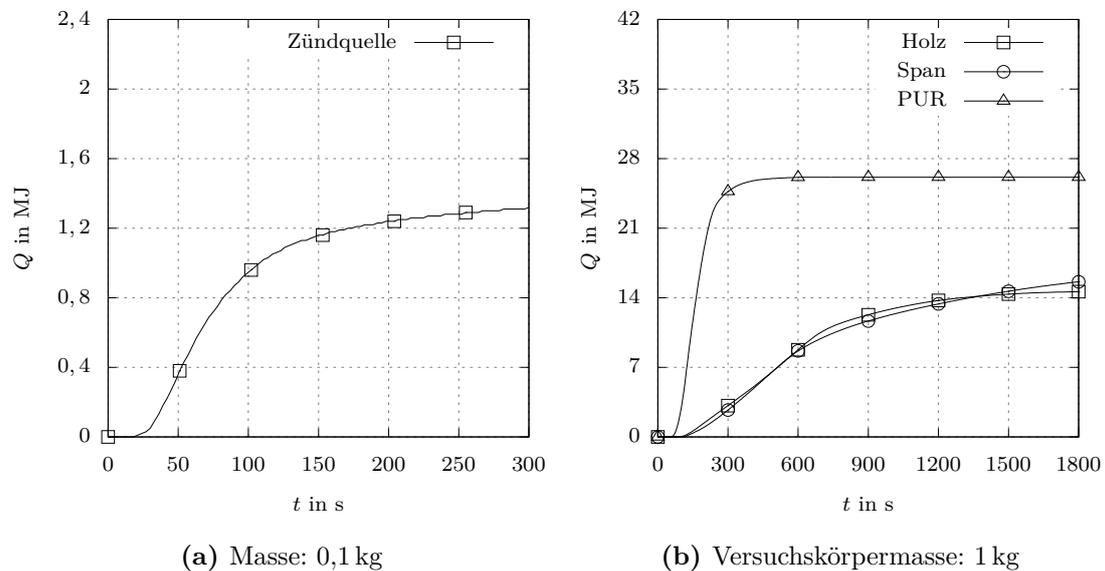
**Abbildung 4.15:** In der SBI-Versuchsapparatur experimentell bestimmte und arithmetisch gemittelte HRR (a) der Zündquelle und (b) der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in Abhängigkeit von der Zeit.

Die Berechnung der effektiven Verbrennungswärmen erfolgte anschließend nach Gleichung 2.11 (Tabelle 4.3)<sup>4</sup>. Der Vergleich der effektiven Verbrennungswärmen zeigt, dass bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Span 6 % bzw. bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus PUR 86 % mehr Verbrennungswärme freigesetzt wurde als bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Holz.

Die unter der Berücksichtigung der MLR und den effektiven Verbrennungswärmen berechneten und arithmetisch gemittelten HRR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Abbildung 4.17)<sup>5</sup> unterscheiden sich analog (qualitativ) zu den berechneten MLR. So stellten sich bei den Verbrennungen der Versuchskörper aus PUR höhere maximale HRR ein. Des Weiteren traten diese maximalen HRR früher ein als bei den Verbrennungen der Versuchskörper aus Span.

<sup>4</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Tabelle C.2 bis Tabelle C.5 zu entnehmen.

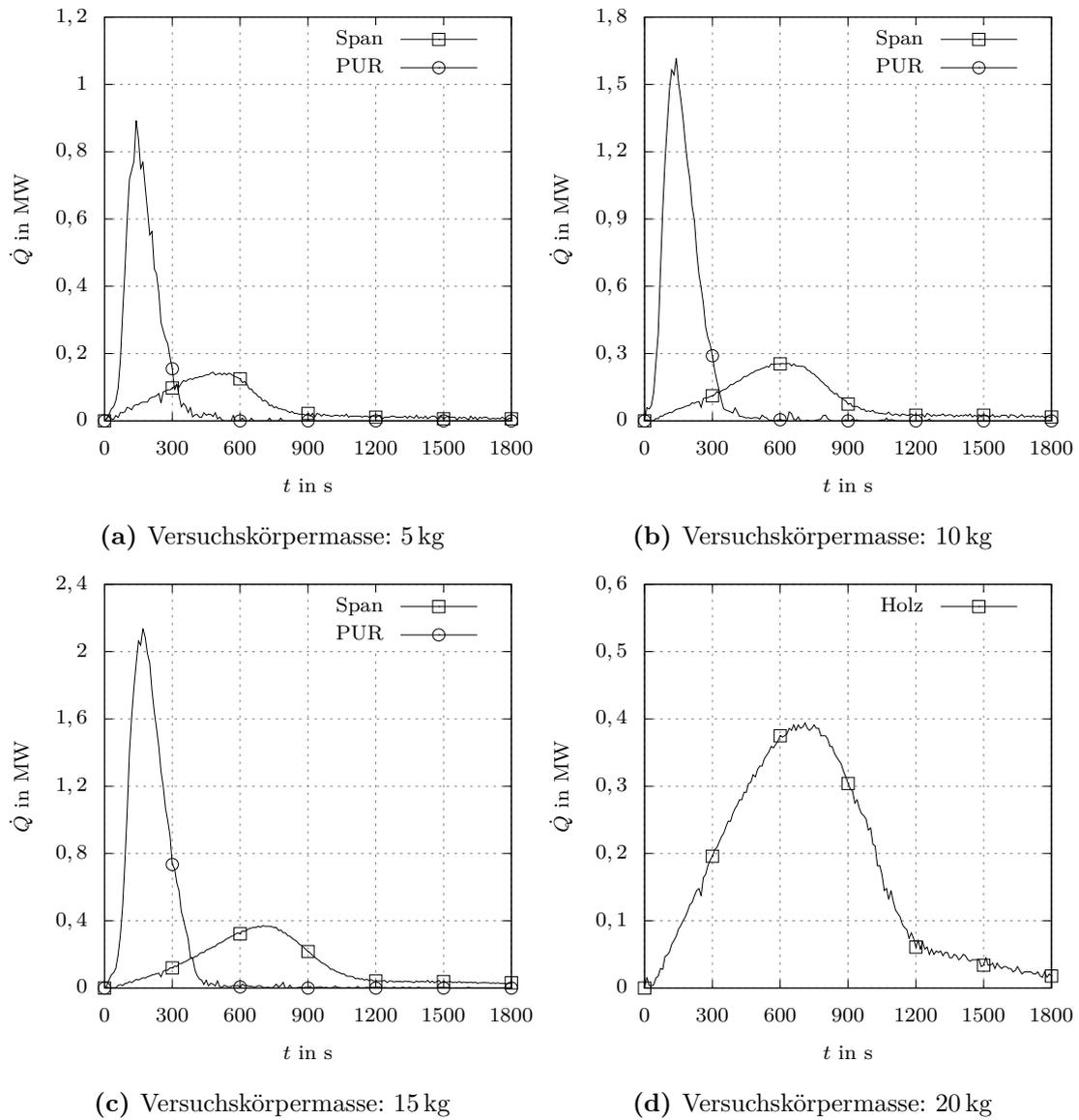
<sup>5</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.23 bis Abbildung C.26 zu entnehmen.



**Abbildung 4.16:** In der SBI-Versuchsapparatur bestimmte und arithmetisch gemittelte THR (a) der Zündquelle und (b) der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in Abhängigkeit von der Zeit.

**Tabelle 4.3:** Arithmetisch gemittelte effektive Verbrennungswärmen der Zündquelle sowie der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg).

Versuchs- körper	Massen- abbrand	THR	effektive Ver- brennungswärme
-	$\Delta m$ in kg	$Q$ in kJ	$\Delta H_{c,eff}$ in kJ/kg
Zündquelle	0,085	1316,85	15 492,35
Holz	0,922	14 611,18	15 853,00
Span	0,933	15 612,85	16 728,05
PUR	0,887	26 130,05	29 469,98



**Abbildung 4.17:** Vergleich der aus den arithmetisch gemittelten MLR und den effektiven Verbrennungswärmen berechneten HRR der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR in Abhängigkeit von der Versuchskörpermasse (5 kg, 10 kg, 15 kg und 20 kg) und der Zeit.

#### 4.3.4 Stofffreisetzung und -ausbeute

Aus den experimentell bestimmten und arithmetisch gemittelten Stoffmengenanteilen des CO<sub>2</sub>, des CO sowie der Lichtschwächung (Abbildung 4.18) wurden die jeweiligen Stofffreisetzungsraten nach Gleichung 2.13, 2.18 und 2.23 berechnet (Abbildung 4.19).

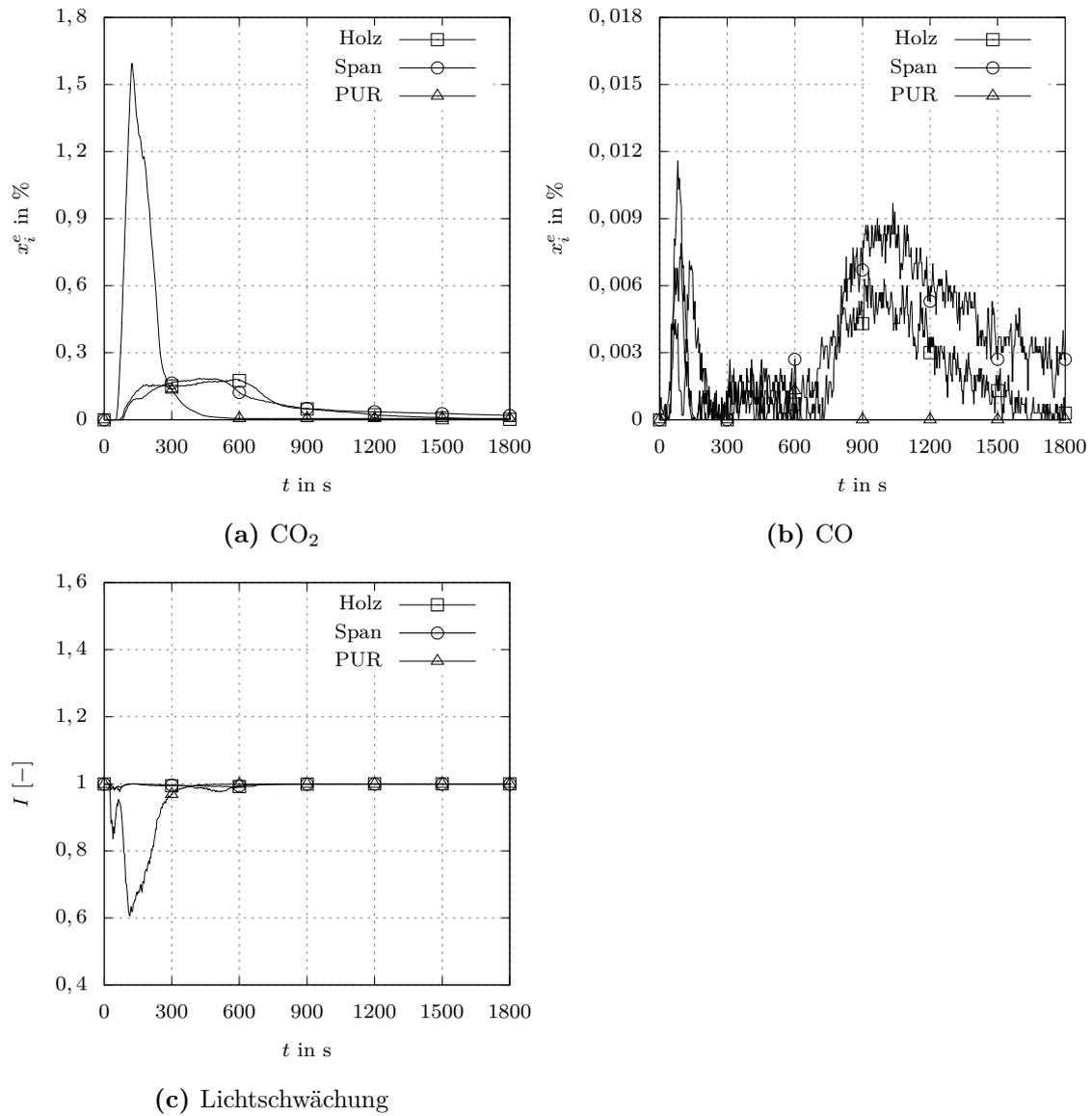
Der Vergleich der aus den Stofffreisetzungsraten berechneten gesamten Stofffreisetzung (Abbildung 4.20) zeigt, dass bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Span 4 % bzw. bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus PUR 41 % mehr an CO<sub>2</sub> freigesetzt wurde als bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Holz. Der Vergleich der gesamten Stofffreisetzung der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR bezogen auf CO zeigt, dass bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Span 93 % mehr bzw. bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus PUR 79 % weniger an CO freigesetzt wurde als bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Holz. Der Vergleich der gesamten Stofffreisetzung der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR bezogen auf Ruß zeigt, dass bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Span 39 % bzw. bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus PUR die dreizehnfache Menge mehr an Ruß freigesetzt wurde als bei der Verbrennung des Versuchskörpers aus Holz.

Der Vergleich der nach Gleichung 2.17 (CO<sub>2</sub>), 2.22 (CO) und 2.28 (Ruß) berechneten Stoffausbeuten (Tabelle 4.4)<sup>6</sup> zeigt, dass bei der Verbrennung der Versuchskörper aus Span höhere Stoffausbeuten erreicht werden als bei der Verbrennung der Versuchskörper aus Holz. Gleiches gilt bei der Verbrennung der Versuchskörper aus PUR im Hinblick auf die Stoffausbeuten des CO<sub>2</sub> und des Rußes.

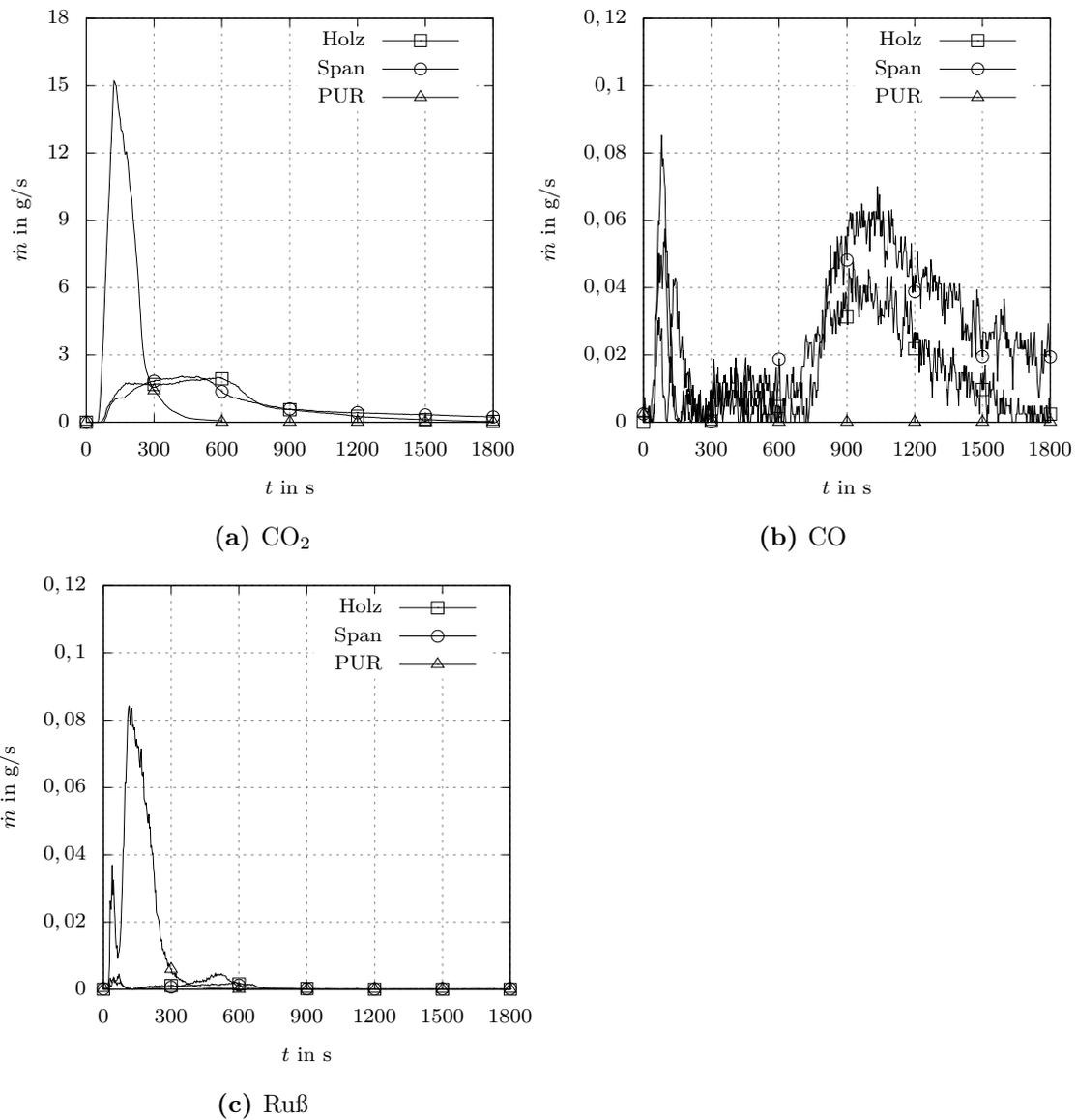
**Tabelle 4.4:** Berechnung der von den aus Holz, Span und PUR bestehenden Versuchskörpern (Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stoffausbeuten für CO<sub>2</sub>, CO und Ruß in der SBI-Versuchsapparatur.

Versuchskörper	m <sub>CO<sub>2</sub></sub>	m <sub>CO</sub>	m <sub>Ruß</sub>	Δm <sub>VK</sub>	Y <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Y <sub>CO</sub>	Y <sub>Ruß</sub>
-	g	g	g	g	$\frac{\text{gCO}_2}{\text{gVK}}$	$\frac{\text{gCO}}{\text{gVK}}$	$\frac{\text{gRuß}}{\text{gVK}}$
Holz	1387,24	25,76	0,87	921,67	1,5051	0,0279	0,0009
Span	1448,16	49,71	1,21	933,33	1,5516	0,0533	0,0013
PUR	2046,64	5,49	11,49	886,67	2,3082	0,0062	0,0130

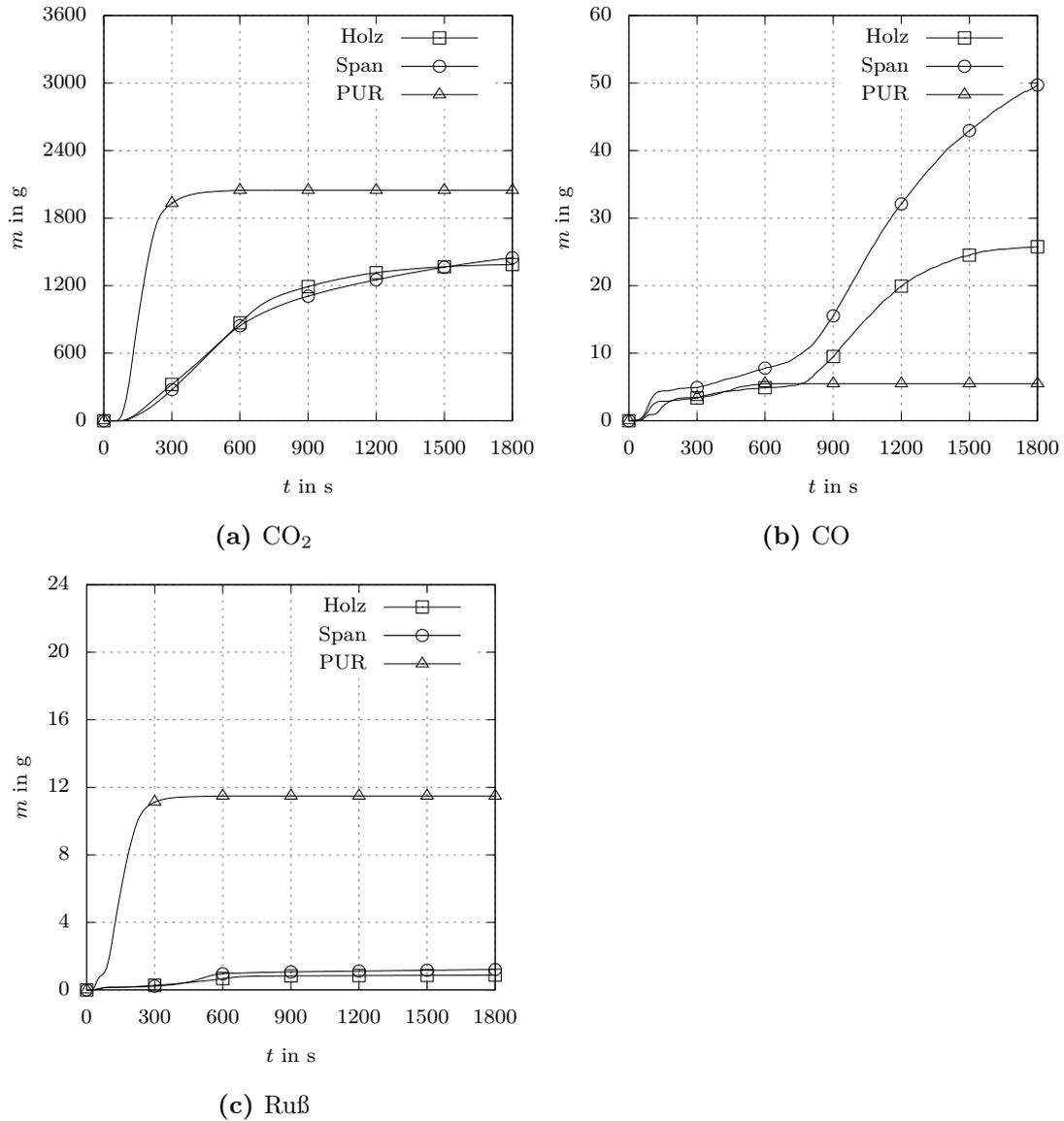
<sup>6</sup>Die Werte der Einzelmessungen sowie die daraus gebildeten arithmetischen Mittelwerte sind dem Anhang C, Abbildung C.27 bis Abbildung C.29 und Tabelle C.6 (Zündquelle), Abbildung C.30 bis Abbildung C.32 und Tabelle C.7 (Versuchskörper aus Holz), Abbildung C.33 bis Abbildung C.35 und Tabelle C.8 (Versuchskörper aus Span) sowie Abbildung C.36 bis Abbildung C.38 und Tabelle C.9 (Versuchskörper aus PUR) zu entnehmen.



**Abbildung 4.18:** Experimentelle Bestimmung des in der abgesaugten Luft im Messabschnitt enthaltenen Stoffmengenanteils (a) des  $\text{CO}_2$  und (b) des  $\text{CO}$  sowie (c) der Lichtschwächung mittels SBI-Versuchsapparatur bei Verbrennung der Versuchskörper aus Holz, Span und PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abbildung 4.19:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus Holz, Span und PUR bestehenden Versuchskörper (Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stofffreisetzungsraten für (a) CO<sub>2</sub>, (b) CO und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abbildung 4.20:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus Holz, Span und PUR bestehenden Versuchskörper (Versuchskörpermasse: 1 kg) gesamten ausgehenden Stofffreisetzung für (a) CO<sub>2</sub>, (b) CO und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.

### 4.3.5 Vergleich der Materialzusammensetzungen

Der Vergleich der summierten HRR der Materialzusammensetzungen zeigt, dass gegenwärtige Materialzusammensetzungen (MZ 2 bis MZ 4) eine höhere maximale HRR aufweisen als die ältere Materialzusammensetzung (MZ 1) (Abbildung 4.21). Gleichzeitig treten diese maximalen HRR früher auf.

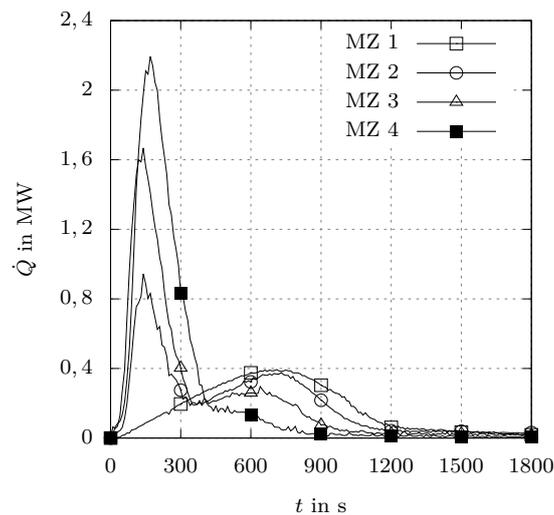


Abbildung 4.21: Berechnete HRR der definierten Materialzusammensetzungen.

Ebenso weisen gegenwärtige Materialzusammensetzungen eine höhere effektive Verbrennungswärme auf (Tabelle 4.5). Darüber hinaus wurde der Einfluss des Anteils polymerer Werkstoffe, hier in Form von PUR, quantifiziert. Mit zunehmendem PUR-Anteil (Vergleich der Materialzusammensetzungen MZ 1 und MZ 4) steigt die effektive Verbrennungswärme um 66 % auf 26 284,50 kJ/kg. Bezogen auf eine flächenspezifische Masse von 20 kg (Abbildung 4.1) ergeben sich die ebenfalls in Tabelle 4.5 dargestellten Brandlastdichten in Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung.

Der Vergleich der summierten Stoffausbeuten der Materialzusammensetzungen zeigt weiterhin, dass gegenwärtige Materialzusammensetzungen höhere Stoffausbeuten in Bezug auf CO<sub>2</sub>, CO und Ruß aufweisen als die ältere Materialzusammensetzung (Tabelle 4.6). Eine Ausnahme bildet der Vergleich der Materialzusammensetzungen MZ 1 und MZ 4 beim CO, da der Einfluss des Polyurethanes in der Materialzusammensetzung MZ 4 mit 75 % zwar dominiert, jedoch insgesamt eine stoffspezifisch niedrigere Ausbeute an CO aufweist als Holz (Tabelle 4.4).

**Tabelle 4.5:** Berechnete effektive Verbrennungswärmen sowie Brandlastdichten der definierten Materialzusammensetzungen.

Material- zusammen- setzung	Anteil Holz	Anteil Span	Anteil PUR	effektive Ver- brennungs- wärme	flächen- spezifische Masse	Brand- last- dichte
-	in %	in %	in %	$\Delta H_{c,eff}$ in kJ/kg	$m''$ in kg/m <sup>2</sup>	$q_R$ in MJ/m <sup>2</sup>
MZ 1	100	0	0	15 853,00	20	317,06
MZ 2	0	75	25	19 913,54	20	398,27
MZ 3	0	50	50	23 099,02	20	461,98
MZ 4	0	25	75	26 284,50	20	525,69

**Tabelle 4.6:** Berechnete Stoffausbeuten der definierten Materialzusammensetzungen.

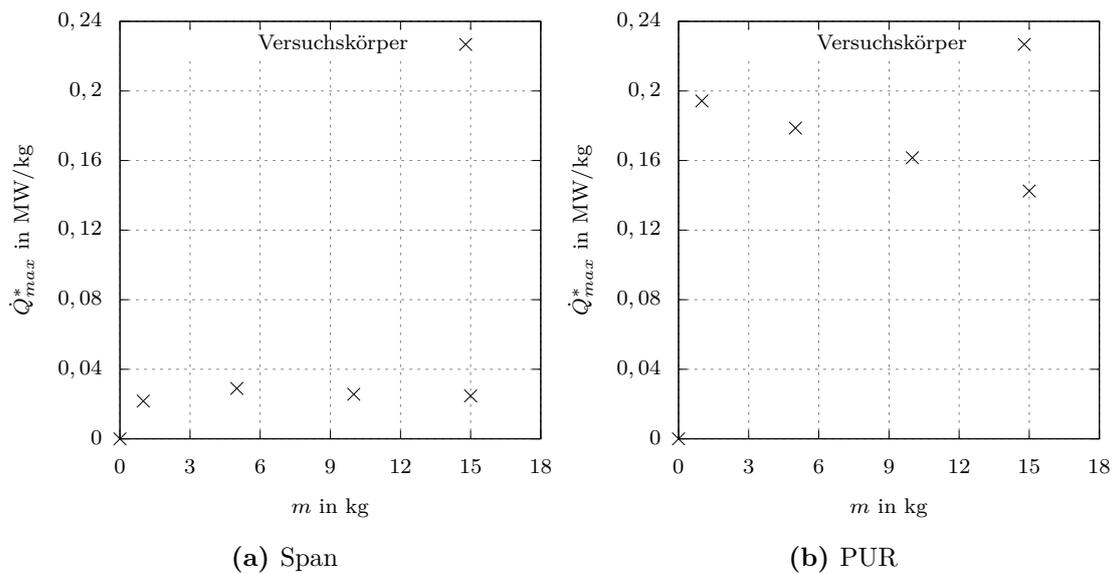
Material- zusammen- setzung	Anteil Holz	Anteil Span	Anteil PUR	$Y_{CO_2}$	$Y_{CO}$	$Y_{Ru\beta}$
-	%	%	%	$\frac{g_{CO_2}}{g_{VK}}$	$\frac{g_{CO}}{g_{VK}}$	$\frac{g_{Ru\beta}}{g_{VK}}$
MZ 1	100	0	0	1,5051	0,0279	0,0009
MZ 2	0	75	25	1,7407	0,0415	0,0042
MZ 3	0	50	50	1,9299	0,0297	0,0071
MZ 4	0	25	75	2,1191	0,0180	0,0100

### 4.3.6 Skalierbarkeit der Untersuchungsergebnisse

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Versuchskörperaufbauten und -massen wurde festgestellt, dass die maximale HRR von Versuchskörpern aus PUR mit zunehmender Versuchskörpermasse nicht proportional steigt (Abbildung 4.22). Die maximale HRR von Versuchskörpern aus Span steigt hingegen proportional mit zunehmender Versuchskörpermasse. Der Proportionalitätsfaktor beträgt 0,025 27 MW/kg. In den Grenzen von 1 kg bis 15 kg kann die maximale HRR  $\dot{Q}_{max,Span}(t)$  näherungsweise nach Gleichung 4.1 bestimmt werden.

$$\dot{Q}_{max,Span}(t) = 0,02527 \cdot m_{VK,Span} \quad (4.1)$$

0,025 27 ist der Proportionalitätsfaktor in MW/kg.  $m_{VK,Span}$  ist die Versuchskörpermasse in kg.



**Abbildung 4.22:** Zusammenhänge zwischen den über die Versuchskörpermasse normierten maximalen HRR der Versuchskörper aus (a) Span und (b) PUR (Versuchskörpermasse: 5 kg, 10 kg und 15 kg) in Abhängigkeit von der jeweiligen Versuchskörpermasse.

## 4.4 Schlussfolgerungen

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Stoff- und Energiefreisetzung bei Bränden in Wohnungen wurden Materialzusammensetzungen definiert und experimentell untersucht. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass gegenwärtige stoffliche Zusammensetzungen in Einrichtungsgegenständen aufgrund ihrer höheren maximalen HRR und ihrer höheren effektiven Verbrennungswärme zu einer schnelleren Brandentstehung beitragen. Aufgrund der zum Teil höheren Stoffausbeuten ist anzunehmen, dass Einsatztoleranzwerte (vgl. Kapitel 6.2.9) im Brandfall früher erreicht werden als bei der Verbrennung von Einrichtungsgegenständen mit älterer stofflicher Zusammensetzungen.

# KAPITEL 5

---

## Experimentelle Untersuchung der Brandentstehung

Auf der Grundlage des in Kapitel 3 definierten repräsentativen Brandszenarios für Wohnungen sowie der in Kapitel 4 beschriebenen Untersuchungsergebnisse wurden originalmaßstäbliche Brandversuche an einem Einrichtungsgegenstand (Sessel) mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung durchgeführt. In Abhängigkeit von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen wurde die Brandentstehung in einer Untersuchungsgeometrie und in der SBI-Versuchsapparatur untersucht. Die Untersuchungen wurden auszugsweise in [11, 79–83] veröffentlicht.

### 5.1 Untersuchungsziel

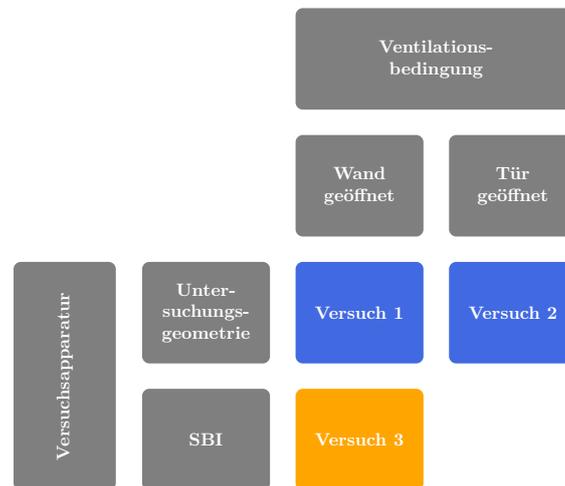
Die in Kapitel 4 dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die stoffliche Zusammensetzung in gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen zu höheren HRR führte als die stoffliche Zusammensetzung in älteren Einrichtungsgegenständen. Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung ist die Beantwortung der Fragestellung, wie sich die gegenwärtige stoffliche Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen auf den zeitlichen Verlauf der Brandentstehung in Wohnungen auswirkt. Die Untersuchung erfolgte am Beispiel eines gegenwärtigen Sessels unter Berücksichtigung des in Kapitel 3 definierten repräsentativen Brandszenarios. In Abhängigkeit von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen wurden neben MLR und HRR auch Rauchgastemperaturen experimentell bestimmt. Darüber hinaus wurden normativen Ansätze zur Beschreibung von HRR mit den Untersuchungsergebnissen verglichen.

### 5.2 Untersuchungsmethode und -gegenstand

#### 5.2.1 Experimentelles Design

Die MLR des Sessels sowie die sich einstellenden Rauchgastemperaturen wurden in originalmaßstäblichen Versuchen in einer für die Untersuchung konzipierten Untersuchungsgeometrie in Abhängigkeit von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen bestimmt. Die

Untersuchung des Einflusses der Ventilationsbedingungen erfolgte in Form von einer Wand- (ventilierte Abbrandbedingungen) und Türöffnung (unterventilierte Abbrandbedingungen). Die Bestimmung der HRR bei gleichzeitiger Messung der Versuchskörpermasse erfolgte in der SBI-Versuchsapparatur unter ventilierten Abbrandbedingungen (Abbildung 5.1)<sup>1</sup>. Zur ausreichenden Erfassung der MLR und HRR wurde die Versuchsdauer aller Versuche auf 1800 s begrenzt.



**Abbildung 5.1:** Experimentelles Design zur Untersuchung des Einflusses von Ventilationsbedingungen auf die Brandentstehung am Beispiel eines Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung.

## 5.2.2 Versuchsapparaturen

**Untersuchungsgeometrie (Versuch 1 und 2)** Zur Bestimmung der MLR sowie der sich einstellenden Rauchgastemperaturen des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung wurde eine kubische Untersuchungsgeometrie konzipiert und in Holzständerbauweise auf einem Sandboden errichtet (Abbildung 5.2). Die lichten Innenmaße betragen  $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$  (Länge  $\times$  Breite  $\times$  Höhe). Die Grundfläche des Raumes entsprach einem Flächeninhalt von  $6,25\text{ m}^2$  und das Raumvolumen betrug  $15,625\text{ m}^3$  (Abbildung 5.3).

Die Rauminnenseiten wurden mit jeweils zwei übereinanderliegenden handelsüblichen Gipskartonplatten<sup>2</sup> verkleidet (Plattenstärke:  $0,125\text{ m}$ ).

<sup>1</sup>Die Zusammenfassung des experimentellen Designs ist dem Anhang D, Tabelle D.1 zu entnehmen.

<sup>2</sup>Die bauphysikalischen Eigenschaften der Gipskartonplatten sind dem Anhang D, Tabelle D.2 zu entnehmen.



**Abbildung 5.2:** Untersuchungsgeometrie (Versuch 1: Wandöffnung) zur Untersuchung des Einflusses von Ventilationsbedingungen auf die Brandentstehung am Beispiel eines Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung.

Die Variation der Ventilationsöffnungen erfolgte in Form von einer Wand- (Versuch 1) und Türöffnung (Versuch 2). Die Fläche der Wandöffnung betrug  $6,25 \text{ m}^2$ . Die der Türöffnung war ca. um ein Vierfaches kleiner und betrug  $1,68 \text{ m}^2$ . Sie war mittig angeordnet und simuliert eine Tür. Gemäß den Anforderungen an einflügelige Zimmertüren im Wohnungsbau nach [84, 85] betrug die lichte Durchgangshöhe  $2,10 \text{ m}$  und lichte Durchgangsbreite  $0,8 \text{ m}$ .

**SBI-Versuchsapparatur (Versuch 3)** Die experimentelle Bestimmung der HRR bei gleichzeitiger Bestimmung der MLR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung erfolgte in der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen SBI-Versuchsapparatur.

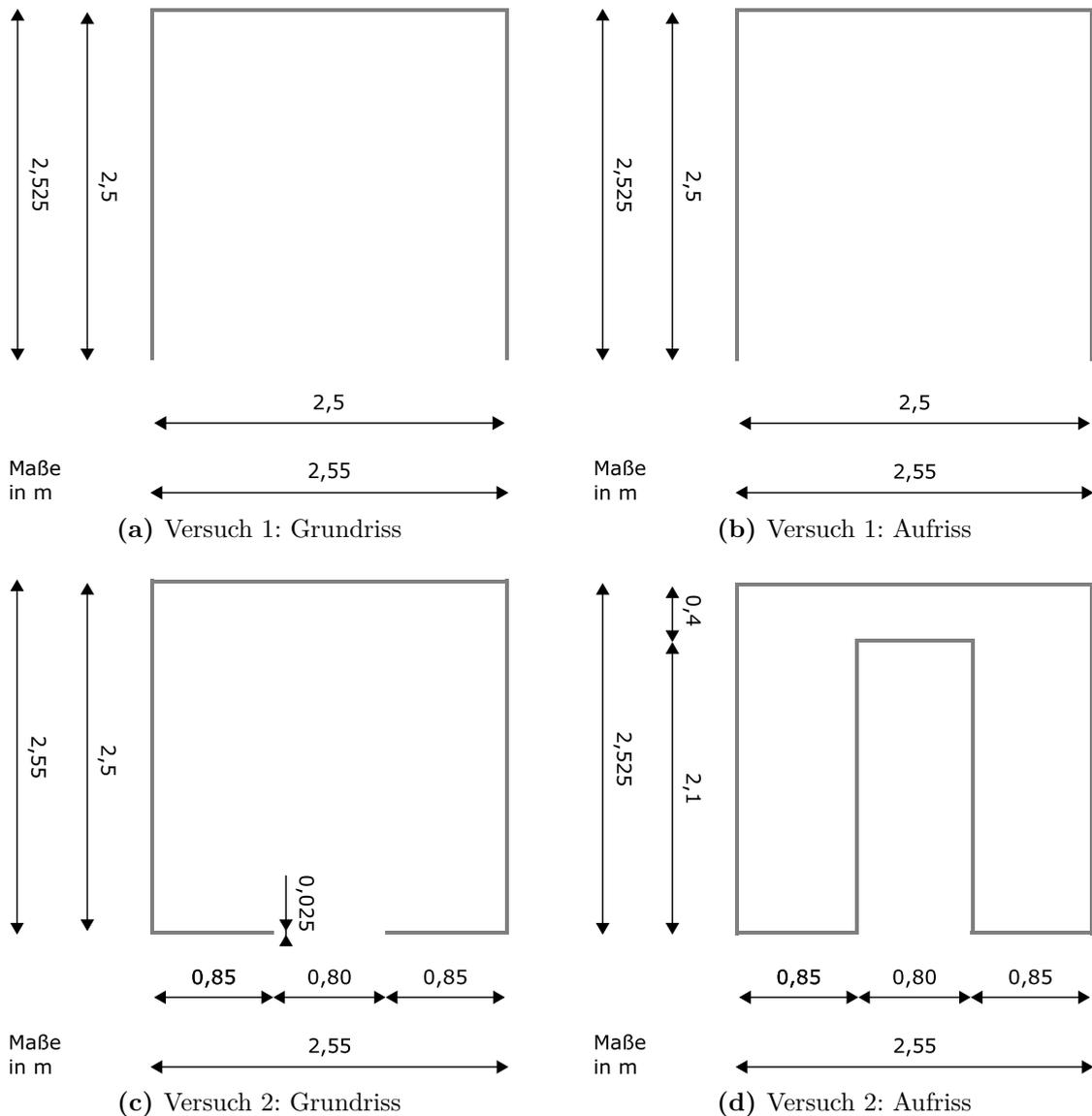
### 5.2.3 Versuchskörper und Zündbedingungen

Als Versuchskörper wurde ein Sessel als Repräsentant eines Einrichtungsgenstandes mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung herangezogen (vgl. Kapitel 6.2.4). Zur Minimierung weiterer stofflicher Einflüsse auf das Brandverhalten wurden alle übrigen brennbaren Materialien sowohl in der Untersuchungsgeometrie (Versuch 1 und 2) als auch in der SBI-Versuchsapparatur (Versuch 3) entfernt.

Um eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu ermöglichen wurden die Versuche 1, 2 und 3 unter Berücksichtigung identischer Zündbedingungen wie Zündort und -quelle durchgeführt. Dabei wurden die Zündbedingungen zuvor an einem baugleichen Sessel erprobt<sup>3</sup>.

---

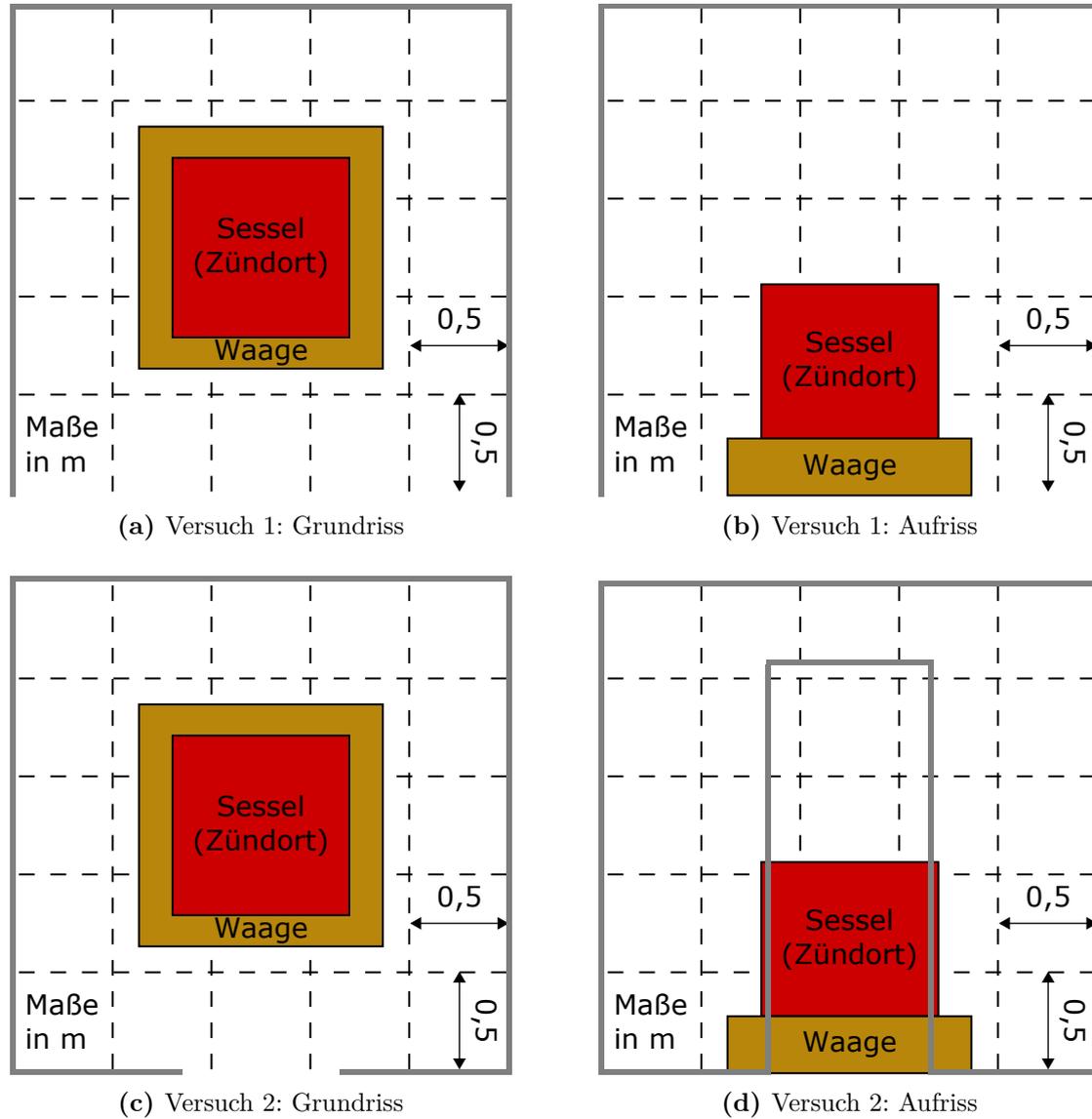
<sup>3</sup>Die Untersuchung ist dem Anhang D.3 zu entnehmen.



**Abbildung 5.3:** Aufbau der Untersuchungsgeometrien zur Untersuchung des Einflusses von Ventilationsbedingungen auf die Brandentstehung am Beispiel eines Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung).

In der Untersuchungsgeometrie wurde der Versuchskörper mittig bezogen auf die Grundfläche des Raumes angeordnet (Abbildung 5.4). Zum Schutz der Waage vor Wärmeübertragung durch thermische Strahlung und Wärmeleitung sowie vor herabfallenden Teilen wurde zwischen Waage und Versuchskörper eine auf Mineralfaserwolle basierende, nicht brennbare Dämmung und eine aus Stahlblech bestehende Brandwanne installiert. Aufgrund der Unterkonstruktion stellte sich ein Abstand zwischen Versuchskörper und

Boden von 0,3 m ein. In der SBI-Versuchsapparatur wurde der Versuchskörper zunächst mittig auf dem Probenträgerwagen positioniert und dann um  $45^\circ$  gedreht um homogene Anströmbedingungen zu gewährleisten (Abbildung 5.5a). Aufgrund der Unterkonstruktion stellte sich ebenfalls ein Abstand zwischen Versuchskörper und Boden des Probenträgerwagens von 0,3 m ein.



**Abbildung 5.4:** Anordnung der Versuchskörper in den Untersuchungsgeometrien zur Untersuchung des Einflusses von Ventilationsbedingungen auf die Brandentstehung am Beispiel eines Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung).



(a) Anordnung des Sessels



(b) Anordnung der Zündquelle

**Abbildung 5.5:** Versuch 3: (a) Anordnung des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in der SBI-Versuchsapparatur und (b) Lage der Zündquelle auf dem Sessel.

Die Entzündung des Sessels erfolgte durch die in Kapitel 2.1.4 beschriebene Zündquelle. Die Brandbeanspruchung erfolgte gemäß Prüfverfahren im Übergangsbereich zwischen der Sitzfläche sowie einem Rücken- oder Seitenteil des Versuchskörpers. Dazu wurde die Zündquelle auf der Sitzoberfläche des jeweiligen Sessels mittig ausgerichtet und entsprechend der Sesselgeometrie soweit in Richtung Rückenlehne verschoben, bis sich dieses mit der Oberkante der Zündquelle vollständig berührte (Abbildung 5.5b).

Die Versuche 1 und 2 wurden bei näherungsweise gleichen Klimabedingungen durchgeführt (Tabelle 5.1). Die Klimabedingungen während des Versuches 3 entsprachen den in [21] beschriebenen Klimabedingungen zur Untersuchung des Brandverhaltens von Bauprodukten. Alle Versuchskörper wurden bis unmittelbar vor dem jeweiligen Versuchsbeginn dem Klima zur Konditionierung von Bauprodukten gemäß [26] ausgesetzt (Tabelle 2.1).

**Tabelle 5.1:** Klimabedingungen der Umgebung vor Beginn der Versuche 1, 2 und 3.

Versuch	Versuchs- apparatur	Umgebungs- temperatur	relative Luft- feuchtigkeit	Luft- druck
-	-	$\vartheta_U$ in °C	$\varphi_U$ in %	$p_U$ in Pa
1	Untersuchungsgeometrie	6,4 <sup>a</sup>	70 <sup>a</sup>	100 710 <sup>b</sup>
2	Untersuchungsgeometrie	5,6 <sup>a</sup>	70 <sup>a</sup>	100 740 <sup>b</sup>
3	SBI-Versuchsapparatur	20,2 <sup>a</sup>	32 <sup>a</sup>	102 431 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>eigene Messung, <sup>b</sup>Deutscher Wetterdienst [86]

### 5.2.4 Modellbasierte HRR

Neben den in Kapitel 2.1.2 beschriebenen experimentellen Methoden zur Bestimmung der HRR kommen im Rahmen von Berechnungsverfahren auch normativ geregelte Modelle zur Beschreibung der HRR zum Einsatz.

Danach wird der zeitliche Verlauf der HRR während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase nach [87] mittels Gleichung 5.1 (auch  $t^2$ -Brandmodell, engl. Power-Law Fire Growth) beschrieben (Abbildung 5.6). Das Modell deckt nach [12, 88] eine Vielzahl von raumnutzungsabhängigen und materialspezifischen HRR ab und findet sowohl im Rahmen internationaler Bemessungs- und Berechnungsgrundlagen nach [89–91] als auch im nationalen Berechnungsverfahren zur Brandeinwirkung auf Tragwerke nach [92] Anwendung.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t - t_0)^2 \quad (5.1)$$

$\dot{Q}$  ist die HRR im Raum der Brandentstehung in kW.  $\alpha$  in  $\text{kW}/\text{s}^2$  beschreibt den raumnutzungsabhängigen Brandentwicklungsfaktor (engl. fire-growth coefficient).  $t$  ist die gesamte Branddauer in s und  $t_0$  die Dauer der Zünd- und Schwelbrandphase in s.

Nach [89] können für den Brandentwicklungsfaktor  $\alpha$  folgende raumnutzungsabhängige Werte angenommen werden (Tabelle 5.2).

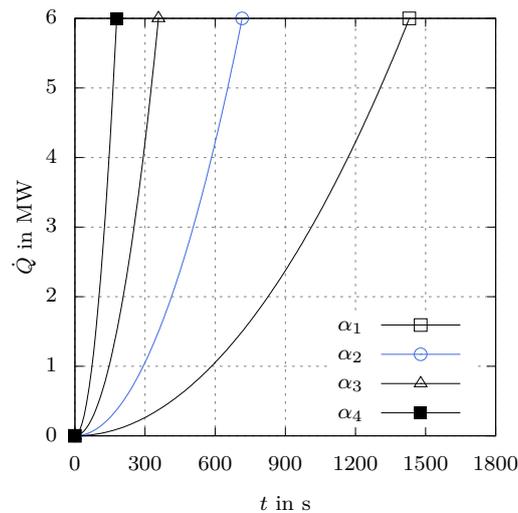
**Tabelle 5.2:** Raumnutzungsabhängige Brandentwicklungsfaktoren zur Berechnung der HRR während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase mittels  $t^2$ -Brandmodell.

Brandentwicklung	Raumnutzung	Brandentwicklungsfaktor
-	-	$\alpha$ in $\text{kW}/\text{s}^2$
langsam	Gemäldegalerie	$\alpha_1 = 0,00293$
mittel	Wohnung, Büro, Hotelzimmer	$\alpha_2 = 0,01172$
schnell	Geschäft	$\alpha_3 = 0,04690$
sehr schnell	Industrielager, Technikraum	$\alpha_4 = 0,18760$

### 5.2.5 Messtechnik und Messstellen

**Rauchgastemperatur** Die Temperaturmessung erfolgte mittels Mantelthermoelementen des Typs K (1,5 mm) nach [93]. Das Messprinzip ist [94] zu entnehmen. Das Messintervall betrug 10 s.

Die sich einstellenden Rauchgastemperaturen wurden sowohl innerhalb der Untersuchungsgeometrie als auch an deren Grenzen an insgesamt acht Stellen erfasst (Abbildung

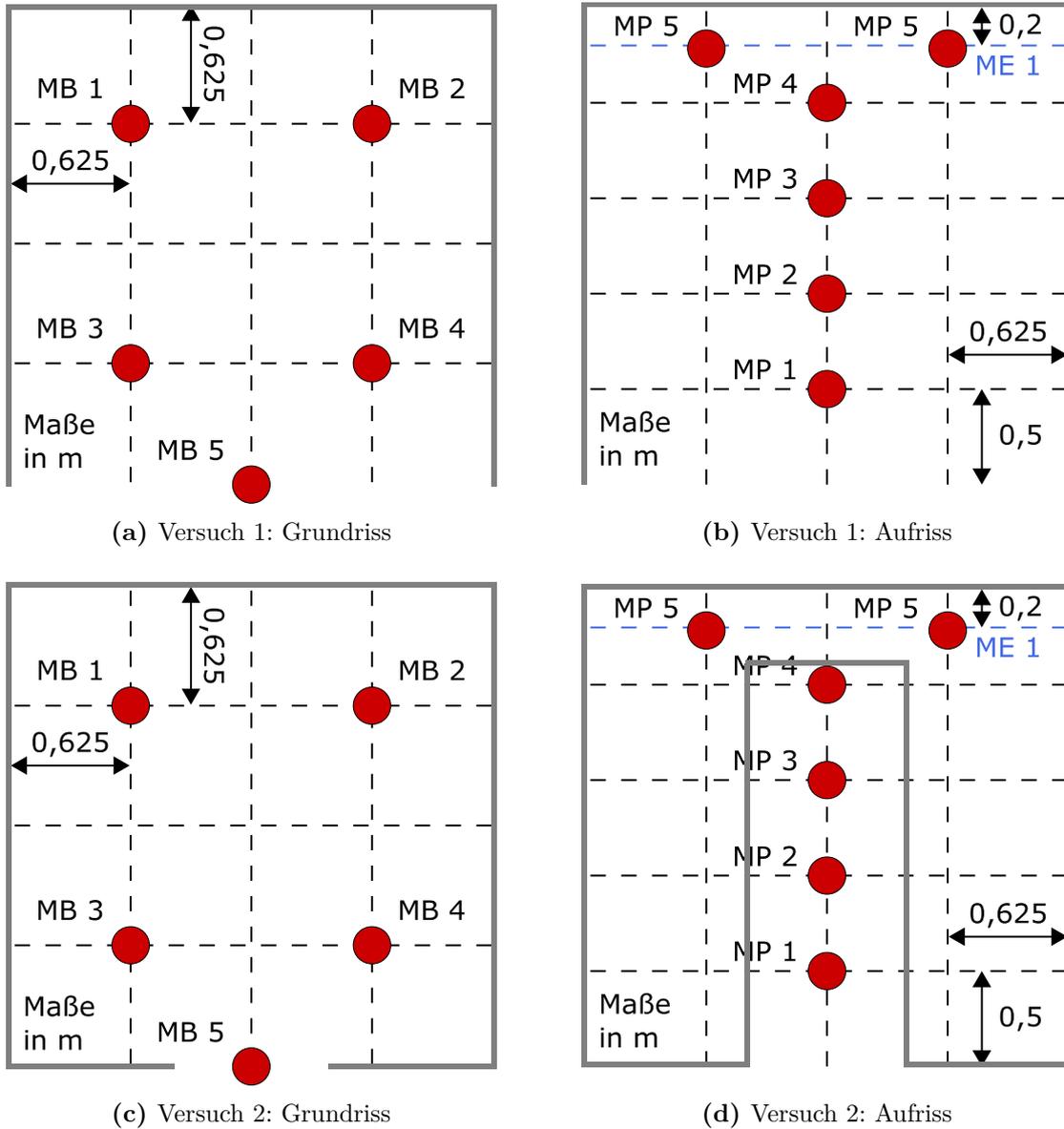


**Abbildung 5.6:** Für Berechnungsverfahren herangezogene raumnutzungsabhängige HRR auf der Grundlage des  $t^2$ -Brandmodells in Abhängigkeit von der Zeit zur Beschreibung des Brandverlaufs während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase. Blau: mittlere Brandentwicklung (Wohnung, Büro, Hotelzimmer).

5.7). Die horizontale Lagebeschreibung (X-Y-Ebene) der Mantelthermoelemente erfolgt mittels Messbäumen (MB), die vertikale (Z-Ebene) mittels Messpunkten (MP). Die vier auf gleicher Höhe im deckennahen Bereich angeordneten Mantelthermoelemente wurden als Messebene 1 (ME 1) zusammengefasst. Der arithmetische Mittelwert der in diesen vier Messpunkten gemessenen Rauchgastemperaturen ergibt die arithmetisch gemittelte Rauchgastemperatur der Messebene. Vier weitere Mantelthermoelemente wurden in einem vertikalen Abstand von 0,5 m, beginnend am Boden, mittig der Wand- bzw. Türöffnung angeordnet.

**Rauchgaskonzentration** Die Messung der im Rauchgas enthaltenen Konzentrationen von  $O_2$ ,  $CO_2$  und  $CO$  erfolgte in der SBI-Versuchseinrichtung (Versuch 3) mittels der zur Versuchsanordnung dazugehörigen Gasanalysegeräte. Die Gasentnahmesonde des Gasanalysegerätes war im Messabschnitt angeordnet (Abbildung 2.4). Das Messintervall betrug 3 s.

**MLR** Die Bestimmung der MLR zur Berechnung der HRR erfolgte in den Versuchen 1, 2 und 3 mit elektronischen Waagen. Das Messintervall betrug in den Versuchen 1 und 2 10 s und im Versuch 3 1 s.



**Abbildung 5.7:** Anordnung der Temperaturmessstellen in den Untersuchungsgeometrien zur Untersuchung des Einflusses von Ventilationsbedingungen auf die Brandentstehung am Beispiel eines Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung).

## 5.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungsergebnisse werden hinsichtlich Flammen- und Rauchgasausbreitung, HRR und Rauchgastemperaturen<sup>4</sup> ausgewertet und vergleichend dargestellt.

### 5.3.1 Flammen- und Rauchgasausbreitung

Sowohl während des Versuches 1 als auch 2 kam es zu einer erfolgreichen Entzündung des jeweiligen Sessels durch die verwendete Zündquelle. Im Versuch 2 wurde sowohl eine schnellere horizontale Flammenausbreitung auf der Sitzfläche als auch eine schnellere vertikale Flammenausbreitung auf den innenseitigen Lehnen beobachtet. Des Weiteren entzündeten sich in diesem Versuch 480 s nach Zündbeginn die Rauchgase (Abbildung 5.8)<sup>5</sup>. Beide Sessel erloschen innerhalb der Versuchsdauer selbstständig.

### 5.3.2 HRR

Die Berechnung der in den Versuchen 1 und 2 vom Sessel mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung ausgehenden HRR erfolgte mit der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Massenabbrandmethode und gliederte sich in drei Schritte:

1. Experimentelle Bestimmung der Massen in der Untersuchungsgeometrie (Versuch 1 und 2) und Berechnung der MLR,
2. Experimentelle Bestimmung des gesamten Massenabbrandes und der THR in der SBI-Versuchsapparatur (Versuch 3). Berechnung der effektiven Verbrennungswärme nach Gleichung 2.11.
3. Berechnung der HRR aus den MLR (Schritt 1) und der effektiven Verbrennungswärme (Schritt 2) nach Gleichung 2.7.

**MLR** Bereits 180 s nach Zündbeginn stellte sich im Versuch 2 eine höhere MLR ein (Abbildung 5.9). Während des Versuches 1 wurde nach 530 s eine maximale MLR von 0,103 kg/s erreicht. Im Versuch 2 trat die maximale MLR früher ein und war um 22 % höher als im Versuch 1. Sie betrug nach 480 s 0,126 kg/s (Tabelle 5.3).

---

<sup>4</sup>Die in der ME 1 einzelnen, gemessenen Rauchgastemperaturen sowie der daraus gebildete arithmetische Mittelwert, welcher zur weiteren Auswertung der Versuche herangezogen wird, sind dem Anhang D, Abbildung D.5 zu entnehmen.

<sup>5</sup>Die Flammen- und Rauchgasausbreitung im Verlauf der gesamten Versuchszeit ist dem Anhang D, Abbildung D.3 (Versuch 1: Wandöffnung) bzw. Abbildung D.4 (Versuch 2: Türöffnung) zu entnehmen.



(a) Versuch 1: 0 s



(b) Versuch 2: 0 s



(c) Versuch 1: 480 s

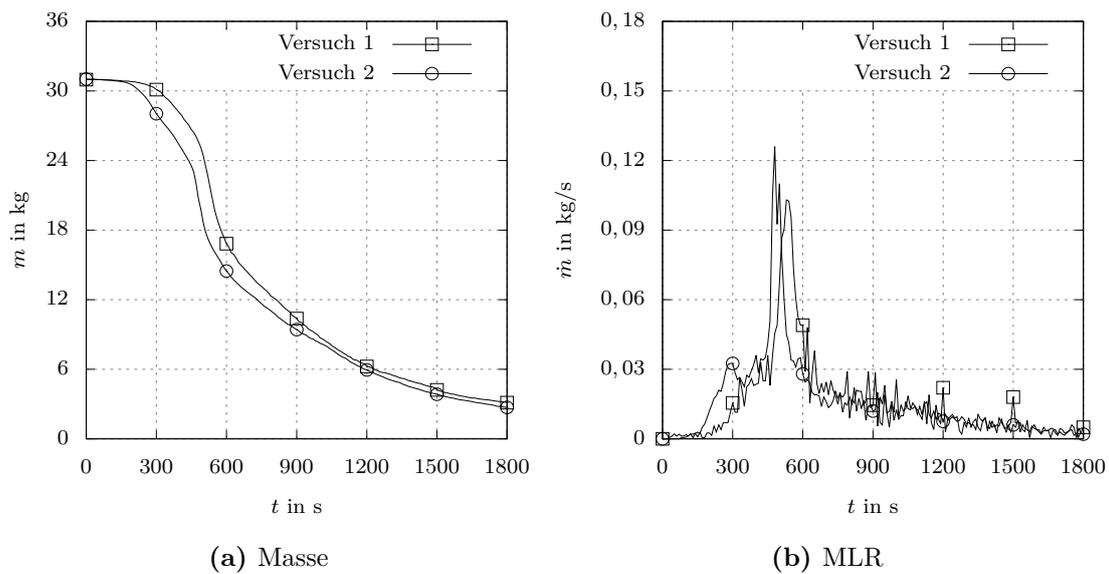


(d) Versuch 2: 480 s

**Abbildung 5.8:** Flammen- und Rauchgasausbreitung in der Untersuchungsgeometrie durch den Brand des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

**Tabelle 5.3:** Vergleich der maximalen und arithmetisch gemittelten MLR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

Versuch	maximale MLR	Zeit	arithmetisch gemittelte MLR
-	$\dot{m}_{max}(t)$ in kg/s	$t$ in s	$\bar{m}_{1800}(t)$ in kg/s
1	0,103	530	0,0154
2	0,126	480	0,0156

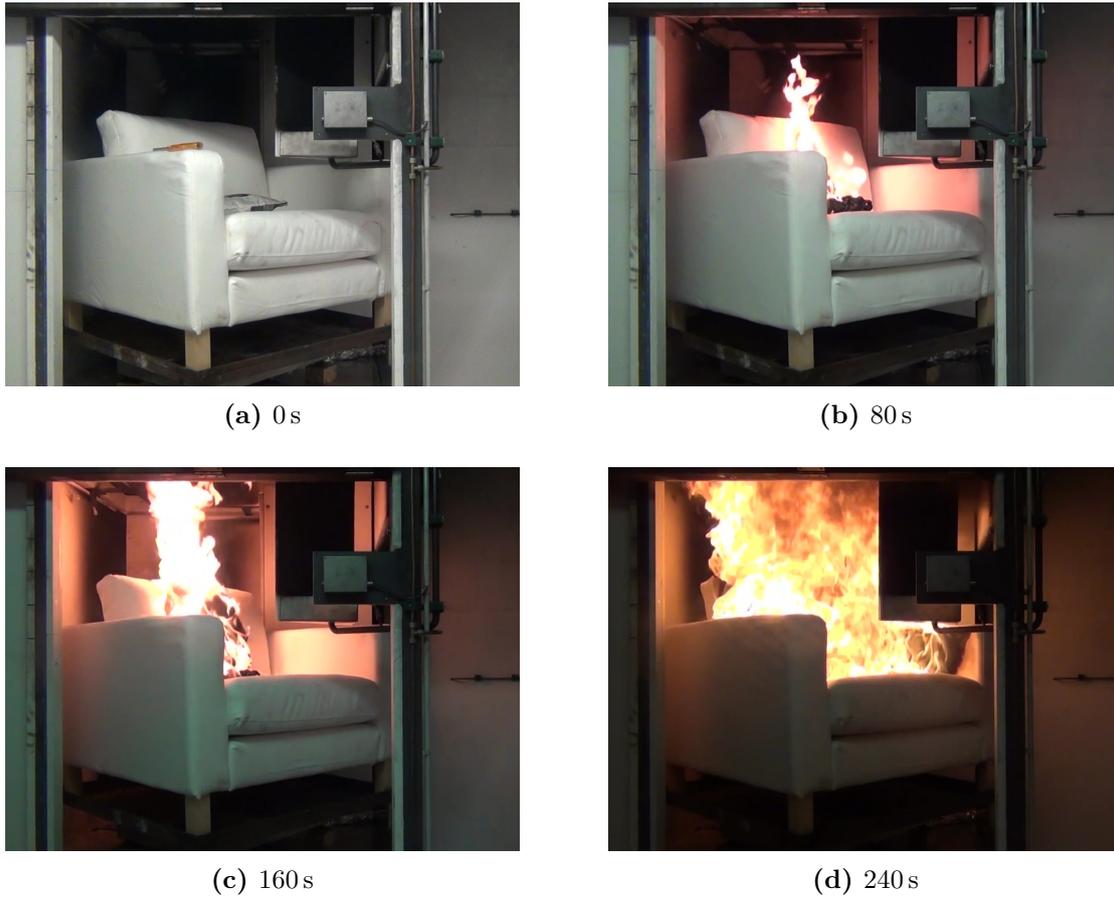


**Abbildung 5.9:** (a) Experimentelle Bestimmung der Masse und (b) Berechnung der MLR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in der Untersuchungsgeometrie in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

**Effektive Verbrennungswärme** Um Beschädigungen<sup>6</sup> der Versuchsapparatur vorzubeugen, wurde der Versuch 3 240 s nach Zündbeginn abgebrochen und der Versuchskörper gelöscht (Abbildung 5.10). Zu diesem Zeitpunkt wurde eine MLR von 0,0208 kg/s, eine HRR von 575,56 kW sowie eine THR von 18,38 MJ erreicht (Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12). Aus der in der SBI-Versuchsapparatur bestimmten THR sowie dem im selbigen Versuch bestimmten gesamten Massenabbrand wurde die effektive Verbrennungswärme nach Gleichung 2.11 berechnet. Sie beträgt 240 s nach Zündbeginn 20 619,49 kJ/kg.

**HRR** Bereits 180 s nach Zündbeginn stellte sich (analog zu den berechneten MLR) im Versuch 2 eine höhere HRR ein (Abbildung 5.13). Während des Versuches 1 wurde nach 530 s eine maximale HRR von 2,12 MW erreicht. Im Versuch 2 trat die maximale MLR früher ein und war um 22 % höher als im Versuch 1. Sie betrug nach 480 s 2,60 MW (Tabelle 5.4). Der Vergleich der berechneten HRR aus den Versuchen 1 und 2 mit der durch das  $t^2$ -Brandmodell berechneten HRR (vgl. Kapitel 5.2.4) zeigt, dass letztere zu jedem Zeitpunkt höher ist und das Modell die experimentellen Untersuchungen abdeckt.

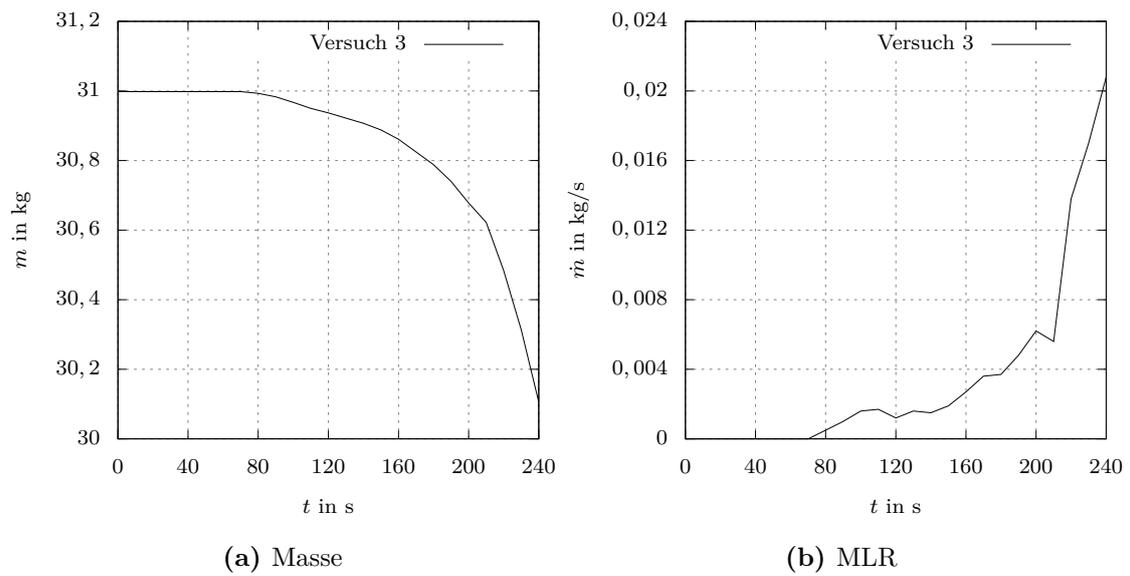
<sup>6</sup>Nach [21] können unter anderem folgende Bedingungen zur Beschädigung der Versuchsapparatur führen: a) eine HRR des Versuchskörpers  $\geq 350$  kW oder b) eine Temperatur im Messrohr  $\geq 400$  °C. Der Grenzwert von 350 kW wurde 228 s nach Versuchsbeginn überschritten.



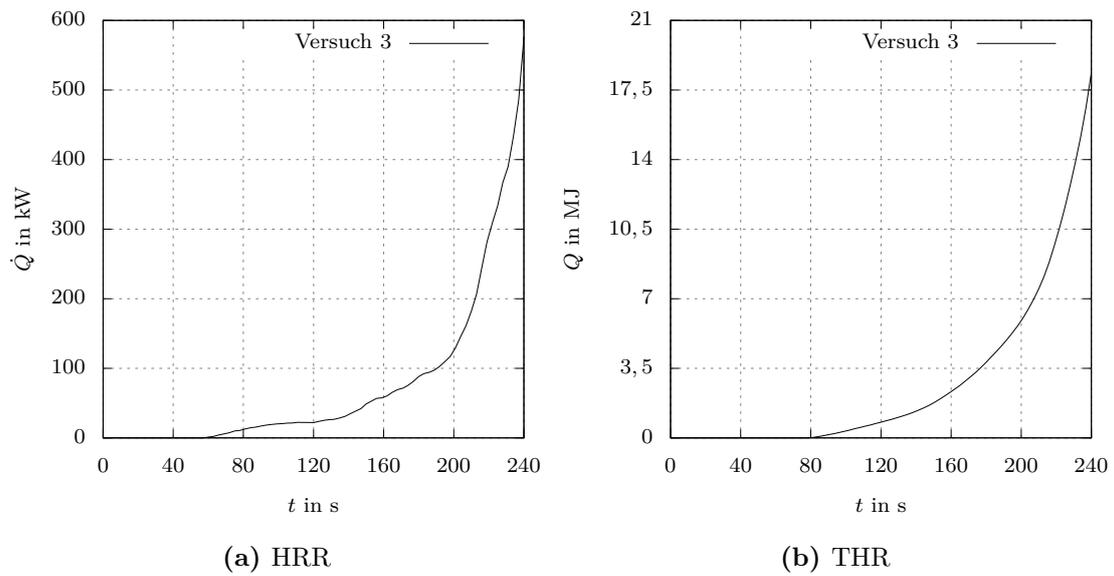
**Abbildung 5.10:** Flammenausbreitung auf dem Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit (Versuch 3).

**Tabelle 5.4:** Vergleich der maximalen und arithmetisch gemittelten HRR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

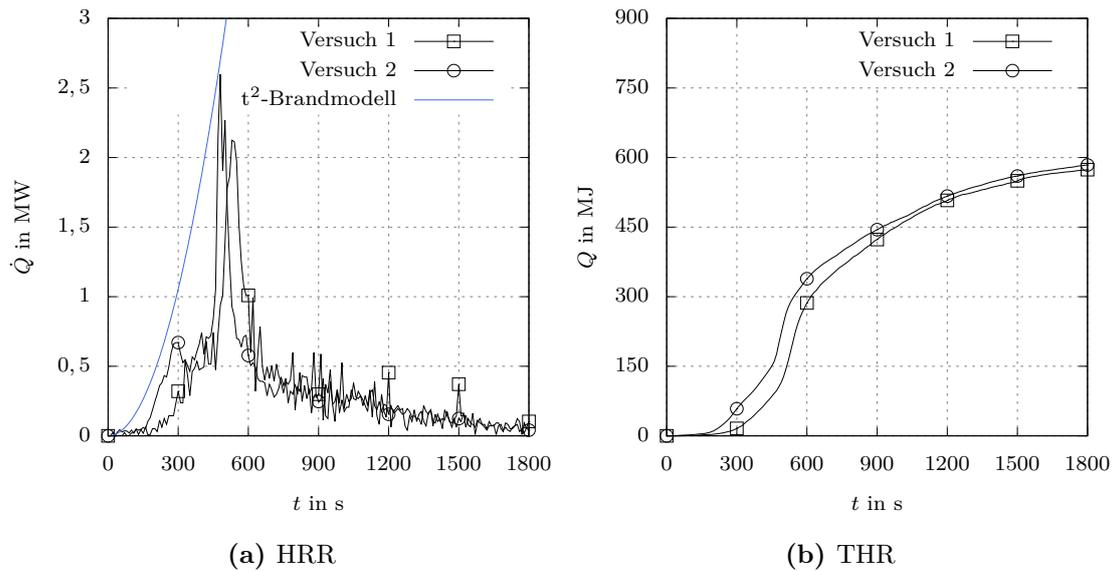
Versuch	max. HRR	Zeit	arithmetisch gemittelte HRR
-	$\dot{Q}_{max}(t)$ in MW	$t$ in s	$\bar{Q}_{1800}(t)$ in MW
1	2,124	530	0,317
2	2,598	480	0,323



**Abbildung 5.11:** Versuch 3: (a) experimentelle Bestimmung der Masse und (b) Berechnung der MLR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abbildung 5.12:** Versuch 3: (a) experimentelle Bestimmung der HRR und (b) der THR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.



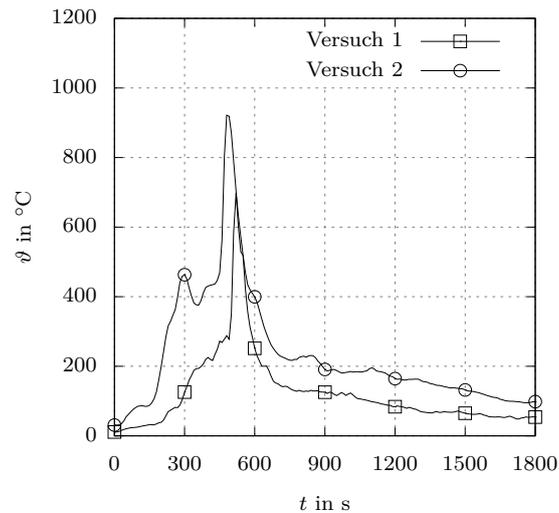
**Abbildung 5.13:** Berechnete (a) HRR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung im Vergleich zur HRR, die mit dem  $t^2$ -Brandmodell berechnet wurde und (b) THR in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

### 5.3.3 Rauchgastemperaturen

Bereits kurz nach Zündbeginn stellten sich im Versuch 2 höhere Rauchgastemperaturen in der ME 1 ein (Abbildung 5.14). Während des Versuches 1 wurde nach 530 s eine Maximaltemperatur von 697 °C erreicht. Im Versuch 2 trat die Maximaltemperatur früher ein und war um 32 % höher als im Versuch 1. Sie betrug nach 480 s 921 °C (Tabelle 5.5). Die im MB 5 (Öffnung) gemessenen Maximaltemperaturen nahmen mit der Messhöhe ab. Die Werte im Versuch 2 waren höher (Abbildung 5.15).

**Tabelle 5.5:** Vergleich der in der ME 1 der Untersuchungsgeometrie arithmetisch gemittelten maximalen Rauchgastemperaturen in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

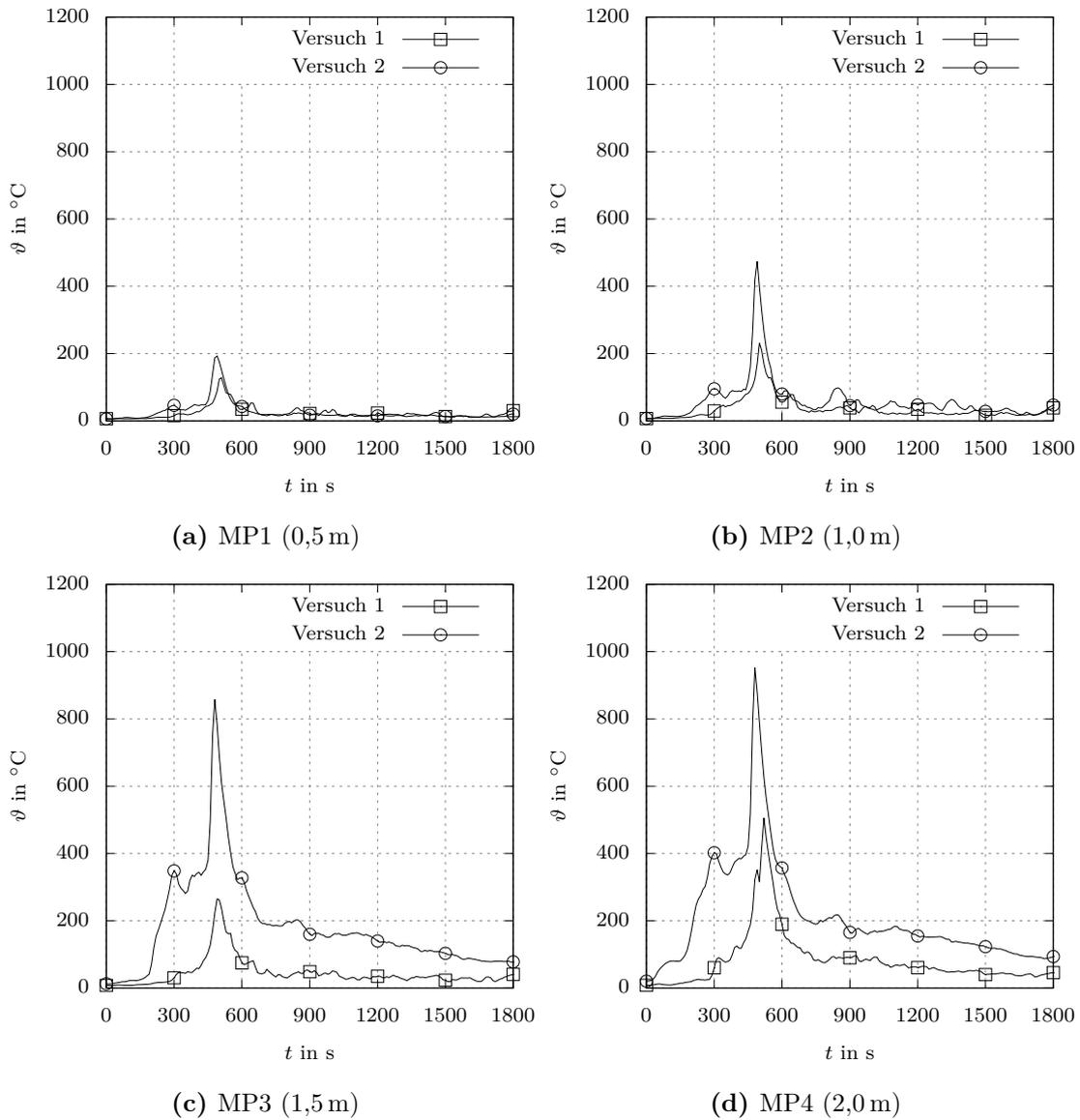
Versuch	Maximaltemperatur	Zeit
-	$\vartheta_{max}$ in °C	$t$ in s
1	697	530
2	921	480



**Abbildung 5.14:** In der ME 1 der Untersuchungsgeometrie arithmetisch gemittelte Rauchgastemperaturen des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

## 5.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Brandentstehung in Wohnungen erfolgte am Beispiel eines Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung. In Abhängigkeit von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen wurden in einer Untersuchungsgeometrie neben MLR und HRR auch Rauchgastemperaturen bestimmt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine verringerte Ventilationsfläche (Türöffnung) zu einer höheren maximalen HRR des ersten brennenden Einrichtungsgegenstandes geführt hat. Damit verbunden wurden auch höhere Rauchgastemperaturen im deckennahen Bereich festgestellt. Gleichzeitig führte die verringerte Öffnungsfläche auch zu einem höheren zeitlichen Anstieg der HRR.



**Abbildung 5.15:** Im MB 5 (Öffnung) der Untersuchungsgeometrie arithmetisch gemittelte Rauchgastemperaturen des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung), der Höhe (MP) und der Zeit.



# KAPITEL 6

---

## Experimentelle Untersuchung der Brandausbreitung

Auf der Grundlage der in Kapitel 5 beschriebenen Untersuchungsergebnisse wurden weitere Brandversuche in einem Wohngebäude durchgeführt<sup>1</sup>. In Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände sowie unterschiedlicher Ventilationsbedingungen wurde die Brandausbreitung sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einen angrenzenden Raum experimentell untersucht. Die Untersuchungen wurden auszugsweise in [11, 79–83] veröffentlicht.

### 6.1 Untersuchungsziel

Die in Kapitel 5 dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Einrichtungsgegenstände mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung bereits in der Form des ersten brennenden Einrichtungsgegenstandes zu hohen HRR während der Brandentstehungsphase führen. Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung ist die Beantwortung der Fragestellung, welchen Einfluss eine veränderte stoffliche Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen neben der Brandentstehungs- auch auf die Brandausbreitungsphase in Wohnungen besitzt und wie groß dieser gegebenenfalls ist. Neben der Betrachtung der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände wurde auch untersucht, in wie weit die Ventilationsbedingungen die Brandausbreitung in Wohnungen beeinflussen. Dazu wurden neben Rauchgastemperaturen auch Rauchgaskonzentrationen erfasst und ausgewertet. Die experimentellen Untersuchungen wurden in einem Wohnungsausschnitt eines Wohngebäudes durchgeführt. Im Fokus der Untersuchung stand neben dem Raum der Brandentstehung auch ein angrenzender Raum.

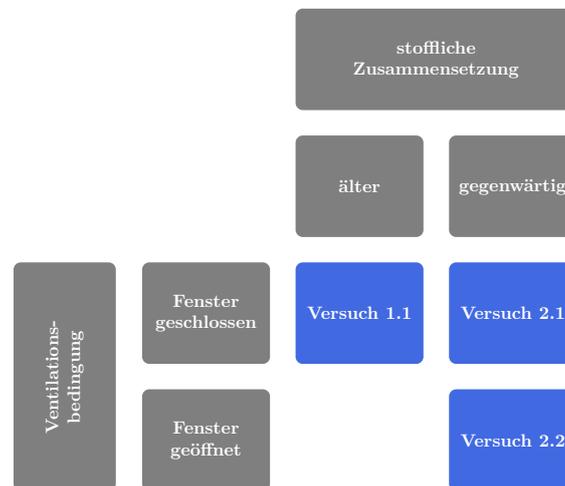
---

<sup>1</sup>Die Durchführung der Brandversuche erfolgte in Kooperation mit der Feuerwehr Frankfurt am Main.

## 6.2 Untersuchungsmethode und -gegenstand

### 6.2.1 Experimentelles Design

Zur Untersuchung des Einflusses der stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen sowie des Einflusses der Ventilationsbedingungen auf die Brandausbreitung wurden vergleichende experimentelle Untersuchungen im Originalmaßstab durchgeführt. Dazu wurde der Raum der Brandentstehung jeweils mit Einrichtungsgegenständen ausgestattet, die sich in ihrer stofflichen Zusammensetzung unterschieden (gegenwärtig / älter), in der raumspezifischen Masse sowie der Art und Anzahl der Einrichtungsgegenstände jedoch vergleichbar waren. Die Untersuchung des Einflusses der Ventilationsbedingungen erfolgte in Form von geöffneten und geschlossenen Fenstern (Abbildung 6.1)<sup>2</sup>. Zur ausreichenden Erfassung des Übergangs von der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase in die Vollbrandphase wurde die Versuchsdauer aller Versuche auf 1800 s begrenzt.



**Abbildung 6.1:** Experimentelles Design zur Untersuchung des Einflusses der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände sowie der Ventilationsbedingungen auf die Brandausbreitung.

### 6.2.2 Gebäude- und Raumgeometrien

Die Brandversuche wurden in einem mehrgeschossigen Wohngebäude durchgeführt, welches als Kaserne genutzt und zum Zeitpunkt der Brandversuche bereits leergezogen und

<sup>2</sup>Die Zusammenfassung des experimentellen Designs ist dem Anhang E, Tabelle E.1 zu entnehmen.

entkernt worden war (Abbildung 6.2). Die Brandversuche fanden im ersten Obergeschoss statt, in dem sich, abgehend von einem durchgängigen Flur, Wohneinheiten bestehend aus einem Raum mit Wohn- und Schlafnutzung, einem Flur mit integrierter Küche sowie einem kleinem Bad befanden.



**Abbildung 6.2:** Außenansicht des Gebäudes zur Untersuchung der Brandausbreitung.

Zur Untersuchung der Brandausbreitung in dem Raum der Brandentstehung sowie in einem angrenzenden Raum wurden Wohn- bzw. Schlafräume von jeweils zwei nebeneinanderliegenden Wohneinheiten durch eine Öffnung verbunden. Dies erfolgte durch eine mittig angeordnete Wandöffnung zwischen den jeweiligen Wohn- und Schlafräumen der Wohneinheiten (Abbildung 6.3). Die Durchgänge zu den jeweiligen Fluren mit integrierter Küche sowie dem kleinem Bad wurden baulich geschlossen. Die Maße der Öffnung zwischen beiden Räumen wurde in Anlehnung an [84, 85] ausgeführt. Danach betrug gemäß den Anforderungen an einflügelige Zimmertüren im Wohnungsbau die lichte Durchgangshöhe 2,10 m sowie die lichte Durchgangsbreite 0,8 m.

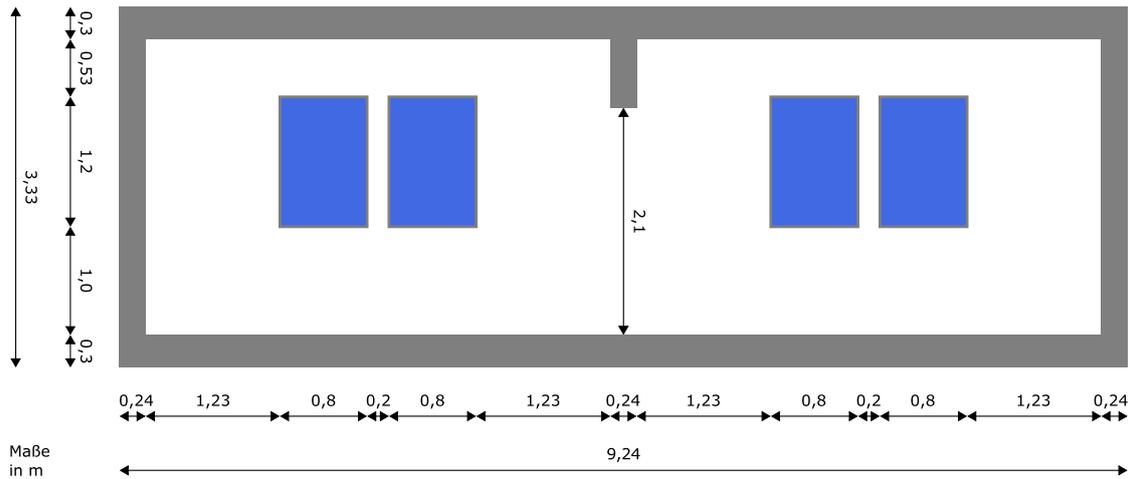
Die Grundfläche eines jeden Wohn- bzw. Schlafraumes war quadratisch und entsprach bei einer lichten Breite von 4,26 m einem Flächeninhalt von  $18,15 \text{ m}^2$ . Die lichte Raumhöhe betrug 2,73 m. Daraus ergab sich ein Raumvolumen von  $49,54 \text{ m}^3$ . Das Raumvolumen der beiden Wohn- bzw. Schlafräume einschließlich der Türöffnung entsprach  $99,49 \text{ m}^3$ .

Die Wände wurden in Lochziegel-Bauweise ausgeführt. Die Wanddicke<sup>3</sup> der Außenwand betrug 0,365 m, zwischen den Wohn- bzw. Schlafräumen der jeweiligen Wohneinheiten 0,24 m und zwischen dem Wohn- bzw. Schlafrum und dem Flur- mit angrenzendem Badbereich 0,115 m. Decke und Boden wurden in Stahlbeton-Bauweise ausgeführt und wiesen eine Dicke von 0,3 m auf.

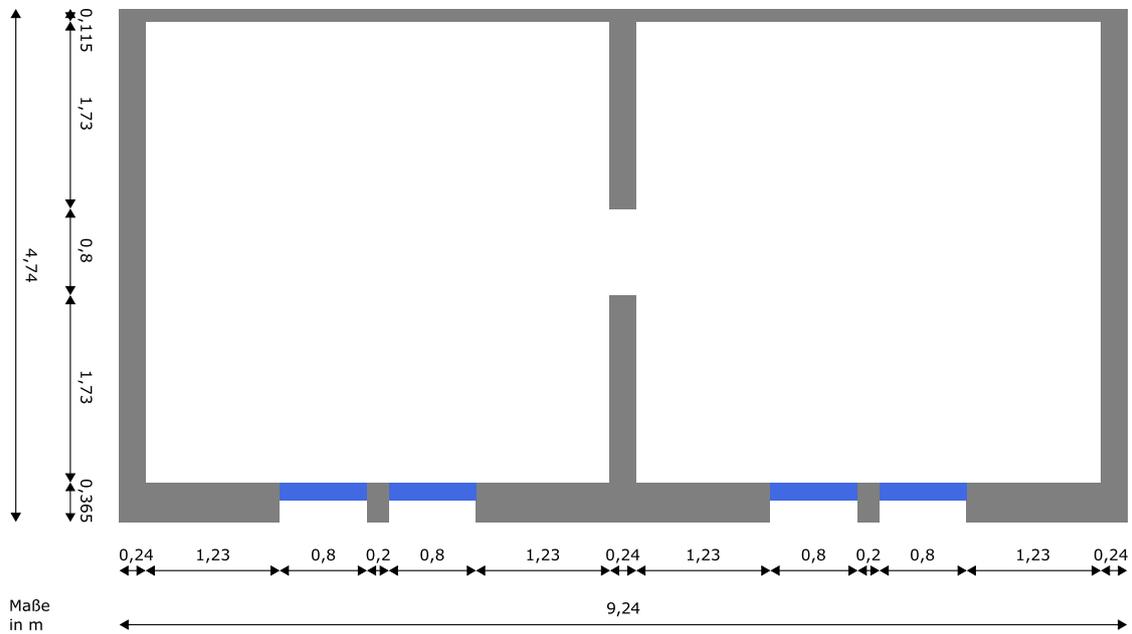
In der Außenwand eines jeden Wohn- bzw. Schlafraumes wurden zwei für den Wohnungsbau handelsübliche Fenster<sup>4</sup> eingebaut, die der gültigen Energieeinsparverordnung

<sup>3</sup>Angaben der Wanddicken beinhalten eine Dicke des Innenputzes von 0,02 m.

<sup>4</sup>Die bauphysikalischen Eigenschaften der Einbaufenster sind dem Anhang E, Tabelle E.2 zu entnehmen.



(a) Aufriss



(b) Grundriss

**Abbildung 6.3:** Raumgeometrien zur Untersuchung der Brandausbreitung.

(EnEV) nach [95] entsprechen. Die Rohbaurichtmaße der Fensteröffnungen betragen in Anlehnung an [96]  $0,80\text{ m} \times 1,20\text{ m}$  (Breite  $\times$  Höhe). Damit entspricht die Fläche der Fensteröffnungen von insgesamt  $1,92\text{ m}^2$  den in [85] definierten Anforderungen an die Mindestgröße von Fensterflächen in Aufenthaltsräumen gemäß den Bauordnungen der Länder. Diese beträgt je nach Landesbauordnung mindestens  $1/8$  bzw.  $1/10$  der Grundfläche des Aufenthaltsraumes. Der Abstand zwischen Fußbodenoberkante und Fenster-

unterkante betrug 1,00 m, der Abstand zwischen den Fenstern 0,20 m und der Abstand zwischen den Fensteraußenkanten und den angrenzenden Wänden 1,23 m.

### 6.2.3 Einrichtungsgegenstände

Gemäß Kapitel 3.3 ist der häufigste Ort der Brandentstehung mit Todesfolge das Wohnzimmer. Zur Untersuchung des Einflusses einer durch zunehmende Verwendung von Werkstoffen auf der Basis von Holz und Polymeren veränderten stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen auf die Brandausbreitung wurden die Räume der Brandentstehung mit wohnzimmertypischen Einrichtungsgegenständen ausgestattet (Abbildung 6.4). Art, Anzahl, Lage sowie die gesamte Masse der Einrichtungsgegenstände wurden versuchsübergreifend vergleichbar gehalten (Abbildung 6.5). Dazu wurde eine flächenspezifische Masse an Einrichtungsgegenständen von  $20,0 \text{ kg/m}^2$  herangezogen. Bezogen auf die Raumgröße standen somit insgesamt  $363,0 \text{ kg}$  Einrichtungsgegenstände pro Versuch zur Verfügung. Die einzelnen Einrichtungsgegenstände unterschieden sich lediglich in ihren Abmaßen, einzelnen Massen sowie in ihren stofflichen Zusammensetzungen voneinander. Die im Versuch 1.1 verwendeten Einrichtungsgegenstände stammten aus den 1960er- bis 1970er-Jahren. Deren stoffliche Zusammensetzung wird im Folgenden mit „älter“ beschrieben. Die in den Versuchen 2.1 und 2.2 verwendeten Einrichtungsgegenstände stammten aus der Gegenwart. Deren stoffliche Zusammensetzung wird im Folgenden mit „gegenwärtig“ beschrieben (Abbildung 6.6). Zur Minimierung weiterer stofflicher Einflüsse wurden Tapeten sowie Fußbodenbeläge in allen Räumen entfernt. Eine Ausstattung des angrenzenden Raumes mit Einrichtungsgegenständen entfiel aufgrund des Untersuchungsziels.

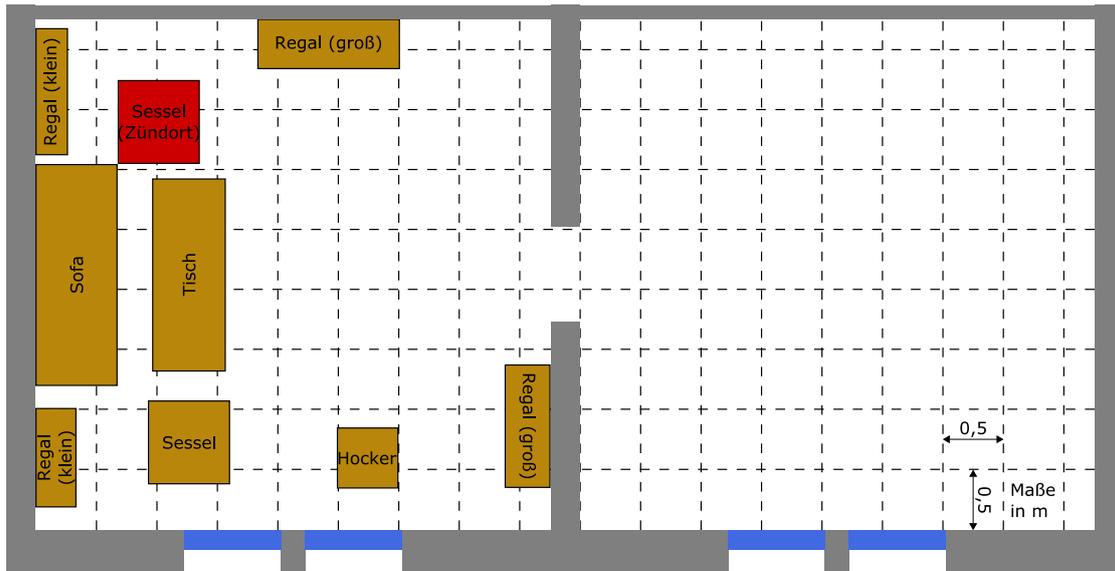


(a) Versuch 1.1

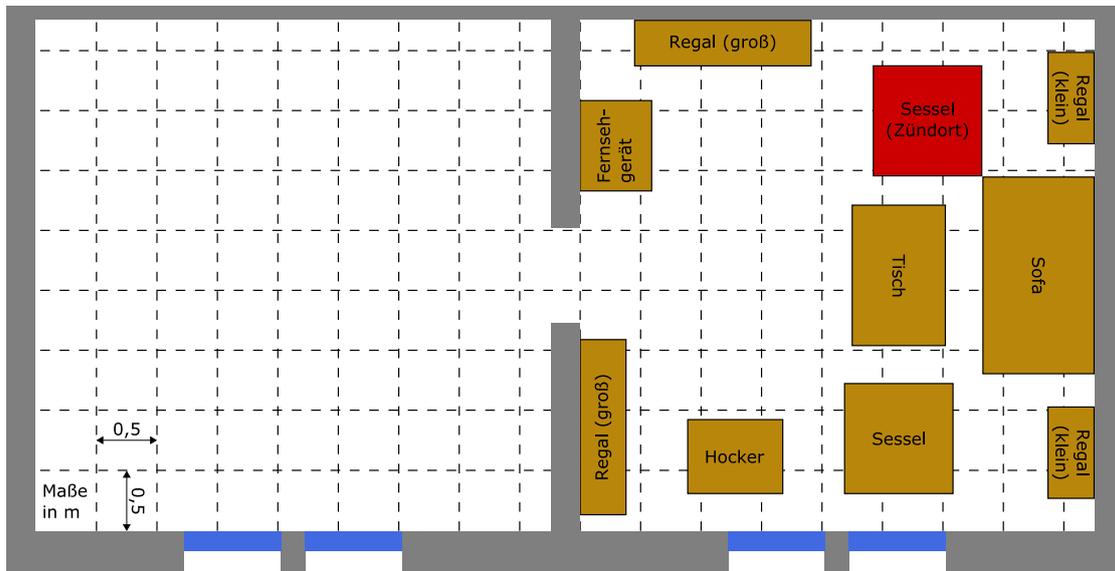


(b) Versuch 2.1 und 2.2

**Abbildung 6.4:** Stoffliche Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände im Raum der Brandentstehung zur Untersuchung der Brandausbreitung. (a) Versuch 1.1: älter (1960er- bis 1970er-Jahre), (b) Versuch 2.1 und 2.2: gegenwärtig.

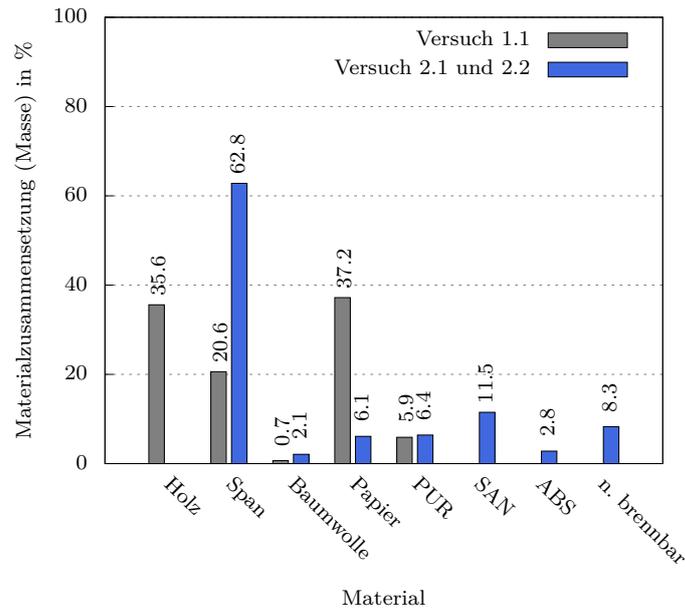


(a) Versuch 1.1



(b) Versuch 2.1 und 2.2

**Abbildung 6.5:** Lage des Raumes der Brandentstehung sowie Lage der darin enthaltenen Einrichtungsgegenstände zur Untersuchung der Brandausbreitung. (a) Versuch 1.1: älter, (b) Versuch 2.1 und 2.2: gegenwärtig.



**Abbildung 6.6:** Gegenüberstellung der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände in den Versuchen 1.1 (älter), 2.1 (gegenwärtig) und 2.2 (gegenwärtig) zur Untersuchung der Brandausbreitung.

#### 6.2.4 Brandlast und Brandlastdichte

Zum Vergleich der älteren und gegenwärtigen Einrichtungsgegenstände hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung werden die Brandlast sowie die Brandlastdichte (auch rechnerische Brandbelastung) berechnet.

Die Brandlast (engl. fire load) ist nach [97] als die Energiemenge definiert, die als Wärme bei der vollständigen Verbrennung aller brennbaren Materialien in einem Raum freigesetzt wird. Die Brandlastdichte (engl. fire load density) beschreibt die flächenspezifische Menge an Brandlast und wird nach [98] durch Gleichung 6.1 berechnet.

$$q_R = q_{R,u} + q_{R,g} \quad (6.1)$$

$q_R$  in  $\text{MJ}/\text{m}^2$  ist die gesamte rechnerische Brandbelastung, die sich sowohl aus der rechnerischen Brandbelastung ungeschützt vorliegender Stoffe  $q_{R,u}$  in  $\text{MJ}/\text{m}^2$  als auch aus der rechnerischen Brandbelastung von Stoffen in geschlossenen Systemen  $q_{R,g}$  in  $\text{MJ}/\text{m}^2$  zusammensetzt.

Da im vorliegenden Fall keine Stoffe in geschlossenen Systemen vorhanden sind, beträgt die rechnerische Brandbelastung  $q_{R,g}$  gleich  $0,0 \text{ MJ/m}^2$ . Die rechnerische Brandbelastung ungeschützt vorliegender Stoffe  $q_{R,u}$  berechnet sich nach Gleichung 6.2.

$$q_{R,u} = \frac{\sum(M_{US} \cdot H_i \cdot m_{Af})}{A_B} \quad (6.2)$$

$M_{US}$  in kg beschreibt die Masse und  $H_i$  in kWh/kg den Heizwert des einzelnen ungeschützten Stoffes.  $m_{Af}$  ist der Abbrandfaktor des einzelnen brennbaren Stoffes.  $A_B$  in  $\text{m}^2$  beschreibt die Fläche des Brandbekämpfungsabschnittes. Im vorliegenden Fall entspricht dies der Fläche des Raumes der Brandentstehung von  $18,15 \text{ m}^2$ .

Zur Berechnung der rechnerischen Brandbelastung werden in der Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 die stofflichen Zusammensetzungen der älteren Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1) sowie die stofflichen Zusammensetzungen der gegenwärtigen Einrichtungsgegenstände (Versuch 2.1 und 2.2) im Raum der Brandentstehung dargestellt und deren Brandlast aus dem Produkt von  $M_{US}$  und  $H_i$  berechnet.

**Tabelle 6.1:** Versuch 1.1: stoffliche Zusammensetzung der älteren Einrichtungsgegenstände im Raum der Brandentstehung sowie Abschätzung der Brandlast.

Einrichtungsgegenstand	Anzahl	Materialzusammensetzung	Masse	Heizwert	Brandlast
-	-	-	$M_{US}$ in kg	$H_i$ in kJ/kg	$Q_R$ in MJ
Sessel	2	Holz	23,38	17 280 <sup>a</sup>	404,01
		PUR	8,01	24 104 <sup>b</sup>	192,83
		Baumwolle	1,15	15 136 <sup>c</sup>	17,41
Sofa	1	Holz	26,91	17 280 <sup>a</sup>	465,00
		PUR	13,04	24 104 <sup>b</sup>	314,32
		Baumwolle	0,68	15 136 <sup>c</sup>	10,29
Hocker	1	Holz	4,16	17 280 <sup>a</sup>	71,88
		PUR	0,36	24 104 <sup>b</sup>	8,68
		Baumwolle	0,82	15 136 <sup>c</sup>	12,41
Regal (groß)	2	Span	45,29	16 804 <sup>d</sup>	761,05
		Holz	45,29	17 280 <sup>a</sup>	782,61
Regal (klein)	2	Span	17,80	16 804 <sup>d</sup>	299,11
		Holz	17,80	17 280 <sup>a</sup>	307,58
Tisch	1	Span	11,70	16 804 <sup>d</sup>	196,61
		Holz	11,70	17 280 <sup>a</sup>	202,18
Printmedien	-	Papier	134,94	9859 <sup>e</sup>	1330,37
Summe	-	-	363,02	-	5376,34

<sup>a</sup>nach [99], <sup>b-e</sup>nach [9]

**Tabelle 6.2:** Versuch 2.1 und 2.2: stoffliche Zusammensetzung der gegenwärtigen Einrichtungsgegenstände im Raum der Brandentstehung sowie Abschätzung der Brandlast.

Einrichtungsgegenstand	Anzahl	Materialzusammensetzung	Masse	Heizwert	Brandlast
-	-	-	$M_{US}$ in kg	$H_i$ in kJ/kg	$Q_R$ in MJ
Sessel	2	Span	48,06	16 804 <sup>d</sup>	807,60
		PUR	10,24	24 104 <sup>b</sup>	246,82
		Baumwolle	3,93	15 136 <sup>c</sup>	59,48
Sofa	1	Span	35,49	16 804 <sup>d</sup>	596,37
		PUR	10,24	24 104 <sup>b</sup>	246,82
		Baumwolle	2,98	15 136 <sup>c</sup>	45,11
Hocker	1	Span	7,44	16 804 <sup>d</sup>	125,02
		PUR	2,76	24 104 <sup>b</sup>	66,53
		Baumwolle	0,81	15 136 <sup>c</sup>	12,26
Regal (groß)	2	Span	76,20	16 804 <sup>d</sup>	1280,46
Regal (klein)	2	Span	43,88	16 804 <sup>d</sup>	737,36
Box	24	SAN	41,57	38 600 <sup>f</sup>	1604,60
Tisch	1	Span	16,97	16 804 <sup>d</sup>	285,16
Fernsehgerät	1	ABS	10,00	33 750 <sup>g</sup>	337,50
		sonstige	30,23	0	0,00
Printmedien	-	Papier	22,22	9859 <sup>e</sup>	219,07
Summe	-	-	363,02	-	6670,16

<sup>b-f</sup>nach [9] <sup>g</sup>nach [100]

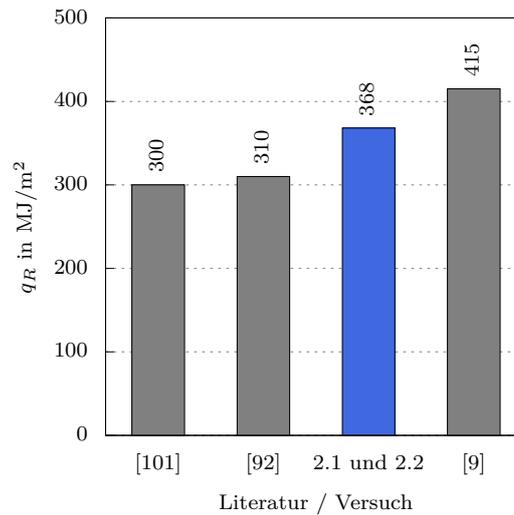
In Tabelle 6.3 werden die Berechnungsergebnisse für Brandlast, Brandlastdichte sowie mittleren Heizwert im Raum der Brandentstehung für die Versuche 1.1, 2.1 und 2.2 dargestellt. Vergleichbare Größenordnungen zu Brandlastdichten in Räumen mit gegenwärtiger wohnzimmertypischer Einrichtung wurden ermittelt. So beträgt die mittlere Brandlastdichte in Hotelzimmern gemäß [92] 310,0 MJ/m<sup>2</sup>. Nach [101] ergibt sich für Wohnungen eine Brandlastdichte von 300,0 MJ/m<sup>2</sup>. Ebenfalls in dieser Größenordnung liegend ist die für den Forschungsbericht Raumbrände [9] herangezogene Brandlastdichte von 415,0 MJ/m<sup>2</sup> (Abbildung 6.7).

### 6.2.5 HRR

In Kapitel 5 wurde aufgezeigt, dass der zeitliche Verlauf der HRR während der Brandentstehungsphase durch das t<sup>2</sup>-Brandmodell beschrieben werden kann. Die maximale raumspezifische HRR (Gleichung 6.3) wird unter Berücksichtigung des t<sup>2</sup>-Brandmodells

**Tabelle 6.3:** Brandlast, Brandlastdichte und mittlerer Heizwert im Raum der Brandentstehung (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1 und 2.2: gegenwärtig).

Versuch	Brandlast	Brandlastdichte	mittlerer Heizwert
-	$Q_R$ in MJ	$q_R$ in MJ/m <sup>2</sup>	$H_i$ MJ/kg
1.1	5376,34	296,21	14,81
2.1 und 2.2	6670,16	367,50	18,38



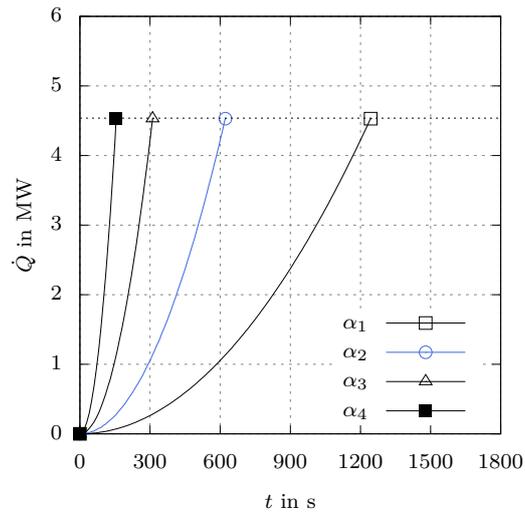
**Abbildung 6.7:** Vergleich der für den Versuchsaufbau 2.1 und 2.2 verwendeten Brandlastdichte mit normativ geregelten und weiteren experimentell herangezogenen Brandlastdichten für Räume mit wohnungsähnlicher Nutzung.

dann erreicht, wenn sich der Brand auf der maximal möglichen Brandfläche im Raum der Brandentstehung ausgebreitet hat. Sie wird nach [92] durch Gleichung 6.3 berechnet.

$$\dot{Q}_{max,b}(t) = RHR \cdot A_B \quad (6.3)$$

$RHR$  in MW/m<sup>2</sup> beschreibt die nutzungsabhängige maximale flächenspezifische HRR, die im brandlastgesteuerten Fall erreicht wird.  $A_B$  in m<sup>2</sup> beschreibt die Fläche des Raumes der Brandentstehung.

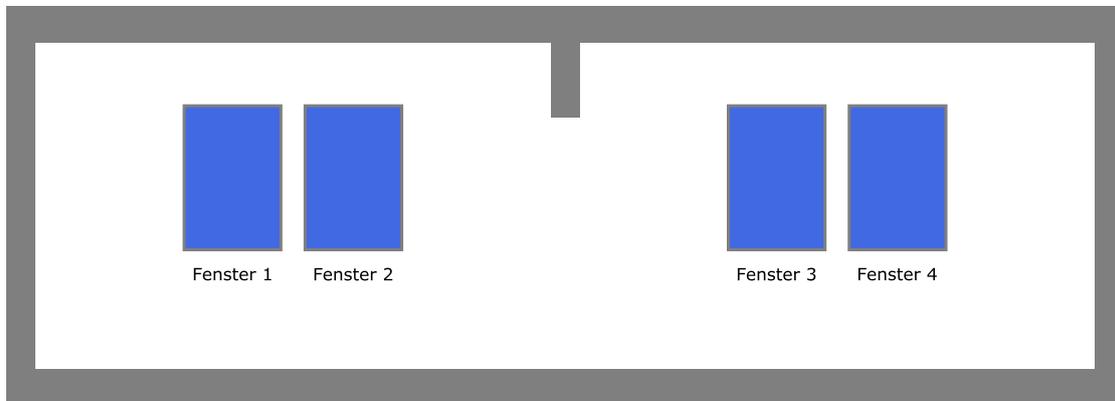
Gemäß [92] entspricht die  $RHR$  für Wohngebäude einem Wert von 0,25 MW/m<sup>2</sup>.  $A_B$  entspricht einem Wert von 18,15 m<sup>2</sup>. Daraus ergibt sich eine brandlastgesteuerte maximal HRR im Raum der Brandentstehung von 4,54 MW (Abbildung 6.8). Ausgehend von Gleichung 5.1 sowie dem raumnutzungsabhängigen Brandentwicklungsfaktor für Wohngebäude beträgt die Dauer der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase bis zum Erreichen der Vollbrandphase 622 s.



**Abbildung 6.8:** Normativ geregelte HRR auf der Grundlage des  $t^2$ -Brandmodells in Abhängigkeit von der Zeit zur Beschreibung des Brandverlaufs während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase.

### 6.2.6 Ventilations- und Klimabedingungen

Die Variation der Ventilationsöffnungen erfolgte in Form von geschlossenen und geöffneten Fenstern (Abbildung 6.9, Tabelle 6.4).



**Abbildung 6.9:** Lage der geöffneten und geschlossenen Ventilationsöffnungen (Fenster) in der Gebäudeaußenwand zur Untersuchung der Brandausbreitung.

Um die Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu ermöglichen, wurde neben den Zündbedingungen auch das Raumklima vor Versuchsbeginn näherungsweise an die in [26]

**Tabelle 6.4:** Variation der Ventilationsöffnungen in den Versuchen 1.1, 2.1 und 2.2.

Versuch	Raum der Brandentstehung	offene Ventilationsfläche
1.1	links (Abbildung 6.5a)	-
2.1	rechts (Abbildung 6.5b)	-
2.2	rechts (Abbildung 6.5b)	Fenster 1, Fenster 3

beschriebenen Klimabedingungen zur Konditionierung von Bauprodukten angeglichen (Tabelle 2.1, Tabelle 6.5). Einflüsse auf Entzündungsverhalten, Brandausbreitung sowie MLR durch Umgebungsbedingungen wie Raumtemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck werden in [102] diskutiert. Die Regelung der Raumtemperatur erfolgte durch die Verwendung einer mobilen Heizungsanlage.

**Tabelle 6.5:** Klimabedingungen im Raum der Brandentstehung sowie außerhalb des Gebäudes vor Beginn der Versuche 1.1, 2.1 und 2.2.

Versuch	Raumtemperatur	Außen-temperatur	relative Luftfeuchtigkeit (innen)	relative Luftfeuchtigkeit (außen)	Luftdruck (außen)
-	$\vartheta_i$ in °C	$\vartheta_a$ in °C	$\varphi_i$ in %	$\varphi_a$ in %	$p_a$ in Pa
1.1	23,7 <sup>a</sup>	18,4 <sup>b</sup>	63 <sup>a</sup>	70 <sup>b</sup>	100 750 <sup>b</sup>
2.1	22,4 <sup>a</sup>	15,0 <sup>b</sup>	65 <sup>a</sup>	88 <sup>b</sup>	101 590 <sup>b</sup>
2.2	21,2 <sup>a</sup>	15,5 <sup>b</sup>	69 <sup>a</sup>	86 <sup>b</sup>	101 660 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>eigene Messung, <sup>b</sup>Deutscher Wetterdienst [86]

### 6.2.7 Zündbedingungen

Um eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu ermöglichen wurden zur Durchführung der Versuche 1.1, 2.1 und 2.2 identische Zündbedingungen wie Zündort und Zündquelle definiert. Ort der initiierten Brandentstehung war in allen Versuchen der in Abbildung 6.5 und Abbildung 6.10 dargestellte Sessel<sup>5</sup>.

Die Entzündung des Sessels erfolgte mit der in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Zündquelle. Die Brandbeanspruchung erfolgte im Übergangsbereich zwischen der Sitzfläche sowie einem Rücken- oder Seitenteil des Versuchskörpers. Dazu wurde die Zündquelle auf der Sitzoberfläche des jeweiligen Sessels mittig ausgerichtet und entsprechend der Sesselgeometrie soweit in Richtung Rückenlehne verschoben, bis sich diese mit der Oberkante der Zündquelle vollständig berührte.

<sup>5</sup>Der in diesem und in Kapitel 5.2.3 verwendete Sessel war baugleich.



(a) Versuch 1.1



(b) Versuch 2.1 und 2.2

**Abbildung 6.10:** Lage der Zündquelle auf dem Sessel. (a) Versuch 1.1: älter, (b) Versuch 2.1 und 2.2: gegenwärtig.

### 6.2.8 Messtechnik und Messstellen

**Rauchgasausbreitung** Zur Untersuchung des Einflusses der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände sowie der Ventilationsbedingungen auf die Brandausbreitung wurde die Rauchgasausbreitung mittels digitaler Videokameras erfasst. Zur Abschätzung der Höhe der sich einstellenden raucharmen Schicht wurden sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum Referenzlinien in einem vertikalen Abstand von 0,5 m, beginnend vom Boden, an den Wänden angebracht (Abbildung 6.4).

**Rauchwarnmelder** Zur weiteren Untersuchung wurden handelsübliche optische Rauchwarnmelder (Messprinzip: Streulichtverfahren, auch Tyndall-Effekt) nach [103] sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum nahe an der Decke über dem MP 3 der MB 3 und MB 8 angebracht (Abbildung 6.12).

**Rauchgastemperatur** Die Temperaturmessung erfolgte mittels Mantelthermoelementen des Typs K (1,5 mm) nach [93] (Abbildung 6.11). Sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum wurden an jeweils 15 Stellen Rauchgastemperaturen erfasst (Abbildung 6.12). Die horizontale und vertikale Verteilung der Mantelthermoelemente war raumübergreifend identisch. Die horizontale Lagebeschreibung (X-Y-Ebene) der Mantelthermoelemente erfolgt mittels Messbäumen (MB), die vertikale (Z-Ebene) mittels Messpunkten (MP). Jeweils fünf auf gleicher Höhe angeordnete Mantelthermoelemente wurden als Messebene (ME) zusammengefasst. Der arithmetische Mittelwert der in diesen fünf Messpunkten gemessenen Rauchgastemperaturen ergibt die arithmetisch gemittelte Rauchgastemperatur der Messebene. Die Höhen der

Messebenen ergaben sich aus der durchschnittlichen Höhe von Kindern (ME 1: 1,25 m)<sup>6</sup> und Erwachsenen (ME 2: 1,72 m)<sup>7</sup> sowie aus der sich unter den Raumdecken einstellenden Heißgasschichten in einer Höhe von 2,63 m (ME 3). Das Messintervall betrug 1 s.



(a) Datenerfassungsgerät



(b) FTIR-Spektrometer

**Abbildung 6.11:** (a) Datenerfassungsgerät zur Messung der Rauchgastemperaturen. (b) FTIR-Spektrometer zur Messung der Rauchgaskonzentrationen.

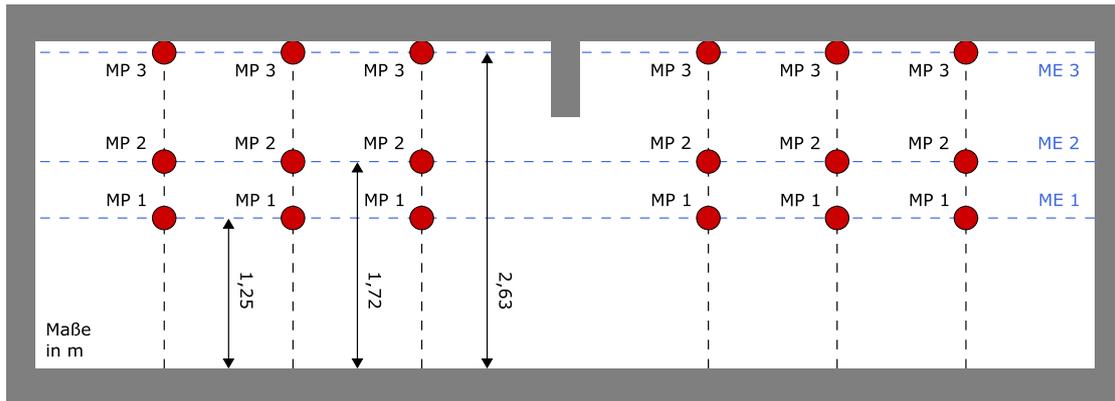
**Rauchgaskonzentration** Zur Untersuchung der Rauchgasausbreitung in einen angrenzenden Raum wurden in diesem Rauchgaskonzentrationen erfasst<sup>8</sup>. Die Messung der im Rauchgas enthaltenen Konzentrationen des CO, CO<sub>2</sub> sowie Blausäure (HCN) erfolgte mit zwei FTIR-Spektrometern (Abbildung 6.11). Die Messsonde des ersten FTIR-Spektrometers wurde im Rahmen des Versuches 1.1 in der ME 1 (MB 8, MP 1) angeordnet (Abbildung 6.13). Die Messsonde des zweiten FTIR-Spektrometers in der ME 2 (MB 8, MP 2)<sup>9</sup>. Die Anordnung der Messsonden im Rahmen der Versuche 2.1 und 2.2

<sup>6</sup>Die durchschnittliche Höhe der Kinder wurde aus den für Mädchen und Jungen ermittelten durchschnittlichen altersabhängigen Körpergrößen zwischen dem ersten und 14. Lebensjahr ermittelt (siehe Anhang E, Tabelle E.3). Daten nach [104].

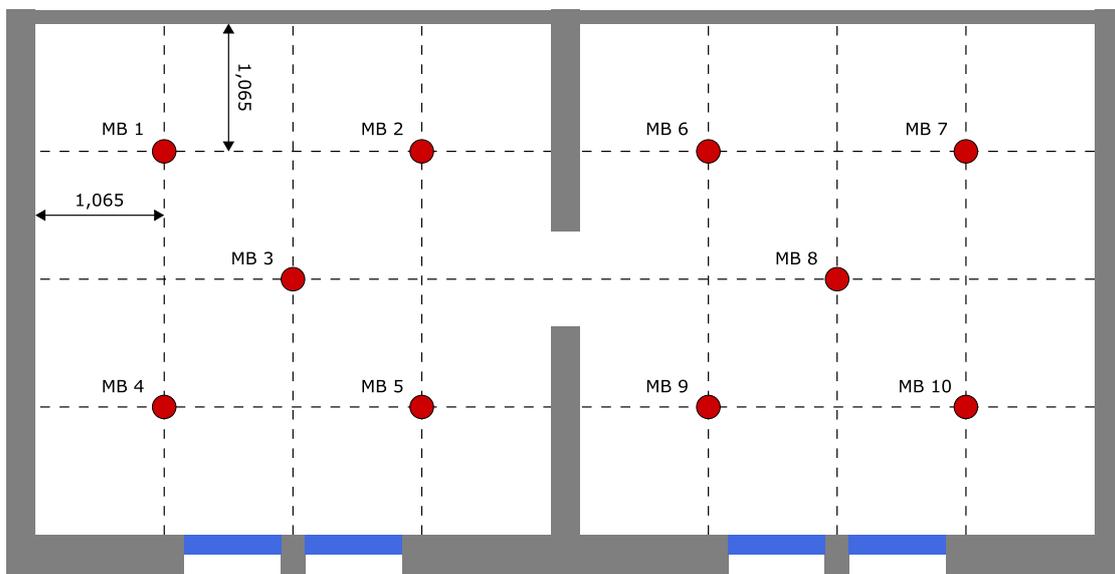
<sup>7</sup>Nach [105].

<sup>8</sup>Die Messung der Rauchgaskonzentrationen, die sich auf das Kapitel 6 beziehen, wurden im Rahmen des BMBF-geförderten Verbundvorhabens T.I.B.R.O. von Dritten durchgeführt.

<sup>9</sup>Die Messbereichsangaben sind dem Anhang E, Tabelle E.4 zu entnehmen.



(a) Aufriss



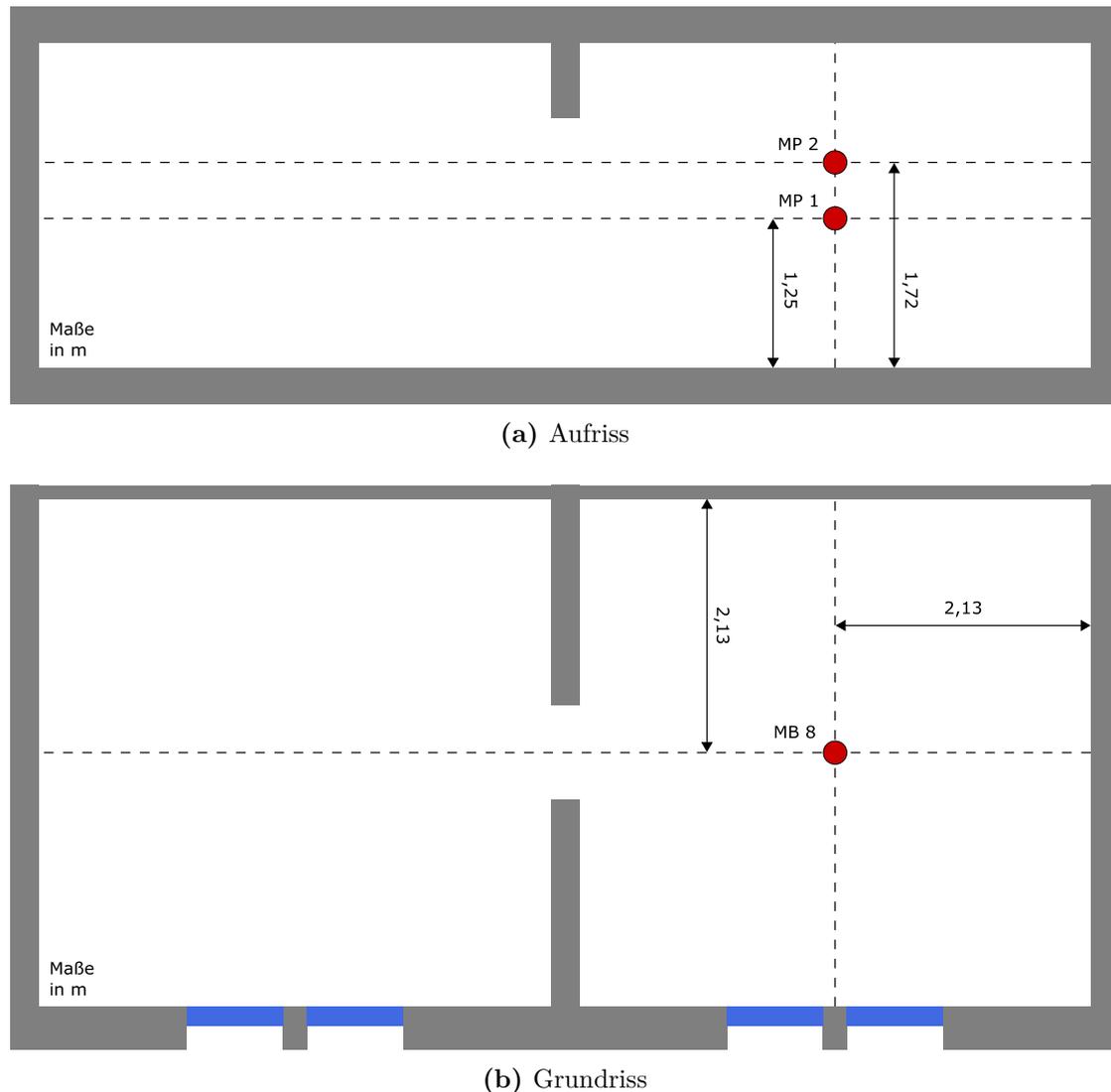
(b) Grundriss

**Abbildung 6.12:** Anordnung der Temperaturmessstellen in den Raumgeometrien zur Untersuchung der Brandausbreitung.

erfolgten mit Bezug auf die Lage des Brandraumes an identischer Stelle in MB 3, MP 1 (Messsonde 1) und MB 3, MP 2 (Messsonde 2) (Abbildung 6.14). Das Messintervall betrug in der ME 1 6 s und in der ME 2 23 s.

### 6.2.9 Auswertung

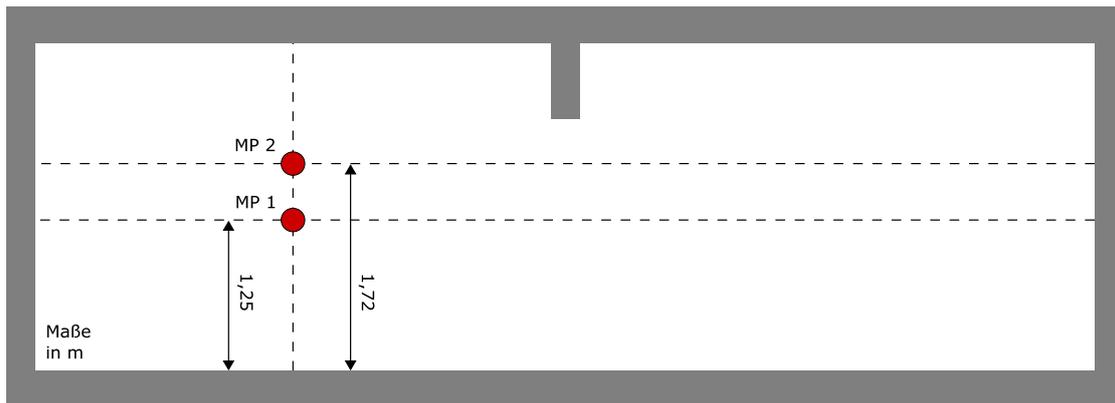
**Rauchgasausbreitung** Zur Abschätzung der Höhe der sich einstellenden raucharmen Schicht wurde aus der Perspektive der Videoaufzeichnung ermittelt, welche Referenzlinie im Verlauf des Brandes nicht mehr zu erkennen ist.



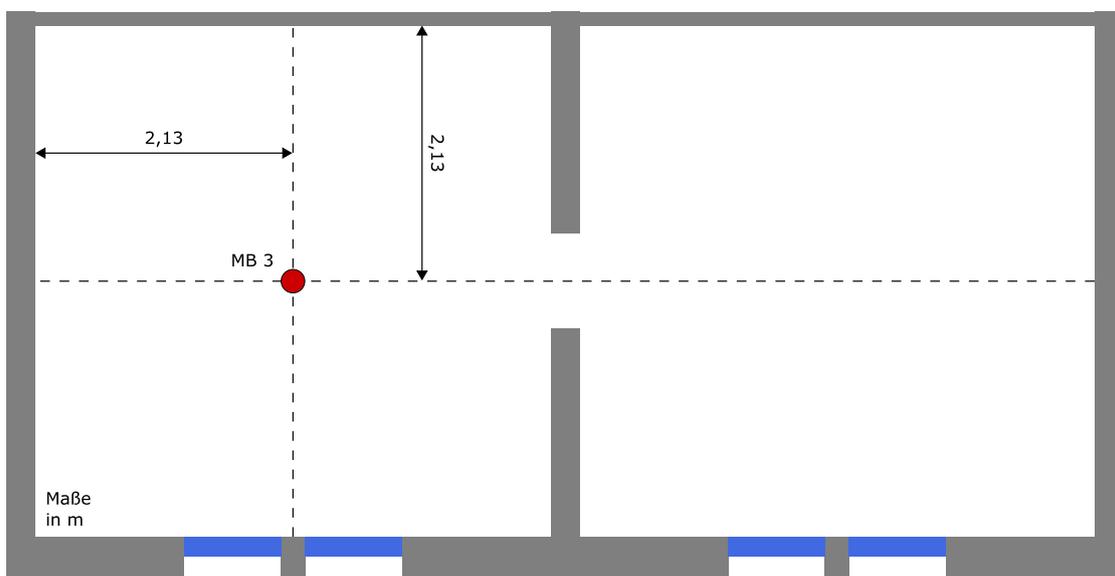
**Abbildung 6.13:** Anordnung der Rauchgaskonzentrationsmessstellen im Versuch 1.1 (ältere Einrichtungsgegenstände) im angrenzenden Raum zur Untersuchung der Brandausbreitung.

**Rauchgastemperatur und -konzentration** Zur Bewertung des Einflusses einer veränderten stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen sowie der Ventilationsbedingungen wurden Grenzwerte für das Eintreten von lebensbedrohlichen Umgebungsbedingungen herangezogen und mit den experimentell ermittelten Rauchgastemperaturen und Rauchgaskonzentrationen verglichen.

Nach [106] besteht für Personen, die einer Umgebung mit hohen Temperaturen ausgesetzt sind, die Gefahr der Hyperthermie (auch Hitzschlag). Dabei handelt es sich um eine Überwärmung des Körpers, die zum Eintreten einer Handlungsunfähigkeit und zum Tod



(a) Aufriss



(b) Grundriss

**Abbildung 6.14:** Anordnung der Rauchgaskonzentrationsmessstellen in den Versuchen 2.1 und 2.2 (gegenwärtige Einrichtungsgegenstände) im angrenzenden Raum zur Untersuchung der Brandausbreitung.

führen kann. Neben der Hyperthermie treten ab einer Umgebungstemperatur von  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Schmerzgrenze) auch Verbrennungen der Haut ein. Der Grenzwert basiert auf der Annahme der konvektiven Wärmeübertragung von der Umgebungsluft auf die Haut und ist von zahlreichen Umgebungsfaktoren wie Luftgeschwindigkeit, relativer Luftfeuchtigkeit und Bekleidung abhängig.

Neben Rauchgastemperaturen können auch die im Rauchgas enthaltenen Stoffe aufgrund ihrer toxischen Wirkung zu lebensbedrohlichen Zuständen führen [107]. Zur Abschätzung der gesundheitlichen Folgen im Fall einer Exposition werden seit dem Jahr 1992 Ein-

satztoleranzwerte (ETW) definiert und fortgeschrieben [108]. Dabei ist der ETW als die Konzentration eines Gases oder Dampfes definiert, bei dem eine toxische Wirkung nach einer definierten Expositionszeit (ETW-1: 1 h, ETW-4: 4 h) eintritt. Toxikologische Begründungen für die ETW sind u. a. [109] zu entnehmen. Eine Vielzahl der in [108] publizierten ETW basieren auf den Störfallbeurteilungswerten (engl. Acute exposure guideline levels, AEGL). So entspricht der AEGL-2 Wert für eine einstündige Exposition dem ETW-1 und für eine vierstündige Exposition dem ETW-4 (Tabelle 6.6). Nach [108] können bei der Überschreitung des jeweiligen AEGL-2-Wertes dauerhafte oder langwierige Gesundheitsschäden eintreten. Darüber hinaus können Personen in ihrer Fluchtmöglichkeit behindert sein<sup>10</sup>.

**Tabelle 6.6:** Einsatztoleranzwerte (ETW) für CO<sub>2</sub>, CO und HCN zur Bewertung der Versuchsergebnisse nach [108].

Gas	Bewertungskriterium	Rauchgaskonzentration
-	-	$C$ in ppm
CO <sub>2</sub>	ETW-1	-
	ETW-4	10 000
CO	ETW-1 ( $\cong$ AEGL-2, 1 h)	83
	ETW-4 ( $\cong$ AEGL-2, 4 h)	33
HCN	ETW-1 ( $\cong$ AEGL-2, 1 h)	7,1
	ETW-4 ( $\cong$ AEGL-2, 4 h)	3,5

### 6.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungsergebnisse werden hinsichtlich Rauchgasausbreitung, Ansprechverhalten der Rauchwarnmelder, Rauchgastemperaturen<sup>11</sup> (Temperaturverlauf und Bewertung) sowie Rauchgaskonzentrationen (Konzentrationsverlauf und Bewertung) ausgewertet und vergleichend dargestellt.

In Kapitel 6.3.1 wird der Einfluss der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig) beschrieben und dargestellt. Kapitel 6.3.2 bezieht sich auf den Einfluss der Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet).

<sup>10</sup>Die Bestimmung bzw. Ableitung von Zeiten, bei denen eine personenbezogene Handlungsunfähigkeit aufgrund der thermischen Wirkung von Rauchgastemperaturen und/oder Rauchgaskonzentrationen (vgl. [106, 110]) auftritt, ist kein Bestandteil dieser Arbeit.

<sup>11</sup>Die in jeder Messebene einzelnen, gemessenen Rauchgastemperaturen sowie die daraus berechneten arithmetischen Mittelwerte, welche zur weiteren Auswertung der Versuche herangezogen werden, sind dem Anhang E, Abbildung E.4 bis Abbildung E.9 zu entnehmen.

### 6.3.1 Einfluss der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände

#### 6.3.1.1 Rauchgasausbreitung

Sowohl während des Versuches 1.1 als auch 2.1 kam es zu einer erfolgreichen Entzündung des jeweiligen Sessels durch die verwendete Zündquelle. In beiden Versuchen fand keine Flammenausbreitung auf angrenzende Einrichtungsgegenstände statt. Beide Sessel erloschen innerhalb der Versuchsdauer selbstständig.

Während des Versuches 1.1 wurde 300 s nach Zündbeginn beobachtet, dass sich keine Rauchsicht eingestellt hatte (Abbildung 6.15). Die Höhe der raucharmen Schicht entsprach demzufolge sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum der Raumhöhe von 2,73 m. Zum gleichen Zeitpunkt im Versuch 2.1 betrug die Höhe der raucharmen Schicht im Raum der Brandentstehung 1,0 m und im angrenzenden Raum 2,5 m (Tabelle 6.7)<sup>12</sup>.

**Tabelle 6.7:** Vergleich der beobachteten Höhen der raucharmen Schicht in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig) nach 300 s.

Versuch	Raum	Höhe der raucharmen Schicht
-	-	$H_R$ in m
1.1	Raum der Brandentstehung	2,73
	angrenzender Raum	2,73
2.1	Raum der Brandentstehung	1,0
	angrenzender Raum	2,5

#### 6.3.1.2 Ansprechverhalten der Rauchwarnmelder

Während des Versuches 1.1 sprachen sowohl der Rauchwarnmelder im Raum der Brandentstehung nach 268 s als auch 22 s später der Rauchwarnmelder im angrenzenden Raum an (Abbildung 6.16). Im Versuch 2.1 sprach der Rauchwarnmelder im Raum der Brandentstehung nach 200 s an. 26 s später folgte der Rauchwarnmelder im angrenzenden Raum.

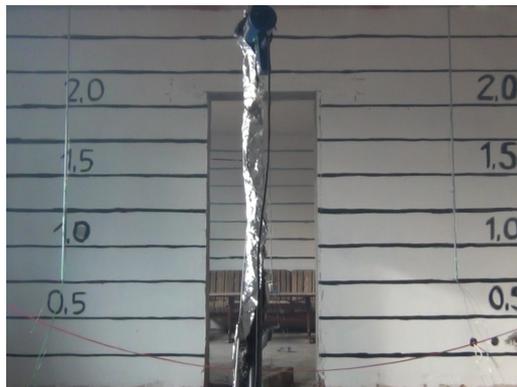
<sup>12</sup>Die Rauchgasausbreitungen im Verlauf der gesamten Versuchszeit sind in Anhang E, Abbildung E.1 (Versuch 1.1) und Abbildung E.2 (Versuch 2.1) dargestellt. Anmerkung: Während des Versuches 2.1 war die Höhe der raucharmen Schicht nach 360 s geringer als die Aufnahmehöhe der Videokamera (0,65 m). Die von der Videokamera ausgehende Sichtweite betrug <1,0 m.



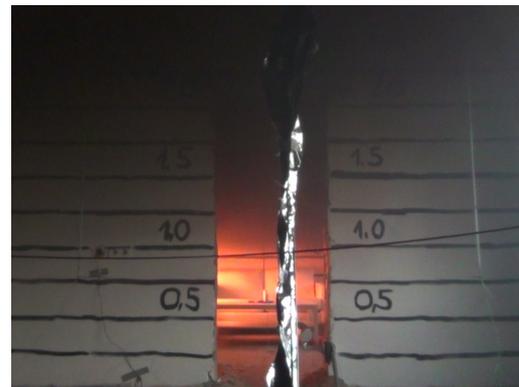
(a) Versuch 1.1: 0 s



(b) Versuch 2.1: 0 s



(c) Versuch 1.1: 300 s



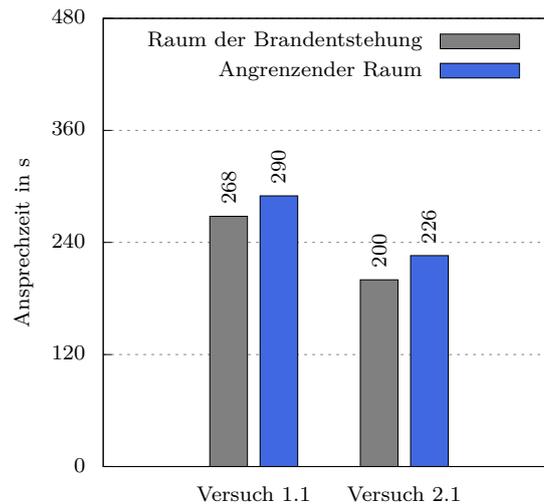
(d) Versuch 2.1: 300 s

**Abbildung 6.15:** Rauchgasausbreitung während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im Raum der Brandentstehung (Hintergrund) sowie im angrenzenden Raum (Vordergrund) in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig) und der Zeit.

Werden die Ansprechzeiten zwischen den Versuchen 1.1 und 2.1 verglichen, so ergeben sich insgesamt frühere Ansprechzeiten im Versuch 2.1. So spricht der Rauchwarnmelder im Raum der Brandentstehung 68 s und der Rauchwarnmelder im angrenzenden Raum 64 s früher an.

### 6.3.1.3 Rauchgastemperaturen

**Temperaturverlauf** Während des Versuches 1.1 wurden im Raum der Brandentstehung nach 586 s Maximaltemperaturen von 122 °C im deckennahen Bereich (ME 3) erreicht (Abbildung 6.17). In der ME 1 bzw. ME 2 traten Maximaltemperaturen von 67 °C bzw. 95 °C 68 s bzw. 15 s später ein. Die maximalen Rauchgastemperaturen im angren-



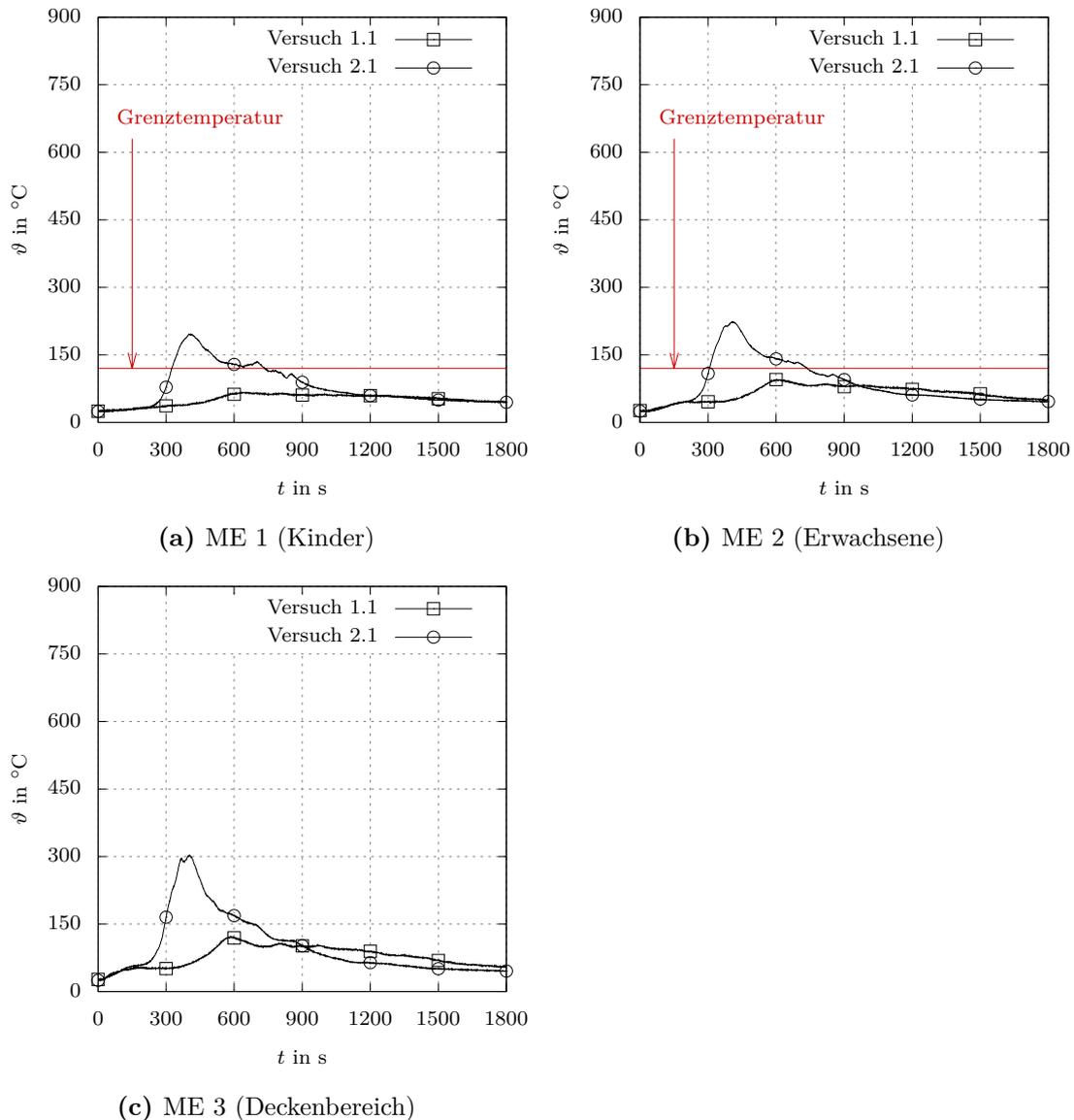
**Abbildung 6.16:** Ansprechzeiten der verwendeten Rauchwarnmelder in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig) und des Raumes.

zenden Raum waren zum einen niedriger als im Raum der Brandentstehung und zum anderen traten sie später ein (Abbildung 6.18). In der ME 1 betrug die Temperaturdifferenz zwischen den Maximaltemperaturen  $17^{\circ}\text{C}$ , in der ME 2  $39^{\circ}\text{C}$  und in der ME 3  $53^{\circ}\text{C}$ . Die Zeitdifferenz zwischen den Maximaltemperaturen betrug für die ME 1 36 s, für die ME 2 71 s und für die ME 3 34 s.

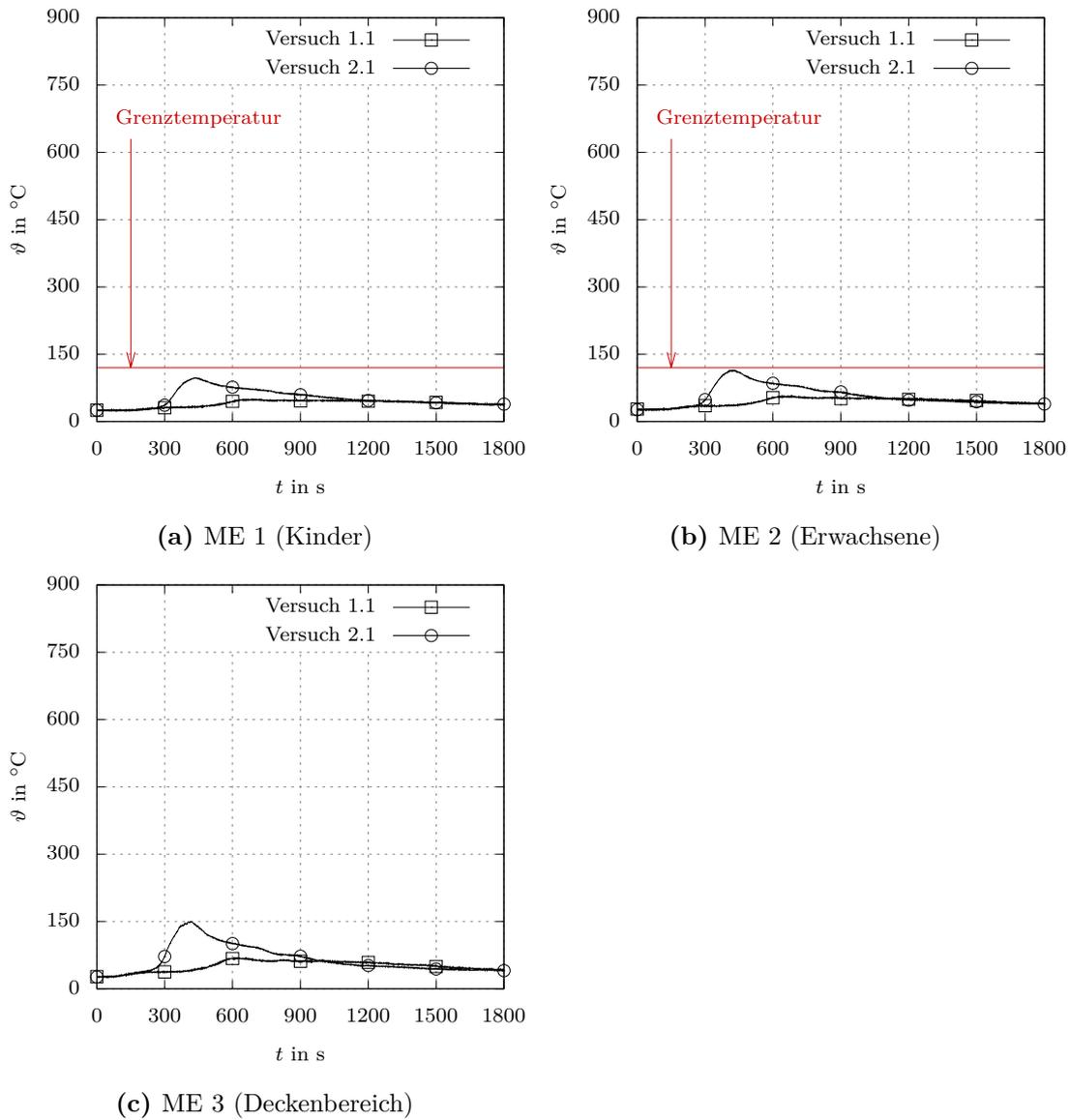
Während des Versuches 2.1 wurden im Raum der Brandentstehung nach 302 s Maximaltemperaturen von  $303^{\circ}\text{C}$  im deckennahen Bereich (ME 3) erreicht. In der ME 1 bzw. ME 2 traten Maximaltemperaturen von  $196^{\circ}\text{C}$  bzw.  $223^{\circ}\text{C}$  109 s bzw. 102 s später ein. Die maximalen Rauchgastemperaturen im angrenzenden Raum waren wie im Versuch 1.1 zum einen niedriger als im Raum der Brandentstehung und zum anderen traten sie später ein. In der ME 1 betrug die Temperaturdifferenz zwischen den Maximaltemperaturen  $98^{\circ}\text{C}$ , in der ME 2  $109^{\circ}\text{C}$  und in der ME 3  $153^{\circ}\text{C}$ . Die Zeitdifferenz zwischen den Maximaltemperaturen betrug für die ME 1 26 s, für die ME 2 17 s und für die ME 3 112 s.

Der Vergleich der Versuche zeigt, dass sich erste Temperaturunterschiede bereits 180 s nach Zündbeginn in der ME 3 im Raum der Brandentstehung sowie nach 300 s in allen Messebenen beider Räume einstellen (Tabelle 6.8). Dabei sind die im Versuch 2.1 gemessenen maximalen Rauchgastemperaturen höher als die im Versuch 1.1 gemessenen und treten außerdem früher ein. Die Temperaturdifferenzen zwischen den Maximaltemperaturen im Raum der Brandentstehung betragen für die ME 1  $129^{\circ}\text{C}$ , für die ME 2  $128^{\circ}\text{C}$  und für die ME 3  $181^{\circ}\text{C}$ . Die Zeitdifferenz zwischen den Maximaltemperaturen betrug für die ME 1 243 s, für die ME 2 197 s und für die ME 3 284 s. Die Temperaturdif-

ferenzen zwischen den Maximaltemperaturen im angrenzenden Raum betragen für die ME 1 48 °C, für die ME 2 58 °C und für die ME 3 81 °C. Die Zeitdifferenz zwischen den Maximaltemperaturen betrug für die ME 1 253 s, für die ME 2 251 s und für die ME 3 206 s.



**Abbildung 6.17:** Arithmetisch gemittelte Rauchgastemperaturen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im Raum der Brandentstehung in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig), der Messebene (ME) und der Zeit sowie Darstellung der Grenztemperatur nach [106].



**Abbildung 6.18:** Arithmetisch gemittelte Rauchgastemperaturen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im angrenzenden Raum in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig), der Messebene (ME) und der Zeit sowie Darstellung der Grenztemperatur nach [106].

**Bewertung** Während des Versuches 1.1 wurde sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum die Grenztemperatur nicht erreicht (Tabelle 6.9). Im Versuch 2.1 wurde ausschließlich im Raum der Brandentstehung die Grenztemperatur sowohl in der ME 2 nach 306 s als auch in der ME 1 19 s später erreicht.

**Tabelle 6.8:** Vergleich der arithmetisch gemittelten maximalen Rauchgastemperaturen in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig), des Raumes, der Messebene (ME 1: Kinder, ME 2: Erwachsene, ME 3: deckennaher Bereich) und der Zeit.

Versuch	Raum	Messebene	Maximaltemperatur	Zeit
-	-	-	$\vartheta_{max}$ in °C	$t$ in s
1.1	Raum der Brand- entstehung	ME 1	67	654
		ME 2	95	601
		ME 3	122	586
	angrenzender Raum	ME 1	49	690
		ME 2	56	672
		ME 3	69	620
2.1	Raum der Brand- entstehung	ME 1	196	411
		ME 2	223	404
		ME 3	303	302
	angrenzender Raum	ME 1	98	437
		ME 2	114	421
		ME 3	150	414

**Tabelle 6.9:** Dauer bis zum Erreichen der Grenztemperatur (120 °C) in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig), des Raumes und der Messebene (ME 1: Kinder, ME 2: Erwachsene).

Versuch	Raum	Messebene	Zeit	
-	-	-	$t$ in s	
1.1	Raum der Brandentstehung	ME 1	-	
		ME 2	-	
	angrenzender Raum	ME 1	-	
		ME 2	-	
	2.1	Raum der Brandentstehung	ME 1	325
			ME 2	306
angrenzender Raum		ME 1	-	
		ME 2	-	

#### 6.3.1.4 Rauchgaskonzentrationen

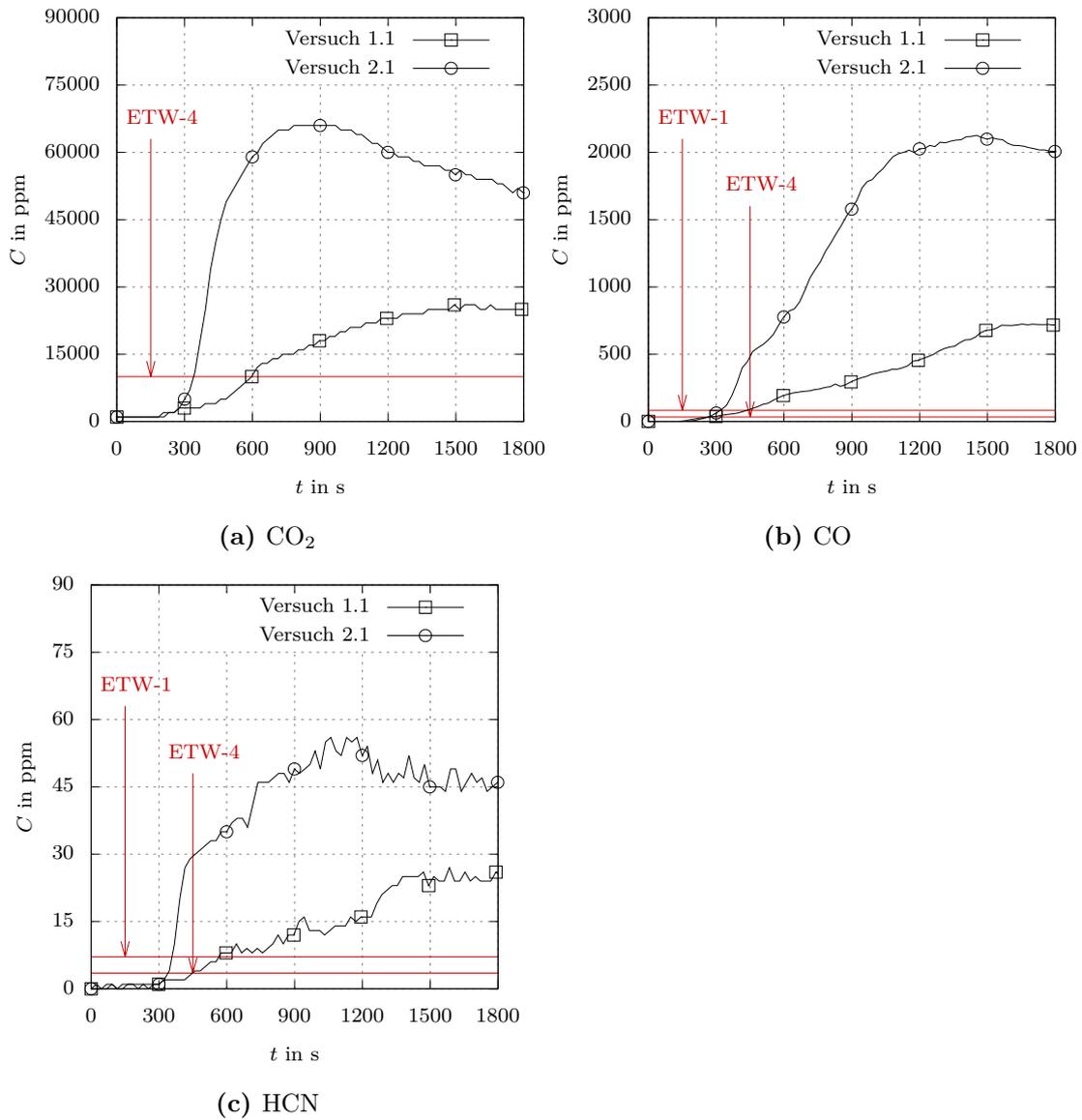
**Konzentrationsverlauf** Während des Versuches 1.1 wurde im angrenzenden Raum im MP 2 eine Maximalkonzentration für CO<sub>2</sub> von 26 000 ppm nach 1493 s, eine Maximalkonzentration für CO von 724 ppm nach 1654 s und eine Maximalkonzentration für HCN von 27,3 ppm nach 1585 s erreicht (Abbildung 6.19). Im MP 1 waren die Maximalkonzentrationen zum einen niedriger als im MP 2 und zum anderen traten sie später ein (Abbildung 6.20). So betrug die Konzentrationsdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen für CO<sub>2</sub> 200 ppm, für CO 89,75 ppm und für HCN 4,13 ppm. Die Zeitdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen betrug für CO<sub>2</sub> 270 s, für CO 134 s und für HCN 111 s.

Während des Versuches 2.1 wurde im angrenzenden Raum im MP 2 eine Maximalkonzentration für CO<sub>2</sub> von 66 000 ppm nach 784 s, eine Maximalkonzentration für CO von 2126 ppm nach 1452 s und eine Maximalkonzentration für HCN von 56,6 ppm nach 1060 s erreicht. Im MP 1 waren die Maximalkonzentrationen zum einen niedriger als im MP 2 und zum anderen traten sie bis auf CO ebenfalls später ein. So betrug die Konzentrationsdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen für CO<sub>2</sub> 37 900 ppm, für CO 1368 ppm und für HCN 31,98 ppm. Die Zeitdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen betrug für CO<sub>2</sub> 6 s, für CO 280 s (die Maximalkonzentration trat im MP 1 zwar früher ein, war jedoch insgesamt niedriger als im MP 2) und für HCN 69 s.

Der Vergleich der Versuche zeigt, dass sich erste Rauchgaskonzentrationsunterschiede für CO<sub>2</sub>, CO und HCN sowohl im MP 1 als auch im MP 2 bereits 300 s nach Zündbeginn einstellten (Tabelle 6.10). Bis zu einer Versuchszeit von mindestens 1200 s waren die Rauchgaskonzentrationen im MP 1 während des Versuches 2.1 höher als die im Versuch 1.1. Im MP 2 waren die im Versuch 2.1 gemessenen Rauchgaskonzentrationen über die gesamte Versuchszeit höher als im Versuch 1.1. Die Differenzen der maximalen Rauchgaskonzentrationen im angrenzenden Raum betragen im MP 2 für CO<sub>2</sub> 40 000 ppm (+154 %), für CO 1402 ppm (+194 %) und für HCN 29,3 ppm (+107 %). Die Zeitdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen betragen dabei für CO<sub>2</sub> 709 s, für CO 202 s und für HCN 525 s. Die Differenzen der maximalen Rauchgaskonzentrationen im MP 1 betragen für CO<sub>2</sub> 2300 ppm (+9 %), für CO 123,75 ppm (+20 %) und für HCN 1,45 ppm (+6 %). Die Zeitdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen betragen dabei für CO<sub>2</sub> 973 s, für CO 616 s und für HCN 566 s.

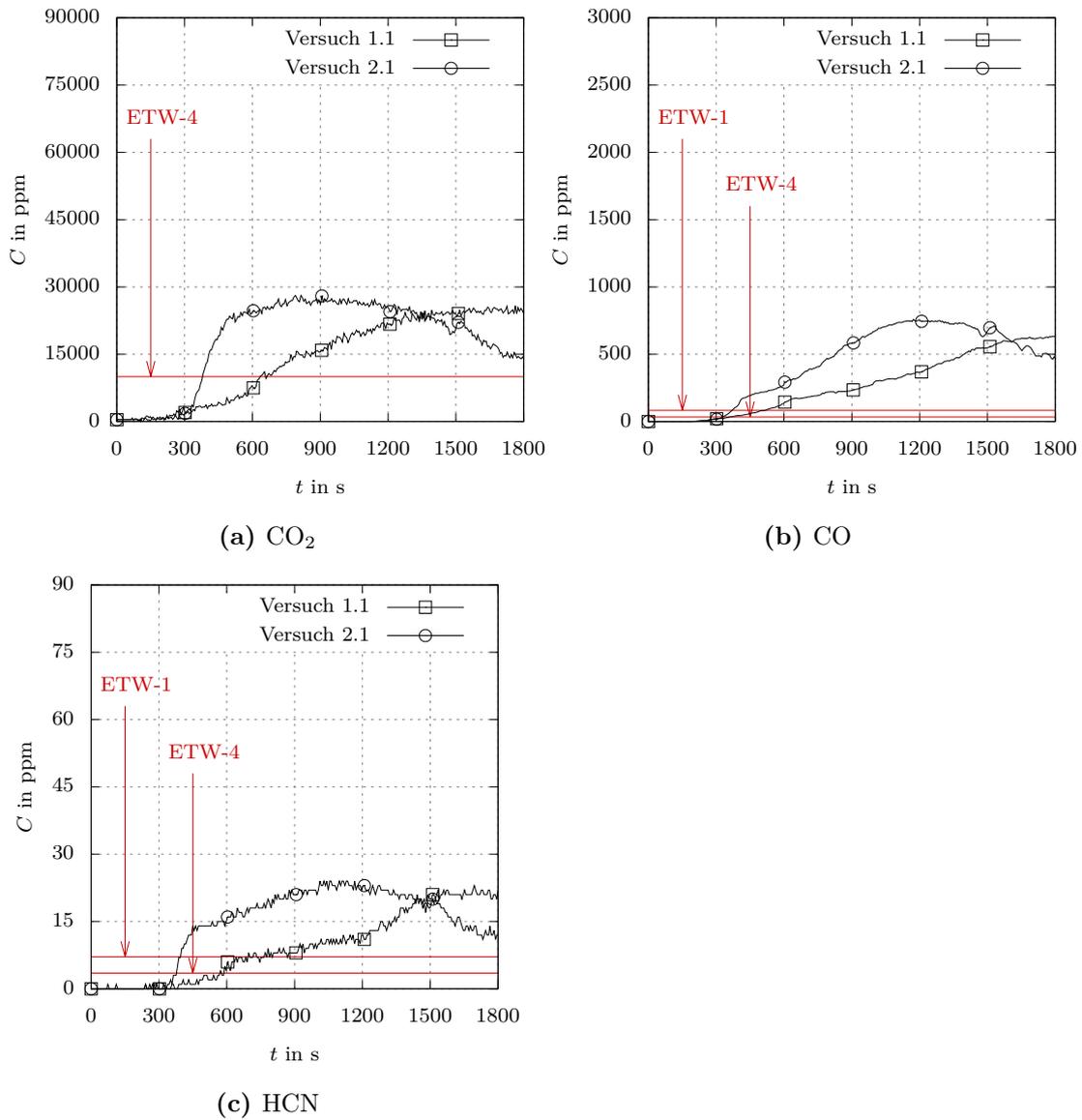
**Bewertung** Während des Versuches 1.1 wurden im angrenzenden Raum sowohl im MP 2 als auch MP 1 die ETW-4 für CO<sub>2</sub>, CO und HCN überschritten (Tabelle 6.11). Dies erfolgte im MP 2 für CO<sub>2</sub> nach 597 s, für CO nach 276 s und für HCN nach 460 s. Im MP 1 erfolgte die Überschreitung des ETW-4 später. Die Zeitdifferenz zu der im MP 2 erfolgten Überschreitung betrug für CO<sub>2</sub> 38 s, für CO 82 s und für HCN ebenfalls 82 s.

Während des Versuches 2.1 wurden im angrenzenden Raum ebenfalls sowohl im MP 2 als auch MP 1 die ETW-4 für CO<sub>2</sub>, CO und HCN überschritten. Dies erfolgte im MP



**Abbildung 6.19:** Rauchgaskonzentrationen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im angrenzenden Raum im MP 2 (Erwachsene) in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig) und der Zeit sowie Darstellung des jeweiligen rauchgasspezifischen Einsatztoleranzwertes (ETW) nach [108].

2 für CO<sub>2</sub> nach 346 s, für CO nach 277 s und für HCN ebenfalls nach 346 s. Im MP 1 erfolgte die Überschreitung des ETW-4 später. Die Zeitdifferenz zu der im MP 2 erfolgten Überschreitung betrug für CO<sub>2</sub> 36 s, für CO 50 s und für HCN 30 s.



**Abbildung 6.20:** Rauchgaskonzentrationen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im angrenzenden Raum im MP 1 (Kinder) in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig) und der Zeit sowie Darstellung des jeweiligen rauchgasspezifischen Einsatztoleranzwertes (ETW) nach [108].

Der Vergleich der Versuche zeigt, dass die Überschreitung der ETW-4 für CO<sub>2</sub>, CO und HCN im angrenzenden Raum im Versuch 2.1 überwiegend früher erfolgte. Bezogen auf den MP 2 betrug die Zeitdifferenz für CO<sub>2</sub> 251 s, für CO –1 s (ETW-4 wurde später

**Tabelle 6.10:** Vergleich der maximalen Rauchgaskonzentrationen in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig), des Messpunktes (MP 1: Kinder, MP 2: Erwachsene) und der Zeit.

Versuch	Raum	Messpunkt	Gas	Maximalkonzentration	Zeit
-	-	-	-	$C_{max}$ in ppm	$t$ in s
1.1	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	25 800,00	1763
			CO	634,25	1788
			HCN	23,17	1695
		MP 2	CO <sub>2</sub>	26 000,00	1493
			CO	724,00	1654
			HCN	27,30	1585
2.1	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	28 100,00	790
			CO	758,00	1172
			HCN	24,62	1129
		MP 2	CO <sub>2</sub>	66 000,00	784
			CO	2126,00	1452
			HCN	56,60	1060

überschritten) und für HCN 114 s. Bezogen auf den MP 1 betrug die Zeitdifferenz für CO<sub>2</sub> 253 s, für CO 31 s und für HCN 166 s.

### 6.3.2 Einfluss der Ventilationsbedingungen

#### 6.3.2.1 Rauchgasausbreitung

Die Ergebnisse aus dem Versuch 2.1 sind dem Kapitel 6.3.1.1 zu entnehmen. Wie im Versuch 2.1 kam es auch im Versuch 2.2 zu einer erfolgreiche Entzündung des jeweiligen Sessels durch die verwendete Zündquelle. Des Weiteren erfolgte im Versuch 2.2 eine Flammenausbreitung auf angrenzende Einrichtungsgegenstände, währenddessen der Sessel im Versuch 2.1 innerhalb der Versuchsdauer selbstständig erlosch. Zur Verhinderung dauerhafter Gebäudeschäden durch Abplatzungen an Wänden und Decke erfolgte 1200 s nach Zündbeginn ein Löschvorgang.

**Tabelle 6.11:** Dauer bis zum Erreichen des rauchgasspezifischen Einsatztoleranzwertes (ETW) in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände (Versuch 1.1: älter, Versuch 2.1: gegenwärtig) und des Messpunktes (MP 1: Kinder, MP 2: Erwachsene).

Versuch	Raum	Messpunkt	Gas	ETW	Zeit
-	-	-	-	-	<i>t</i> in s
1.1	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-
				ETW-4	635
			CO	ETW-1	518
				ETW-4	358
				HCN	ETW-1
		ETW-4	542		
		MP 2	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-
				ETW-4	597
			CO	ETW-1	437
				ETW-4	276
HCN	ETW-1			575	
ETW-4	460				
2.1	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-
				ETW-4	382
			CO	ETW-1	370
				ETW-4	327
				HCN	ETW-1
		ETW-4	376		
		MP 2	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-
				ETW-4	346
			CO	ETW-1	323
				ETW-4	277
HCN	ETW-1			369	
ETW-4	346				

Während des Versuches 2.2 betrug die Höhe der raucharmen Schicht im Raum der Brandentstehung 1,5 m und im angrenzenden Raum 2,0 m (Abbildung 6.21, Tabelle 6.12)<sup>13</sup>.

<sup>13</sup>Die Rauchgasausbreitungen im Verlauf der gesamten Versuchszeit sind in Anhang E, Abbildung E.2 (Versuch 2.1) und Abbildung E.3 (Versuch 2.2) dargestellt. Anmerkung 1: Während des Versuches 2.2 war die Höhe der raucharmen Schicht nach 450 s geringer als die Aufnahmehöhe der Videokamera (0,65 m). Die von der Videokamera ausgehende Sichtweite betrug <1,0 m. Anmerkung 2: Ursache für



(a) Versuch 2.1: 0 s



(b) Versuch 2.2: 0 s



(c) Versuch 2.1: 300 s



(d) Versuch 2.2: 300 s

**Abbildung 6.21:** Rauchgasausbreitung während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im Raum der Brandentstehung (Hintergrund) sowie im angrenzenden Raum (Vordergrund) in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet) und der Zeit.

### 6.3.2.2 Ansprechverhalten der Rauchwarnmelder

Die Ergebnisse aus dem Versuch 2.1 sind dem Kapitel 6.3.1.2 zu entnehmen. Im Versuch 2.2 sprach der Rauchwarnmelder im angrenzenden Raum nach 242 s an (Abbildung 6.22). Eine Auslösung des Rauchwarnmelders im Raum der Brandentstehung wurde nicht festgestellt. Dieser Umstand wird auf einen Defekt des Rauchwarnmelders zurückgeführt.

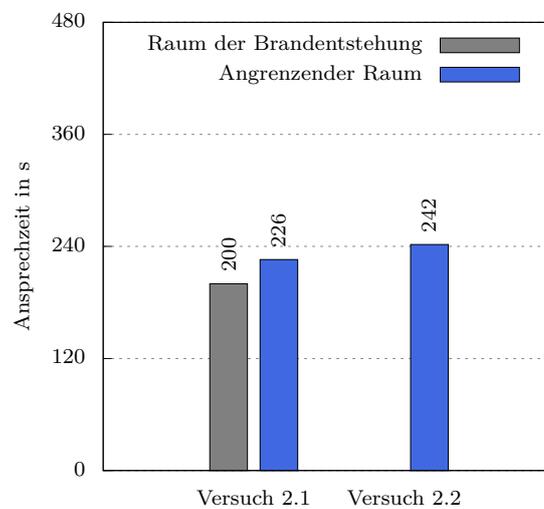
Werden die Ansprechzeiten im angrenzenden Raum zwischen den Versuchen 2.1 und 2.2 verglichen, so ergibt sich eine spätere Ansprechzeit des Rauchwarnmelders im Versuch 2.2 von 16 s.

---

den in Abbildung 6.21b Richtung Decke zunehmend dunkler werdenden Farbverlauf zu Beginn des Versuches sind Rußablagerungen auf der Wandoberfläche aus dem vorherigen Versuch.

**Tabelle 6.12:** Vergleich der beobachteten Höhen der raucharmen Schicht in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet) nach 300 s.

Versuch	Raum	Höhe der raucharmen Schicht
-	-	$H_R$ in m
2.1	Raum der Brandentstehung	1,0
	angrenzender Raum	2,5
2.2	Raum der Brandentstehung	1,5
	angrenzender Raum	2,0



**Abbildung 6.22:** Ansprechzeiten der verwendeten Rauchwarnmelder in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet) und des Raumes.

### 6.3.2.3 Rauchgastemperaturen

**Temperaturverlauf** Die Ergebnisse aus dem Versuch 2.1 sind dem Kapitel 6.3.1.3 zu entnehmen. Während des Versuches 2.2 wurden bis zum Zeitpunkt des Löschvorgangs im Raum der Brandentstehung nach 862 s Maximaltemperaturen von 695 °C im deckennahen Bereich (ME 3) erreicht (Abbildung 6.23). In der ME 1 bzw. ME 2 traten Maximaltemperaturen von 523 °C bzw. 559 °C 329 s bzw. 338 s später ein. Die maximalen Rauchgastemperaturen im angrenzenden Raum waren bis zum Zeitpunkt des Löschvorgangs niedriger als im Raum der Brandentstehung (Abbildung 6.24). In der ME 1

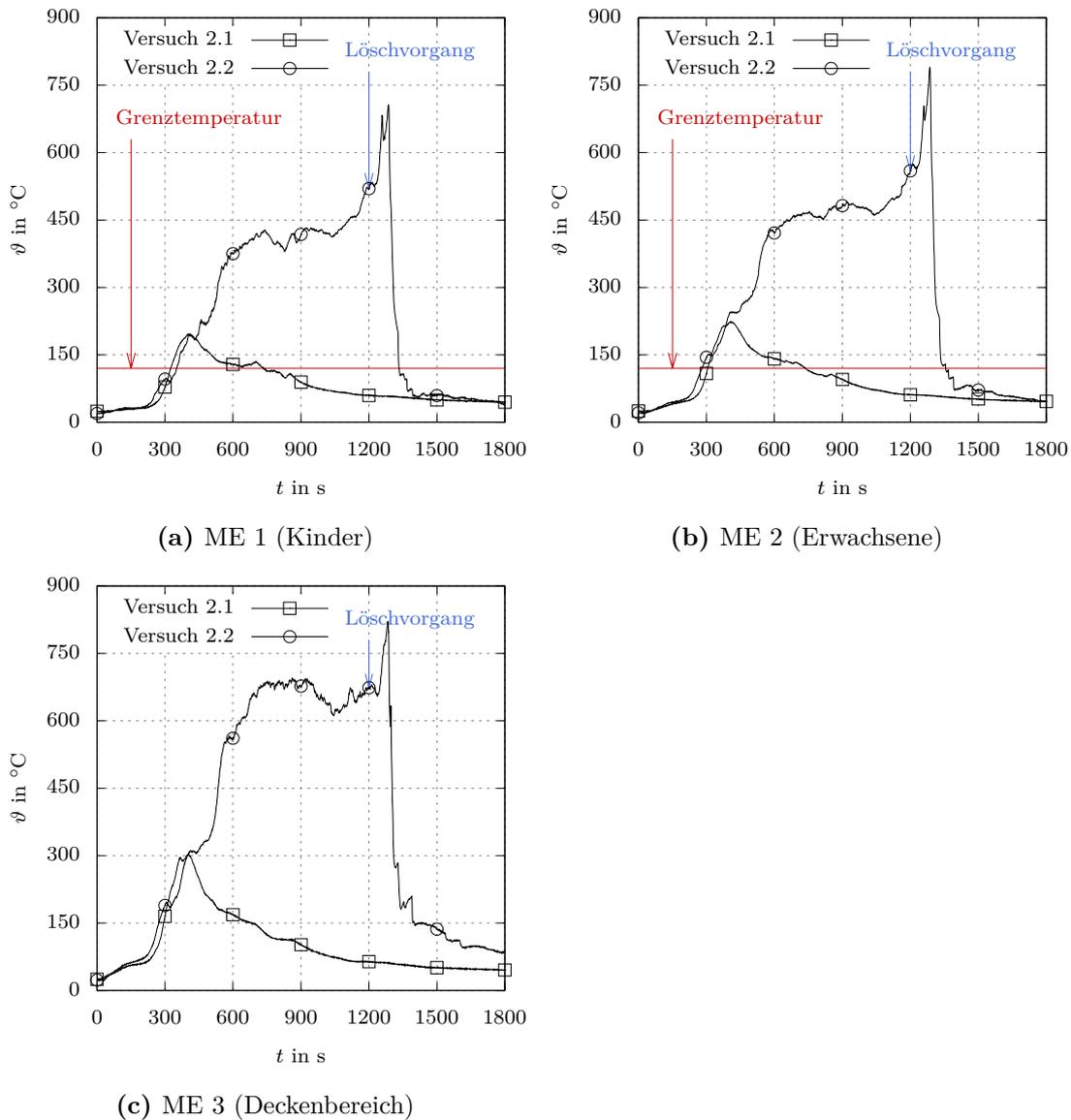
betrug die Temperaturdifferenz zwischen den Maximaltemperaturen 312 °C, in der ME 2 318 °C und in der ME 3 375 °C. Der in der Abbildung 6.23 und Abbildung 6.24 dargestellte kurzzeitige Temperaturanstieg ab 1200s ist durch den Löschvorgang begründet. Zur Durchführung von diesem erfolgte eine Türöffnung im angrenzenden Raum. Die dadurch zusätzlich einströmende Luft förderte den Verbrennungsprozess, was maßgeblich im Raum der Brandentstehung zu einem kurzzeitigen Temperaturanstieg führte, bevor Löscheffekte und ein damit verbundener Temperaturabfall wirkten.

Der Vergleich der Versuche zeigt, dass sich erste Temperaturunterschiede bereits 420s nach Zündbeginn in allen Messebenen sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum einstellen (Tabelle 6.13). Dabei waren die im Versuch 2.2 gemessenen Rauchgastemperaturen bis zum Zeitpunkt des Löschvorgangs, 1200s nach Zündbeginn, höher als die im Versuch 2.1 gemessenen. Grund hierfür war die Brandausbreitung auf angrenzende Einrichtungsgegenstände und der damit verbundene Anstieg der HRR. Die Temperaturdifferenzen zwischen den Maximaltemperaturen im Raum der Brandentstehung betrugen für die ME 1 327 °C, für die ME 2 336 °C und für die ME 3 392 °C. Die Temperaturdifferenzen zwischen den Maximaltemperaturen im angrenzenden Raum betrugen für die ME 1 113 °C, für die ME 2 127 °C und für die ME 3 170 °C.

**Tabelle 6.13:** Vergleich der arithmetisch gemittelten maximalen Rauchgastemperaturen in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet), des Raumes, der Messebene (ME 1: Kinder, ME 2: Erwachsene, ME 3: deckennaher Bereich) und der Zeit.

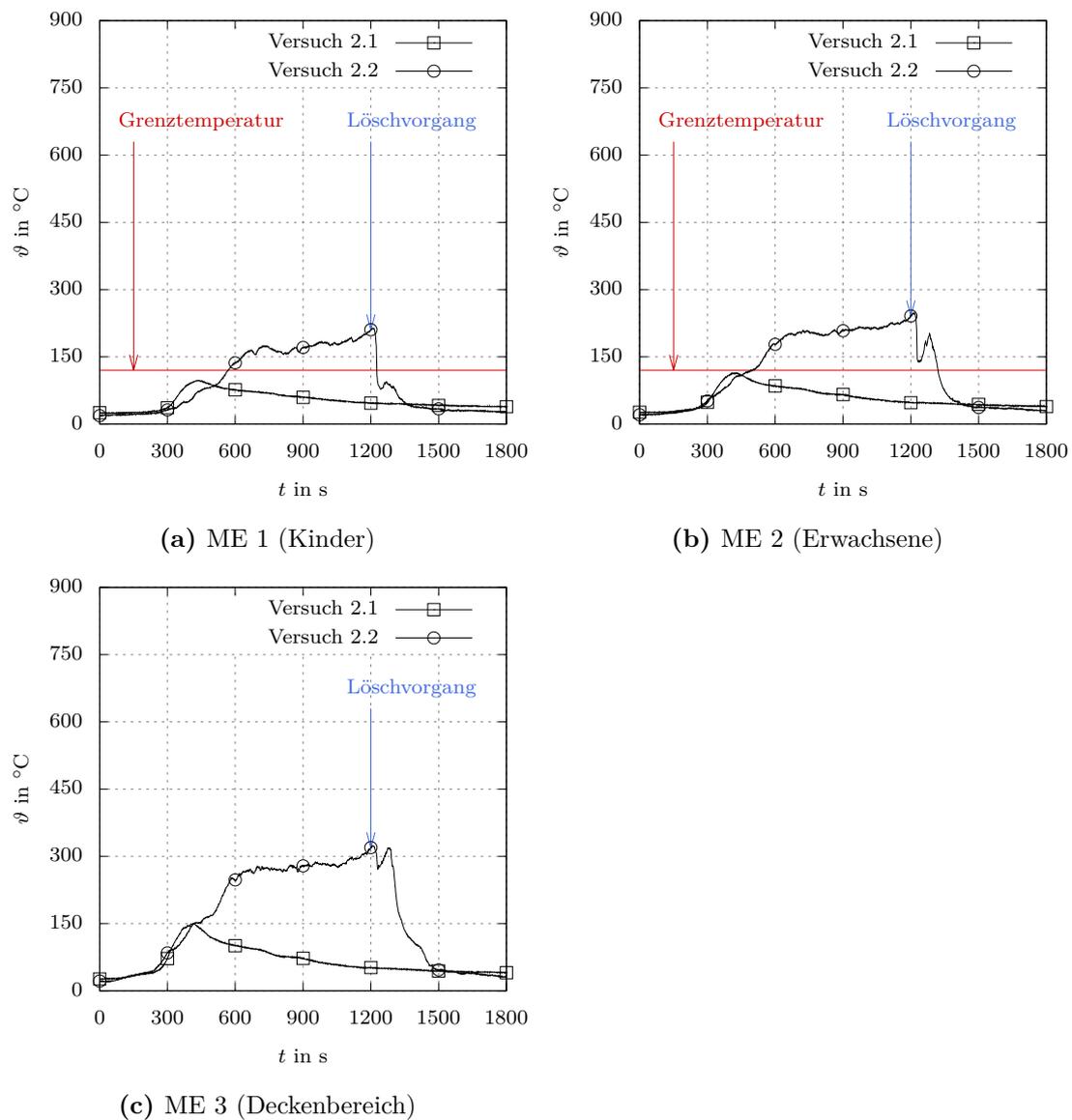
Versuch	Raum	Messebene	Maximaltemperatur	Zeit
-	-	-	$\vartheta_{max}$ in °C	$t$ in s
2.1	Raum der Brandentstehung	ME 1	196	411
		ME 2	223	404
		ME 3	303	302
	angrenzender Raum	ME 1	98	437
		ME 2	114	421
		ME 3	150	414
2.2*	Raum der Brandentstehung	ME 1	523	1191
		ME 2	559	1200
		ME 3	695	862
	angrenzender Raum	ME 1	211	1200
		ME 2	241	1200
		ME 3	320	1200

\*Werte bis zum Löschvorgang (1200s nach Zündbeginn).



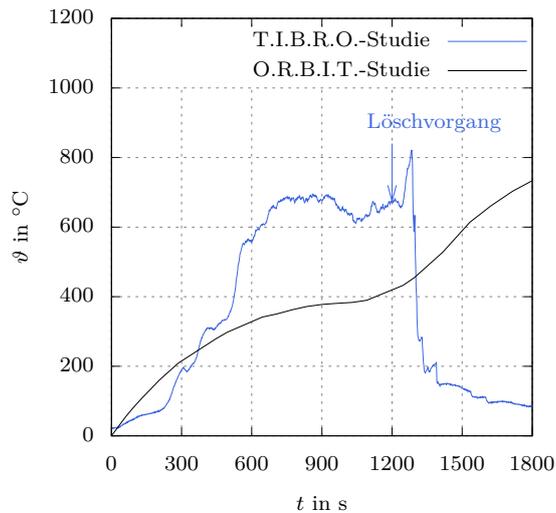
**Abbildung 6.23:** Arithmetisch gemittelte Rauchgastemperaturen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im Raum der Brandentstehung in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet), der Messebene (ME) und der Zeit sowie Darstellung der Grenztemperatur nach [106].

Werden die im Versuch 2.2 im Raum der Brandentstehung ermittelten Rauchgastemperaturen mit denen aus der O.R.B.I.T.-Studie (vgl. Kapitel 1.1) verglichen, so ergeben sich 372 s nach Zündbeginn bis zum Zeitpunkt des Löschvorgangs höhere Rauchgastemperaturen (Abbildung 6.25).



**Abbildung 6.24:** Arithmetisch gemittelte Rauchgastemperaturen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im angrenzenden Raum in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet), der Messebene (ME) und der Zeit sowie Darstellung der Grenztemperatur nach [106].

**Bewertung** Im Versuch 2.2 wurde sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum in allen Messebene die Grenztemperatur erreicht (Tabelle 6.14). Dies erfolgte im Raum der Brandentstehung in der ME 2 nach 281 s und in der ME 1



**Abbildung 6.25:** Vergleich der in der T.I.B.R.O.-Studie ermittelten Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung (Versuch 2.2, ME 3) mit den in der O.R.B.I.T.-Studie [2, 3] publizierten zeitabhängigen Rauchgastemperaturen eines Raumbrandes aus dem Jahr 1939.

71 s später. Im angrenzenden Raum wurde die Grenztemperatur in der ME 2 nach 498 s und in der ME 1 70 s später erreicht.

Im Vergleich der Versuche wird festgestellt, dass die Grenztemperatur in der ME 1 während des Versuches 2.2 im Raum der Brandentstehung 27 s später erreicht wurde als im Versuch 2.1. In der ME 2 wurde die Grenztemperatur hingegen 25 s früher erreicht.

#### 6.3.2.4 Rauchgaskonzentrationen

**Konzentrationsverlauf** Die Ergebnisse aus dem Versuch 2.1 sind dem Kapitel 6.3.1.4 zu entnehmen. Während des Versuches 2.2 wurde im angrenzenden Raum im MP 2 eine Maximalkonzentration für  $\text{CO}_2$  von 188 000 ppm nach 668 s, eine Maximalkonzentration für CO von 28 795 ppm nach 783 s und eine Maximalkonzentration für HCN von 2411,9 ppm nach 806 s erreicht (Abbildung 6.26)<sup>14</sup>. Im MP 1 waren die Maximalkonzentrationen zum einen niedriger als im MP 2 und zum anderen traten sie später ein (Abbildung 6.27). So betrug die Konzentrationsdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen für  $\text{CO}_2$  128 400 ppm, für CO 19 712,65 ppm und für HCN 1750,67 ppm. Die

<sup>14</sup>Der in Abbildung 6.26a dargestellte oszillierende Konzentrationsverlauf des  $\text{CO}_2$  wird auf die im Messpunkt stattfindende Durchmischung des Rauchgases mit von außen durch die Fenster einströmender Luft zurückgeführt.

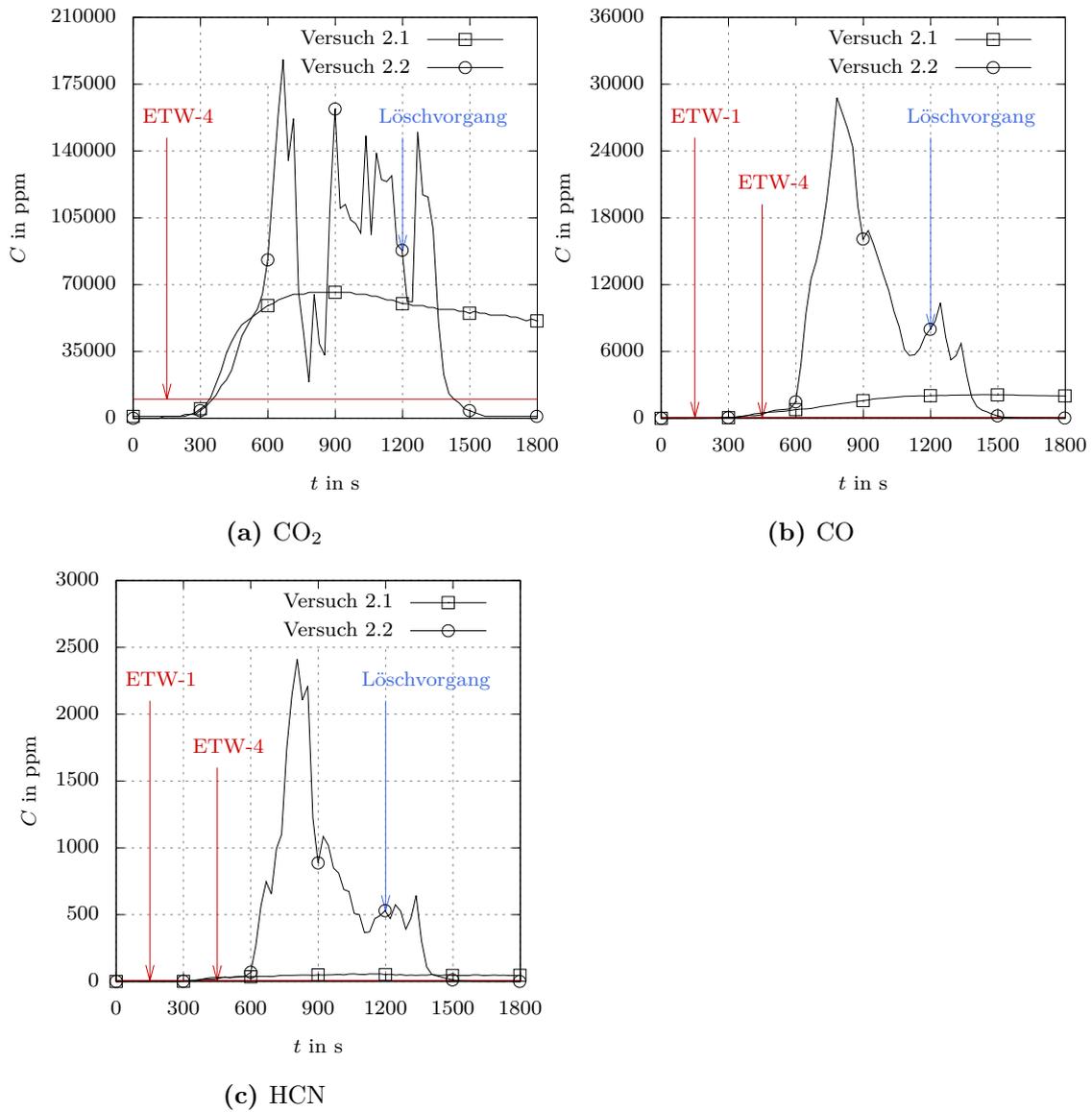
**Tabelle 6.14:** Dauer bis zum Erreichen der Grenztemperatur (120 °C) in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet), des Raumes und der Messebene (ME 1: Kinder, ME 2: Erwachsene).

Versuch	Raum	Messebene	Zeit
-	-	-	<i>t</i> in s
2.1	Raum der Brandentstehung	ME 1	325
		ME 2	306
	angrenzender Raum	ME 1	-
		ME 2	-
2.2	Raum der Brandentstehung	ME 1	352
		ME 2	281
	angrenzender Raum	ME 1	568
		ME 2	498

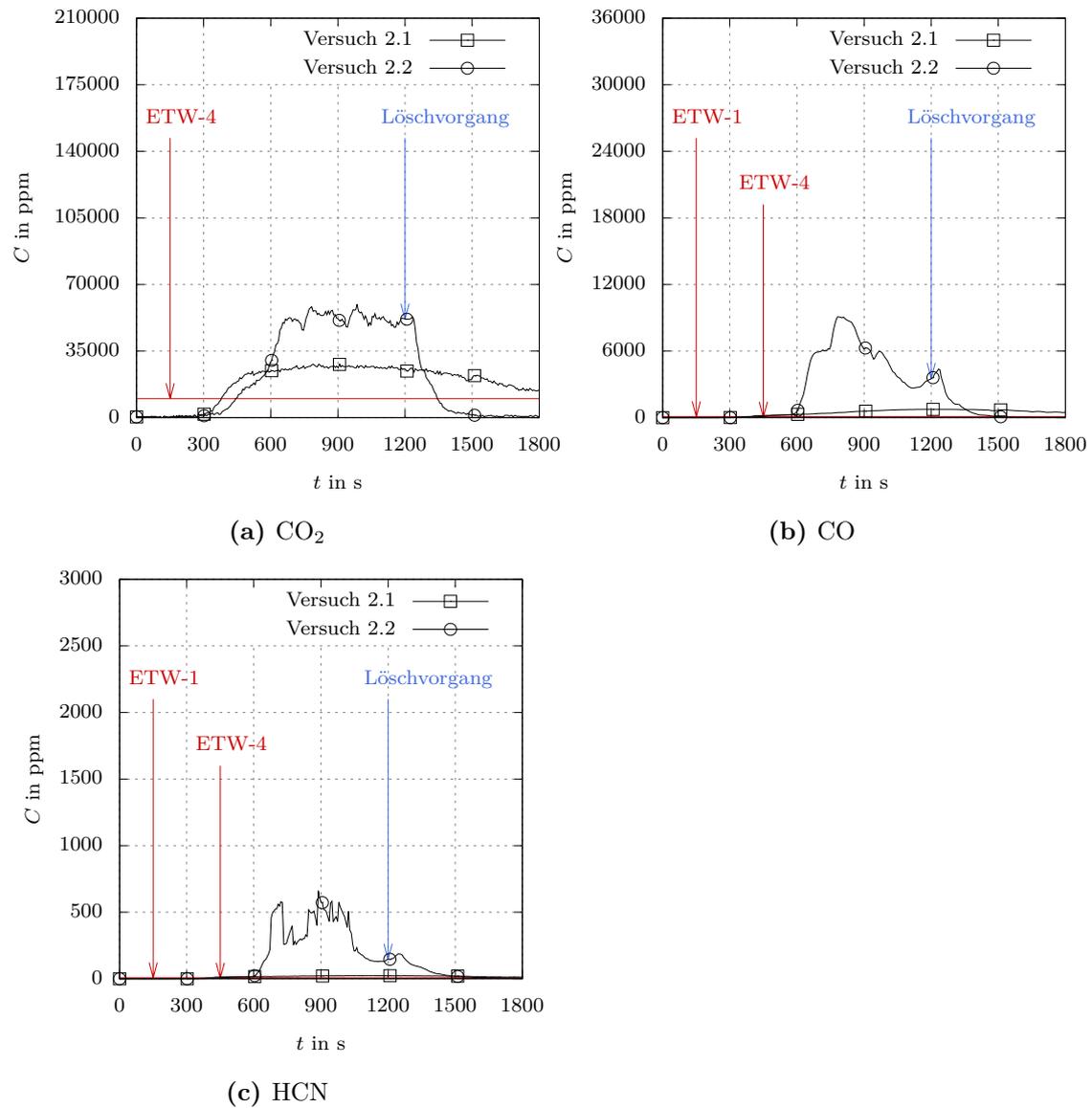
Zeitdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen betrug für CO<sub>2</sub> 318 s, für CO 0 s und für HCN 82 s.

Der Vergleich der Versuche zeigt, dass sich deutliche Rauchgaskonzentrationsunterschiede für CO<sub>2</sub>, CO und HCN 600 s nach Zündbeginn in den Messpunkten MP 1 und MP 2 einstellten (Tabelle 6.15). Bis zur Initiierung des Löschvorgangs (1200 s nach Zündbeginn) waren die Rauchgaskonzentrationen im Versuch 2.2 höher als die im Versuch 2.1. Dies betrifft die Rauchgaskonzentrationen des CO<sub>2</sub>, CO und HCN sowohl im MP 1 als auch im MP 2. Eine Ausnahme bildet die Rauchgaskonzentration des CO<sub>2</sub> innerhalb der ersten 600 s. Die Differenzen der maximalen Rauchgaskonzentrationen im angrenzenden Raum betragen im MP 2 für CO<sub>2</sub> 122 000 ppm (+185 %), für CO 26 669 ppm (+1254 %) und für HCN 2355,3 ppm (+4161 %). Die Zeitdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen betragen dabei für CO<sub>2</sub> 116 s, für CO 669 s und für HCN 254 s. Die Differenzen der maximalen Rauchgaskonzentrationen im MP 1 betragen für CO<sub>2</sub> 31 500 ppm (+112 %), für CO 8324,35 ppm (+1098 %) und für HCN 636,61 ppm (+2586 %). Die Zeitdifferenz zwischen den Maximalkonzentrationen betragen dabei für CO<sub>2</sub> 196 s (die Maximalkonzentration trat im MP 1 zwar früher ein, war jedoch insgesamt niedriger als im MP 2), für CO 389 s und für HCN 241 s.

Wird die im Versuch 2.2 im angrenzenden Raum ermittelte CO-Konzentration mit der aus der O.R.B.I.T.-Studie (vgl. Kapitel 1.1) verglichen, so ergeben sich 668 s nach Zündbeginn höhere CO-Konzentrationen (Abbildung 6.28).



**Abbildung 6.26:** Rauchgaskonzentrationen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im angrenzenden Raum im MP 2 (Erwachsene) in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet) und der Zeit sowie Darstellung des jeweiligen rauchgasspezifischen Einsatztoleranzwertes (ETW) nach [108].

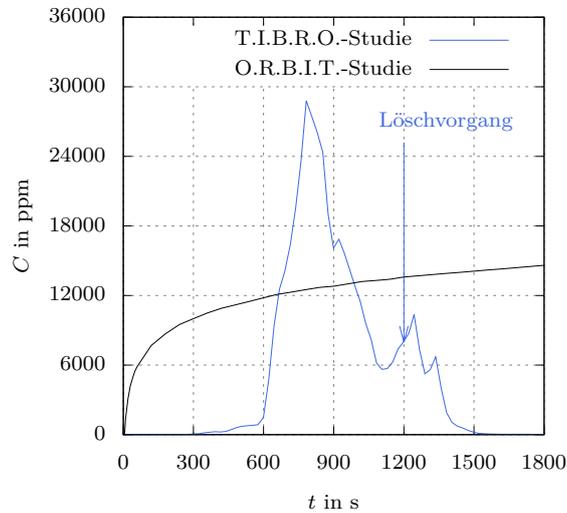


**Abbildung 6.27:** Rauchgaskonzentrationen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im angrenzenden Raum im MP 1 (Kinder) in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen und der Zeit sowie Darstellung des jeweiligen rauchgasspezifischen Einsatztoleranzwertes (ETW) nach [108].

**Tabelle 6.15:** Vergleich der maximalen Rauchgaskonzentrationen in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet), des Messpunktes (MP 1: Kinder, MP 2: Erwachsene) und der Zeit.

Versuch	Raum	Messpunkt	Gas	Maximalkonzentration	Zeit
-	-	-	-	$C_{max}$ in ppm	$t$ in s
2.1	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	28 100,00	790
			CO	758,00	1172
			HCN	24,62	1129
		MP 2	CO <sub>2</sub>	66 000,00	784
			CO	2126,00	1452
			HCN	56,60	1060
2.2*	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	59 600,00	986
			CO	9082,35	783
			HCN	661,23	888
		MP 2	CO <sub>2</sub>	188 000,00	668
			CO	28 795,00	783
			HCN	2411,90	806

\*Werte bis zum Löschvorgang (1200 s nach Zündbeginn).



**Abbildung 6.28:** Vergleich der in der T.I.B.R.O.-Studie ermittelten CO-Konzentration im angrenzenden Raum (Versuch 2.2, MB 3, MP 2) mit der in der O.R.B.I.T.-Studie [2, 3] publizierten zeitabhängigen CO-Konzentration.

**Bewertung** Während des Versuches 2.2 wurden im angrenzenden Raum ebenfalls sowohl im MP 2 als auch MP 1 die ETW-4 für CO<sub>2</sub>, CO und HCN überschritten (Tabelle 6.16). Dies erfolgte im MP 2 für CO<sub>2</sub> nach 369 s, für CO nach 299 s und für HCN nach 322 s. Im MP 1 erfolgte die Überschreitung des ETW-4 später. Die Zeitdifferenz zu der im MP 2 erfolgten Überschreitung betrug für CO<sub>2</sub> 444 s, für CO 382 s und für HCN 413 s.

**Tabelle 6.16:** Dauer bis zum Erreichen des rauchgasspezifischen Einsatztoleranzwertes (ETW) in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 2.1: Fenster geschlossen, Versuch 2.2: Fenster geöffnet) und des Messpunktes (MP 1: Kinder, MP 2: Erwachsene).

Versuch	Raum	Messpunkt	Gas	ETW	Zeit
-	-	-	-	-	<i>t</i> in s
2.1	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-
				ETW-4	382
			CO	ETW-1	370
				ETW-4	327
			HCN	ETW-1	388
				ETW-4	376
	MP 2	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-	
			ETW-4	346	
		CO	ETW-1	323	
			ETW-4	277	
		HCN	ETW-1	369	
			ETW-4	346	
2.2	angrenzender Raum	MP 1	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-
				ETW-4	444
			CO	ETW-1	438
				ETW-4	382
			HCN	ETW-1	450
				ETW-4	413
	MP 2	CO <sub>2</sub>	ETW-1	-	
			ETW-4	369	
		CO	ETW-1	322	
			ETW-4	299	
		HCN	ETW-1	346	
			ETW-4	322	

Der Vergleich der Versuche zeigt, dass die Überschreitung der ETW-4 für CO<sub>2</sub>, CO und HCN im angrenzenden Raum im Versuch 2.2 überwiegend später erfolgte. Grund hierfür sind die sich einstellenden Ventilationsverhältnisse zwischen dem angrenzenden Raum und dem Gebäudeäußeren. Bezogen auf den MP 2 betrug die Zeitdifferenz für CO<sub>2</sub> 23 s, für CO 22 s und für HCN –24 s (ETW-4 wurde im Versuch 2.2 früher erreicht). Bezogen auf den MP 1 betrug die Zeitdifferenz für CO<sub>2</sub> 62 s, für CO 55 s und für HCN 37 s.

## 6.4 Schlussfolgerungen

Zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Brandausbreitung in Wohnungen wurden originalmaßstäbliche Brandversuche durchgeführt. In Abhängigkeit von einer veränderten stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände sowie unterschiedlicher Ventilationsbedingungen wurden neben der Höhe der raucharmen Schicht und dem Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern auch Rauchgastemperaturen und Rauchgaskonzentrationen erfasst und ausgewertet. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse werden folgende Schlussfolgerungen abgeleitet: Die durch die zunehmende Verwendung von Werkstoffen auf der Basis von Holz und Polymeren veränderte stoffliche Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen führte im Vergleich zu älteren Einrichtungsgegenständen zu einem früheren Eintreten von lebensbedrohlichen Umgebungsbedingungen (Rauchgastemperatur und Rauchgaskonzentration) sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum.

Der erste brennende Einrichtungsgegenstand führte bereits zu lebensbedrohlichen Umgebungsbedingungen (Rauchgastemperatur und Rauchgaskonzentration) sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum. Aufgrund der von ihm ausgehenden zeitabhängigen HRR und Stofffreisetzungsraten besitzt er einen großen Einfluss auf die weitere Brandausbreitung.

Die Variation der Ventilationsöffnungen (Fenster geschlossen / Fenster geöffnet) führte bei Bränden mit gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase zu einem veränderten zeitlichen Eintreten von lebensbedrohlichen Umgebungsbedingungen (Rauchgastemperatur und Rauchgaskonzentration) sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum. So konnten die Rauchgastemperaturen bei geöffneten Fenstern aufgrund der Flammenausbreitung auf angrenzende Einrichtungsgegenstände im Raum der Brandentstehung sowie im angrenzenden Raum schneller als bei geschlossenen Fenstern ansteigen. Gleichzeitig erfolgte die Überschreitung der rauchgaskonzentrationsspezifischen Grenzwerte (ETW) im angrenzenden Raum im Fall der geöffneten Fenster überwiegend später (Tabelle 6.16).

Aufgrund geringerer Rauchgastemperaturen und dem damit verbundenen späteren Überschreiten von Grenztemperaturen ist der Aufenthalt im angrenzenden Raum sicherer. Innerhalb des angrenzenden Raumes erfolgte eine Überschreitung von rauchgastemperatur- und rauchgaskonzentrationsspezifischen Grenzwerten auf der Größe von Kindern später als auf der Größe von Erwachsenen. Ist ein Verlassen der Wohnung und das Verschließen

von Zimmertüren zum Raum der Brandentstehung nicht möglich, so ist der bodennahe Aufenthalt in angrenzenden Räumen bei geöffneten Fenstern im Hinblick auf das Eintreten lebensbedrohlicher Umgebungsbedingungen (Rauchgastemperatur und Rauchgaskonzentration) am sichersten.

Der im Versuch 2.2 vorgenommene Löschvorgang (einschließlich der Türöffnung vom Flur in den angrenzenden Raum) führte im angrenzenden Raum zu einem Temperaturabfall. Gleichzeitig förderte die dadurch zusätzlich einströmende Luft den Verbrennungsprozess im Raum der Brandentstehung, was zu einem kurzzeitigen Temperaturanstieg führte, bevor Löscheffekte wirkten und in einem Temperaturabfall resultierten. Das Zeitintervall zwischen dem Schaffen von Zugangsöffnungen und der Durchführung von Löschmaßnahmen sollte daher möglichst gering gehalten werden um einer weiteren dadurch verursachten Zunahme der Flammen- und Rauchgasausbreitung entgegenzuwirken. Darüber hinaus kann das Verringern dieser geschaffenen Zugangsöffnungen durch z. B. mobile Rauchvorhänge dem Effekt der verursachten Zunahme der Flammen- und Rauchgasausbreitung entgegenwirken. Gleichzeitig wird dadurch der Raucheintrag in den Flur (Rettungsweg) begrenzt.

In allen Versuchen war die Ansprechzeit der Rauchwarnmelder sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum geringer der Zeit, bei der sich lebensbedrohliche Umgebungsbedingungen (Rauchgastemperatur und Rauchgaskonzentration) eingestellt hatten. Demzufolge tragen Rauchwarnmelder zu einer erfolgreichen Selbstrettung durch akustische Warnsignale bei und senken dadurch die Anzahl der Todesopfer in Folge von Wohnungsbränden.

Der in der O.R.B.I.T.-Studie [2, 3] publizierte Rauchgastemperatur- und CO-Konzentrationsverlauf eignet sich nicht mehr als Grundlage zur Bedarfsplanung von Feuerwehren. Zum einen hat sich, wie beschrieben, die stoffliche Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände verändert, was, wie gezeigt, zu veränderten Brandverläufen führt. Zum anderen berücksichtigt das Modell nur die mit der CO-Intoxikation verbundenen Phänomene. Weder werden toxische Wirkungen weiterer im Rauchgas enthaltenen Stoffkonzentrationen (wie beispielsweise HCN) berücksichtigt noch findet die thermische Wirkung des Rauchgases Berücksichtigung (vgl. Kapitel 6.2.9).

# KAPITEL 7

---

## Numerische Untersuchung von Brandszenarien

Auf der Grundlage der in Kapitel 4 beschriebenen experimentellen Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Materialzusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Stoff- und Energiefreisetzung bei Bränden in Wohnungen wurden numerische Untersuchungen durchgeführt. In Abhängigkeit von den im Kapitel 4 beschriebenen Materialzusammensetzungen wurden ergänzend zu den in Kapitel 6 beschriebenen experimentellen Untersuchungen weitere Brandszenarien definiert und berechnet. Die Untersuchungen wurden auszugsweise in [11, 79–83] veröffentlicht.

### 7.1 Untersuchungsziel

Die in Kapitel 4 dargestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Materialzusammensetzung von Einrichtungsgegenständen einen großen Einfluss auf die Stoff- und Energiefreisetzung bei Bränden in Wohnungen besitzt. So wurden bei gegenwärtigen Materialzusammensetzungen im Vergleich zur älteren Materialzusammensetzung im Rahmen kleinmaßstäblicher Brandversuche sowohl höhere effektive Verbrennungswärmen als auch zum Teil höhere Stoffausbeuten ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  und Ruß) festgestellt. Die im Kapitel 6 dargestellten Untersuchungsergebnisse aus originalmaßstäblichen Brandversuchen zeigen ebenfalls, dass gegenwärtige Einrichtungsgegenstände gegenüber älteren Einrichtungsgegenständen sowohl zu höheren Rauchgastemperaturen als auch zu höheren Rauchgaskonzentrationen in Wohnungen führen. In der genannten Versuchsserie wurden jedoch nur diese beiden stofflichen Zusammensetzungen im Originalmaßstab untersucht (vgl. Kapitel 6.2.3).

Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchung ist die Beantwortung der Fragestellung, wie sich die in Kapitel 4 untersuchten Materialzusammensetzungen (MZ 1 bis MZ 4) von Einrichtungsgegenständen mit unterschiedlich hohem Anteil polymerer Werkstoffe auf die Brandentstehungsphase (erster brennender Einrichtungsgegenstand) in Wohnungen auswirken. Dazu wurden sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einem angrenzenden Raum neben Rauchgastemperaturen auch Rauchgaskonzentrationen berechnet und ausgewertet.

## 7.2 Untersuchungsmethode und -gegenstand

### 7.2.1 Brandszenarien

Zur Untersuchung des Einflusses der unterschiedlichen Materialzusammensetzungen wurden vergleichende numerische Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurden die in Kapitel 4 bestimmten HRR, effektiven Verbrennungswärmen und Stoffausbeuten der Materialzusammensetzungen MZ 1 bis MZ 4 im Rahmen von Brandszenarien herangezogen (Abbildung 7.1). Die im Brandszenario BZ 1 verwendete Materialzusammensetzung beschreibt ältere Einrichtungsgegenstände (MZ 1). Die in den Brandszenarien BZ 2 bis BZ 4 verwendeten Materialzusammensetzungen beschreiben gegenwärtige Einrichtungsgegenstände mit unterschiedlich hohen Anteilen polymerer Werkstoffe (MZ 2 bis MZ 4).

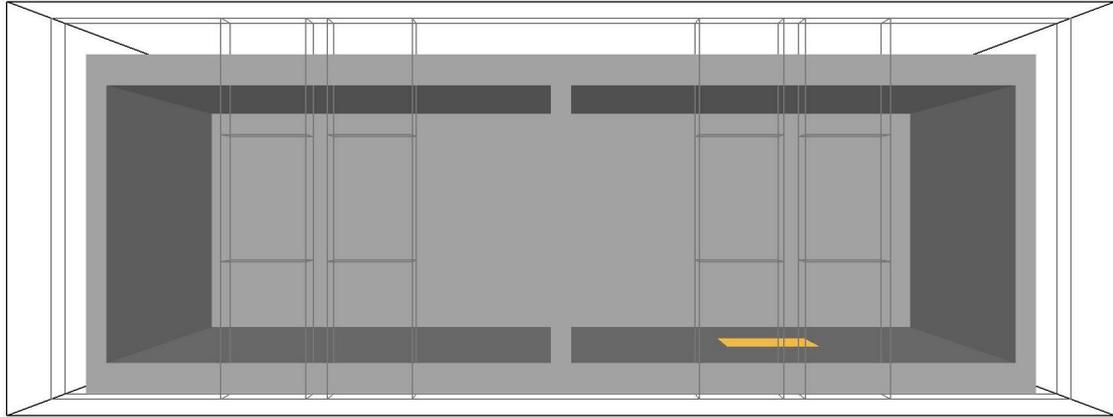


**Abbildung 7.1:** Definierte Brandszenarien zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialzusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Brandentstehungsphase.

Die Lage des Ortes der Stoff- und Energiefreisetzung (modellierter erster brennender Einrichtungsgegenstand) befindet sich in der Raummitte des Raumes der Brandentstehung (Abbildung 7.2). Die Untersuchungsdauer wurde auf 1200 s begrenzt.

## 7.2.2 Randbedingungen

Zur numerischen Untersuchung der Brandszenarien wurden die in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Raumgeometrien herangezogen (Abbildung 7.2)<sup>1</sup>.



**Abbildung 7.2:** In *SMV* visualisierte Raumgeometrien im Rechengebiet zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialzusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Brandentstehungsphase. Links: angrenzender Raum, rechts: Raum der Brandentstehung (gelbe Fläche: Ort der Stoff- und Energiefreisetzung).

Es wurde angenommen, dass die Umfassungsbauteile aus Beton<sup>2</sup> bestehen. Die Temperatur der Umfassungsbauteile sowie der Umgebung beträgt zum Zeitpunkt 0s der numerischen Berechnung 20 °C (Tabelle 7.1). Als Ventilationsöffnungen dienen die Fenster 1 bis 4 (Abbildung 6.9).

**Tabelle 7.1:** Klimabedingungen im Inneren sowie außerhalb der Raumgeometrien.

Eigenschaft	Wert
Umgebungstemperatur	20 °C
Luftdruck	101 325 Pa
relative Luftfeuchtigkeit	50 %

<sup>1</sup>Darstellung durch das vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelten Visualisierungsprogramm *Smokeview (SMV)*, Version 6.6.0 vom 1. November 2017 [111–113].

<sup>2</sup>Die thermophysikalischen Stoffeigenschaften der Umfassungsbauteile (Beton) sind dem Anhang F, Tabelle F.1 und Tabelle F.2 zu entnehmen.

Die zur Berechnung der Brandszenarien verwendete nötige Größe des numerischen Gitters wurde nach Gleichung 7.1 [45] bestimmt.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}(t)}{\rho \cdot c_p \cdot T \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (7.1)$$

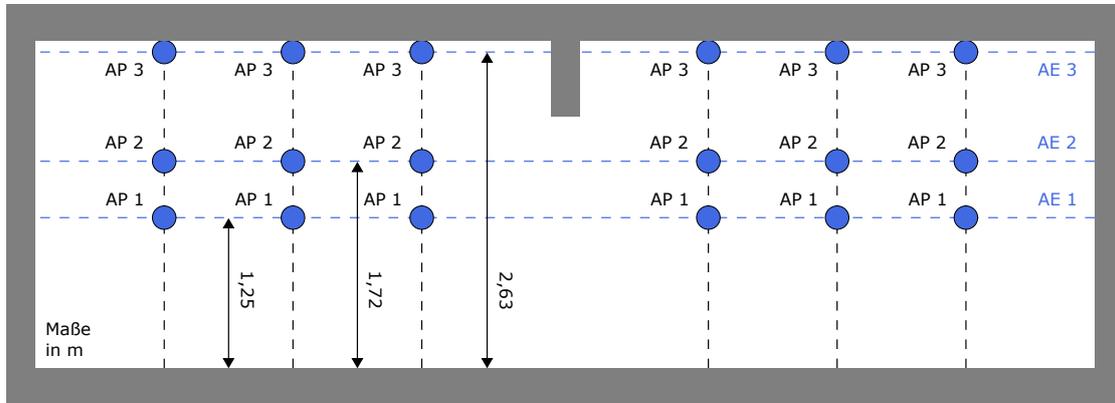
$D^*$  ist der charakteristische Flammendurchmesser in m.  $\dot{Q}(t)$  ist die Wärmefreisetzungsrates in kW.  $\rho$  ist die Dichte der Umgebungsluft in  $\text{kg/m}^3$ .  $c_p$  ist die spezifische Wärmekapazität der Umgebungsluft in  $\text{kJ}/(\text{kg K})$ .  $T$  ist die Temperatur der Umgebungsluft in K.  $g$  ist die Erdbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$ .

Nach [114] werden für den Quotient aus  $D^*$  und der Gittergröße  $\delta x$  Werte zwischen 4 und 16 vorgeschlagen. Unter Berücksichtigung einer maximalen HRR von 2137 kW (BZ 4), einer Dichte der Umgebungsluft von  $1,188 \text{ kg/m}^3$  [115] und einer spezifischen Wärmekapazität der Umgebungsluft von  $1,007 \text{ kJ}/(\text{kg K})$  [115] ergaben sich für  $\delta x$  Werte von 0,08 m bis 0,33 m. Zur Berechnung der Brandszenarien wurde eine Gittergröße von  $\delta x = \delta y = \delta z = 0,1 \text{ m}$  verwendet und durch eine Untersuchung der Sensitivität (Gitterstudie) überprüft. Das Rechengebiet bestand aus insgesamt 207 360 Gitterzellen.

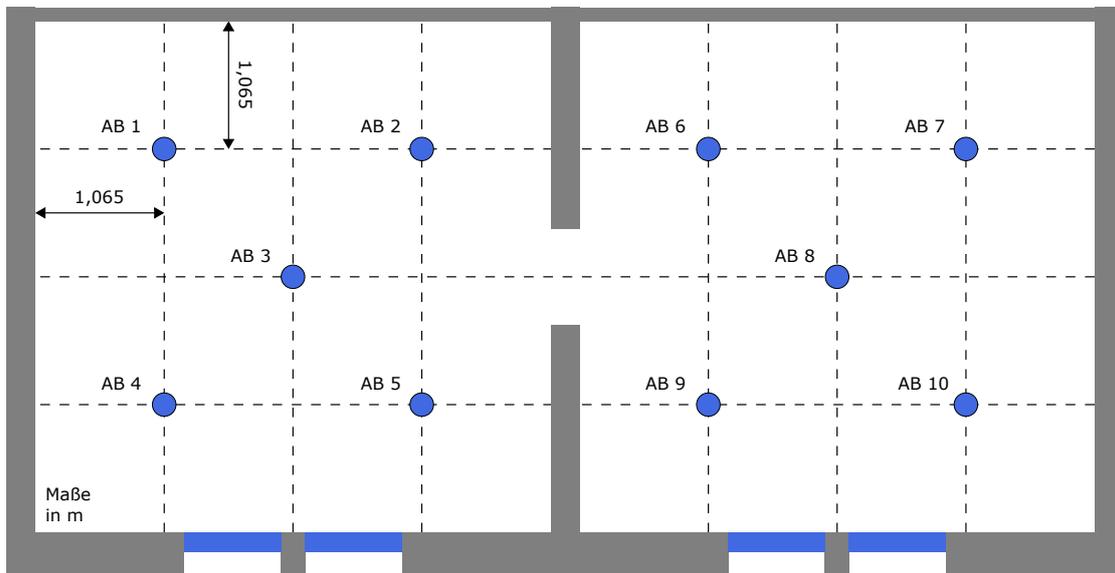
### 7.2.3 Auswertung

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialzusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Brandentstehungsphase wurden sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum neben Rauchgastemperaturen auch CO-Konzentrationen an insgesamt 30 Stellen, davon 15 in jedem der beiden Räume, ausgewertet (Abbildung 7.3).

Die horizontale und vertikale Verteilung der Auswertungsstellen war raumübergreifend identisch. Die horizontale Lagebeschreibung (X-Y-Ebene) der Auswertungsstellen erfolgte mittels Auswertungsbäumen (AB), die vertikale (Z-Ebene) mittels Auswertungspunkten (AP). Jeweils fünf auf gleicher Höhe angeordnete Auswertungspunkte wurden als Auswertungsebene (AE) zusammengefasst. Der arithmetische Mittelwert der in diesen fünf Auswertungspunkten berechneten Rauchgastemperaturen ergibt die arithmetisch gemittelte Rauchgastemperatur der Auswertungsebene. Die Höhen der Auswertungsebenen ergaben sich aus den in Kapitel 6.2.8 getroffenen Aussagen. Die Berechnung und Auswertung der CO-Konzentrationen erfolgte analog zu den Rauchgastemperaturen.



(a) Aufriß



(b) Grundriß

**Abbildung 7.3:** Anordnung der Auswertungsstellen (Rauchgastemperatur und Rauchgaskonzentrationen) in den Raumeometrien zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialzusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Brandentstehungsphase.

### 7.2.4 Validierung

Zur Validierung des numerischen Modells wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt (Abbildung 7.4).



(a) Versuch 1: 0 s



(b) Versuch 2: 0 s



(c) Versuch 1: 150 s

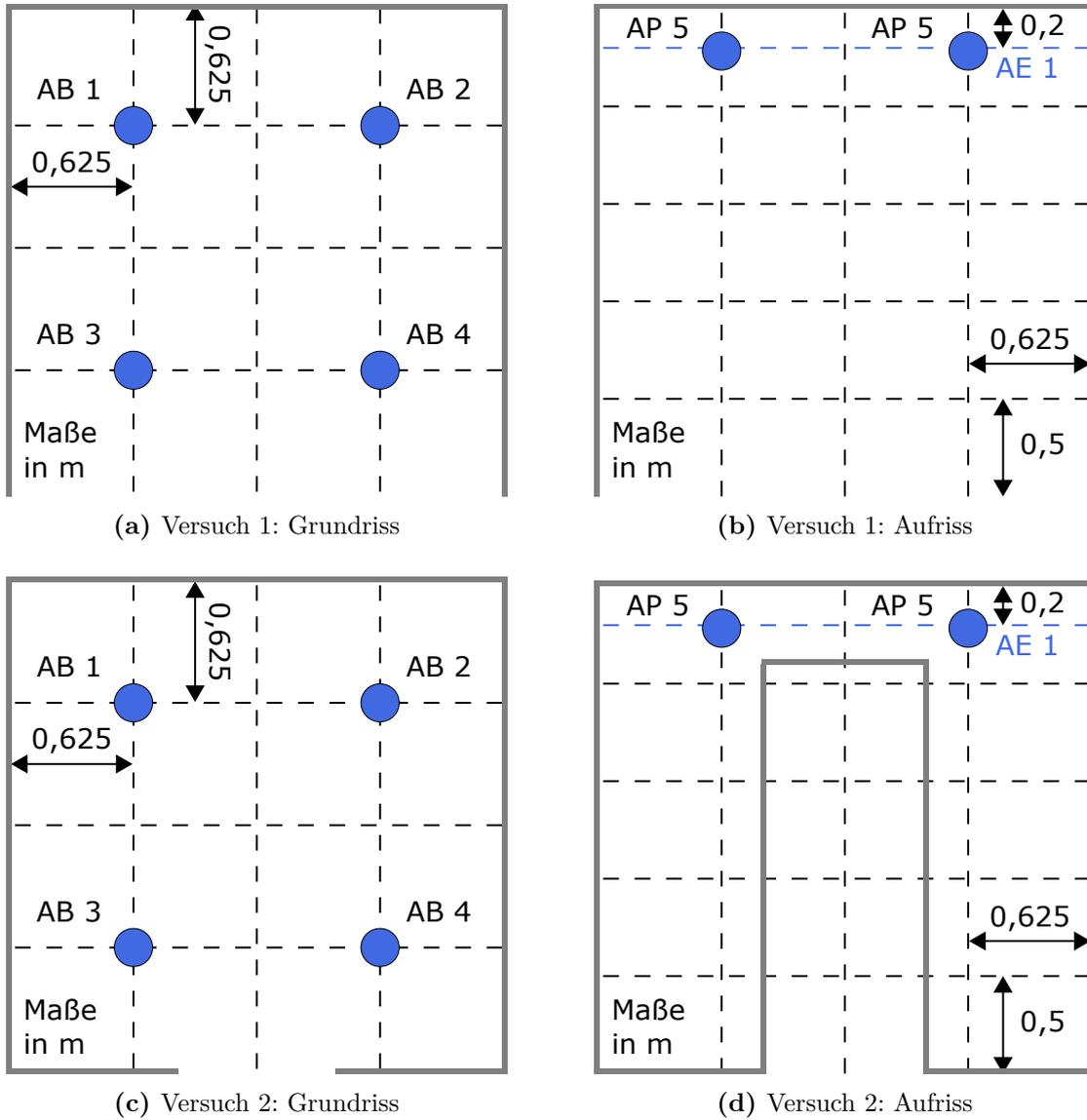


(d) Versuch 2: 150 s

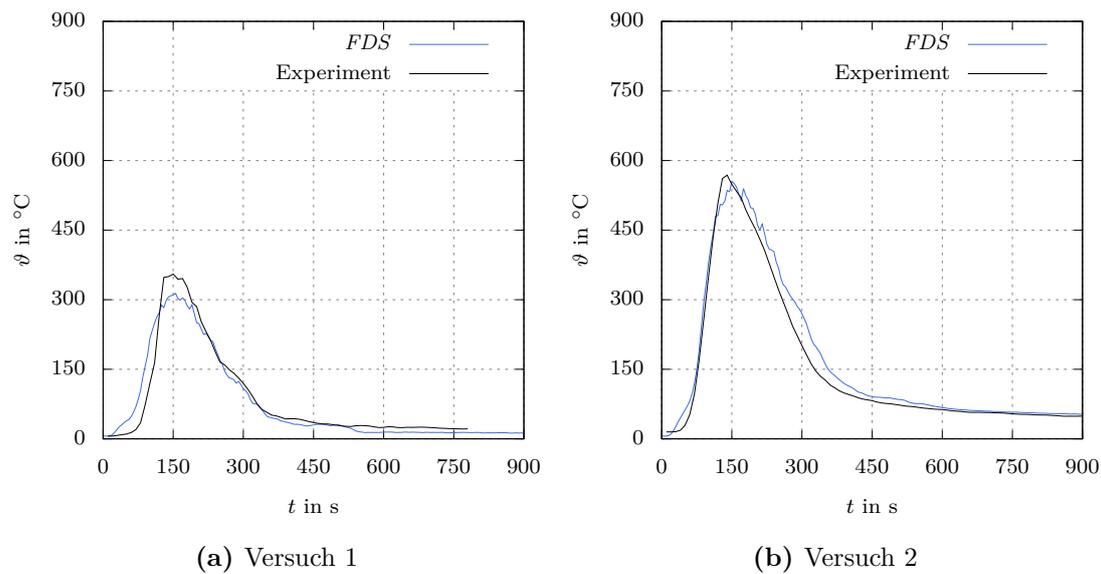
**Abbildung 7.4:** Flammen- und Rauchgasausbreitung in der Untersuchungsgeometrie durch den Brand des Versuchskörpers aus PUR in einer Versuchskörpermasse von 5 kg in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) und der Zeit.

Die Untersuchungsmethodik basiert auf der des Kapitels 5. Als Versuchskörper wurde der in Kapitel 4.2.4 vorgestellte Versuchskörper aus PUR in einer Versuchskörpermasse von 5 kg herangezogen. Die Temperaturmessung und -auswertung erfolgte an insgesamt vier Stellen (Abbildung 7.5), aus denen die arithmetischen Mittelwerte in Form einer Auswertungsebene (AE 1) berechnet und miteinander verglichen wurden.

Der Vergleich der mit *FDS* berechneten und experimentell bestimmten Rauchgastemperaturen in der AE 1 zeigt sowohl für den Versuch 1 als auch für den Versuch 2 eine sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 7.6).



**Abbildung 7.5:** Anordnung der Mess- und Auswertungsstellen in den Untersuchungsgeometrien zur Validierung des numerischen Modells (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung).



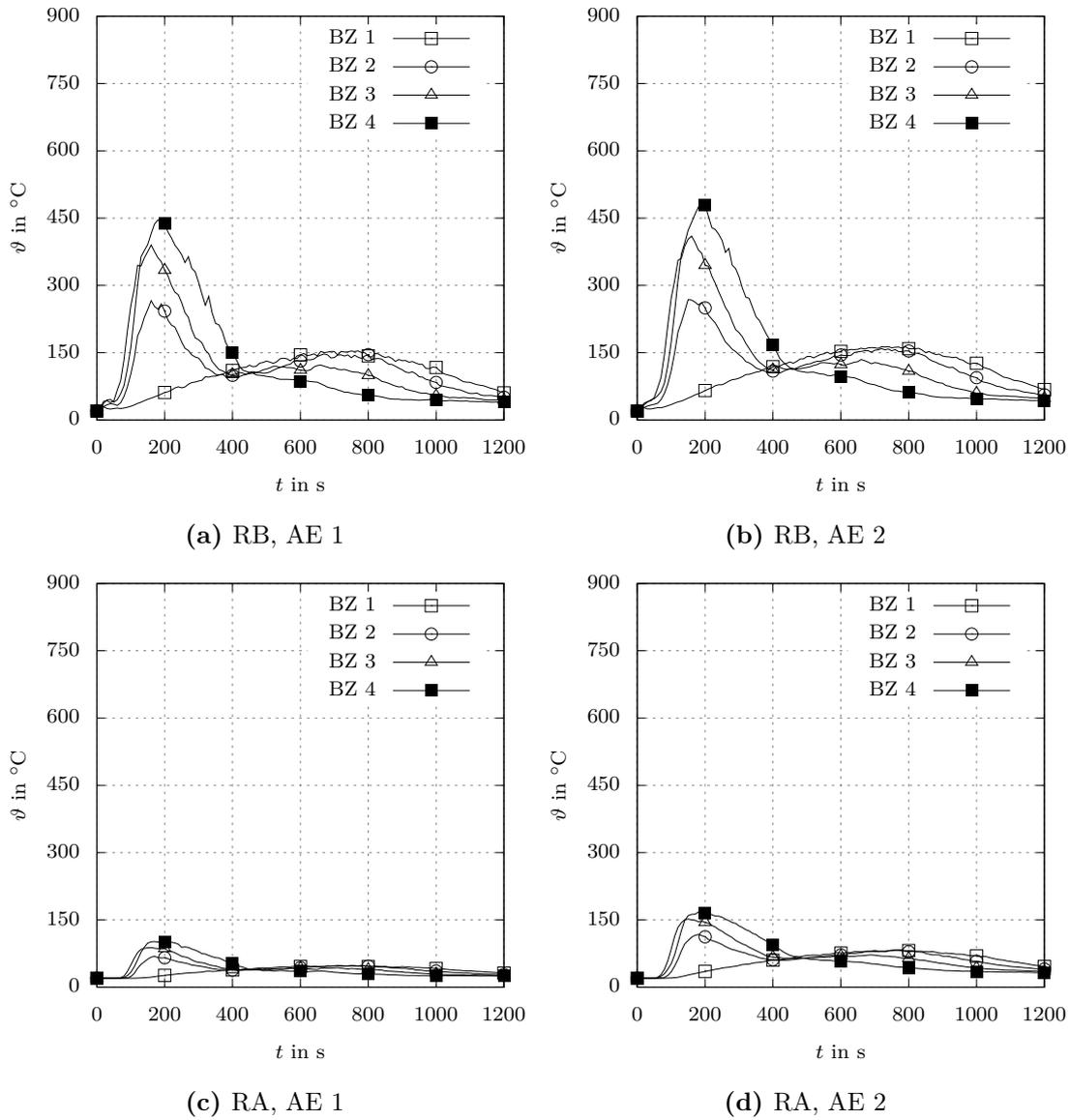
**Abbildung 7.6:** Validierung der mit *FDS* berechneten und arithmetisch gemittelten Rauchgastemperaturen in der Auswertungsebene (AE) 1 in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen und der Zeit. (a) Versuch 1: Wandöffnung, (b) Versuch 2: Türöffnung.

## 7.3 Ergebnisse und Diskussion

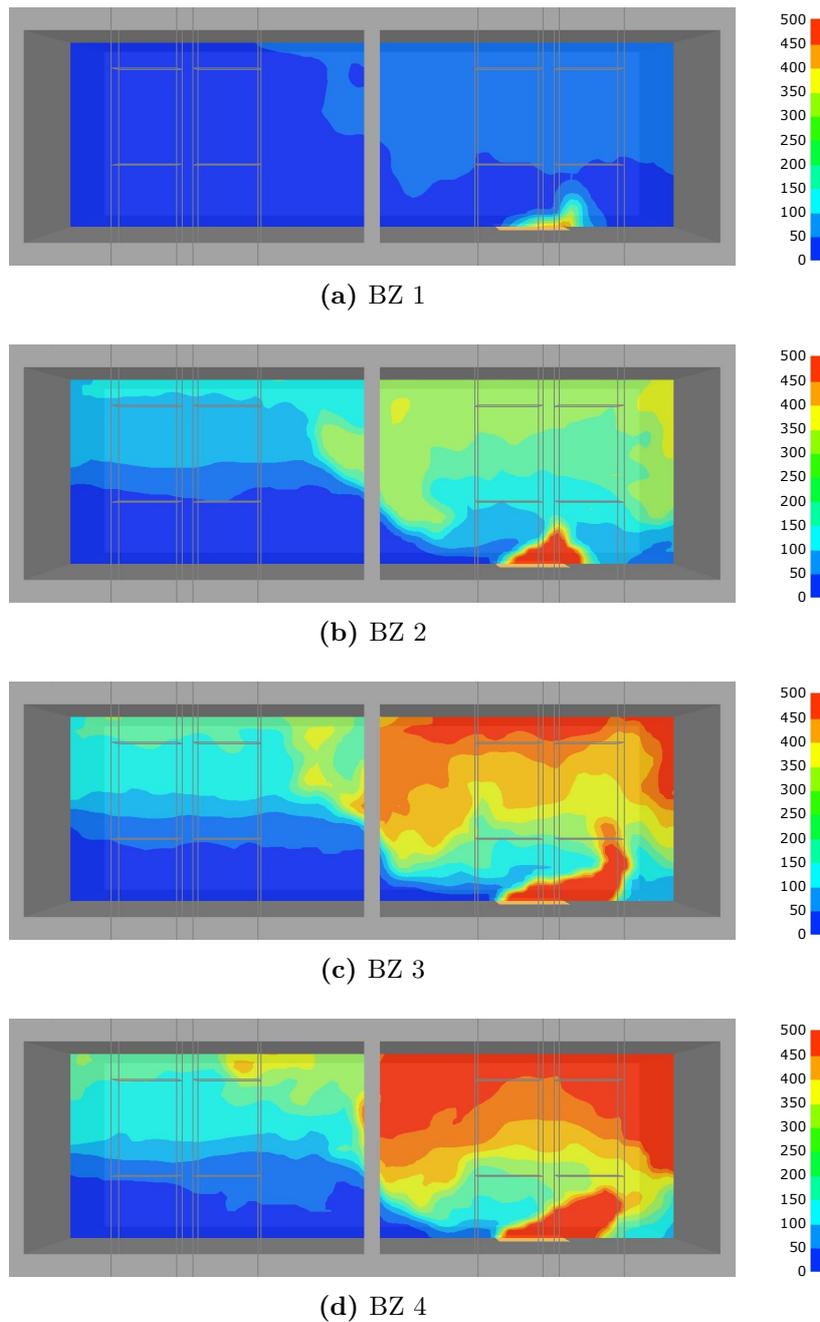
### 7.3.1 Rauchgastemperaturen

Äquivalent zu den in Kapitel 6 durchgeführten experimentellen Untersuchungen treten im Raum der Brandentstehung in der AE 2 die höchsten Rauchgastemperaturen für das jeweilige Brandszenario auf (Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8). Die niedrigsten Rauchgastemperaturen treten für das jeweilige Brandszenario im angrenzenden Raum in der AE 1 auf.

Der Vergleich der Brandszenarien 1 bis 4 zeigt, dass das Brandszenario BZ 1 zu niedrigeren Rauchgastemperaturen führt als die Brandszenarien BZ 2 bis BZ 4. Dies gilt sowohl für den Raum der Brandentstehung als auch für den angrenzenden Raum. Der Vergleich der Brandszenarien BZ 2 bis BZ 4 zeigt weiterhin, dass sich die zugrunde gelegte Materialzusammensetzung deutlich auf die berechneten Rauchgastemperaturen auswirkt. So steigt mit zunehmendem Anteil des Polyurethanes auch die sich einstellende Rauchgastemperatur. Grund hierfür ist die höhere effektive Verbrennungswärme gegenüber Span. Des Weiteren treten die maximalen Rauchgastemperaturen in den Brandszenarien BZ 2 bis BZ 4 früher ein als im Brandszenario BZ 1. Dieses zeitliche Verhalten beruht auf den zugrunde gelegten zeitabhängigen MLR (vgl. Kapitel 4.3.2).



**Abbildung 7.7:** Mit *FDS* berechnete und arithmetisch gemittelte Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung (RB) sowie im angrenzenden Raum (RA) in den Auswertungsebenen (AE) 1 und 2 in Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Brandszenarien (BZ 1: ältere Materialzusammensetzung, BZ 2 bis BZ 4: gegenwärtige Materialzusammensetzungen) und der Zeit.



**Abbildung 7.8:** Mit *SMV* visualisierte Rauchgastemperaturen in °C (Schnitt durch die Raummitten) im Raum der Brandentstehung (rechts) sowie im angrenzenden Raum (links) in Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Brandszenarien (BZ 1: ältere Materialzusammensetzung, BZ 2 bis BZ 4: gegenwärtige Materialzusammensetzungen) nach 180 s.

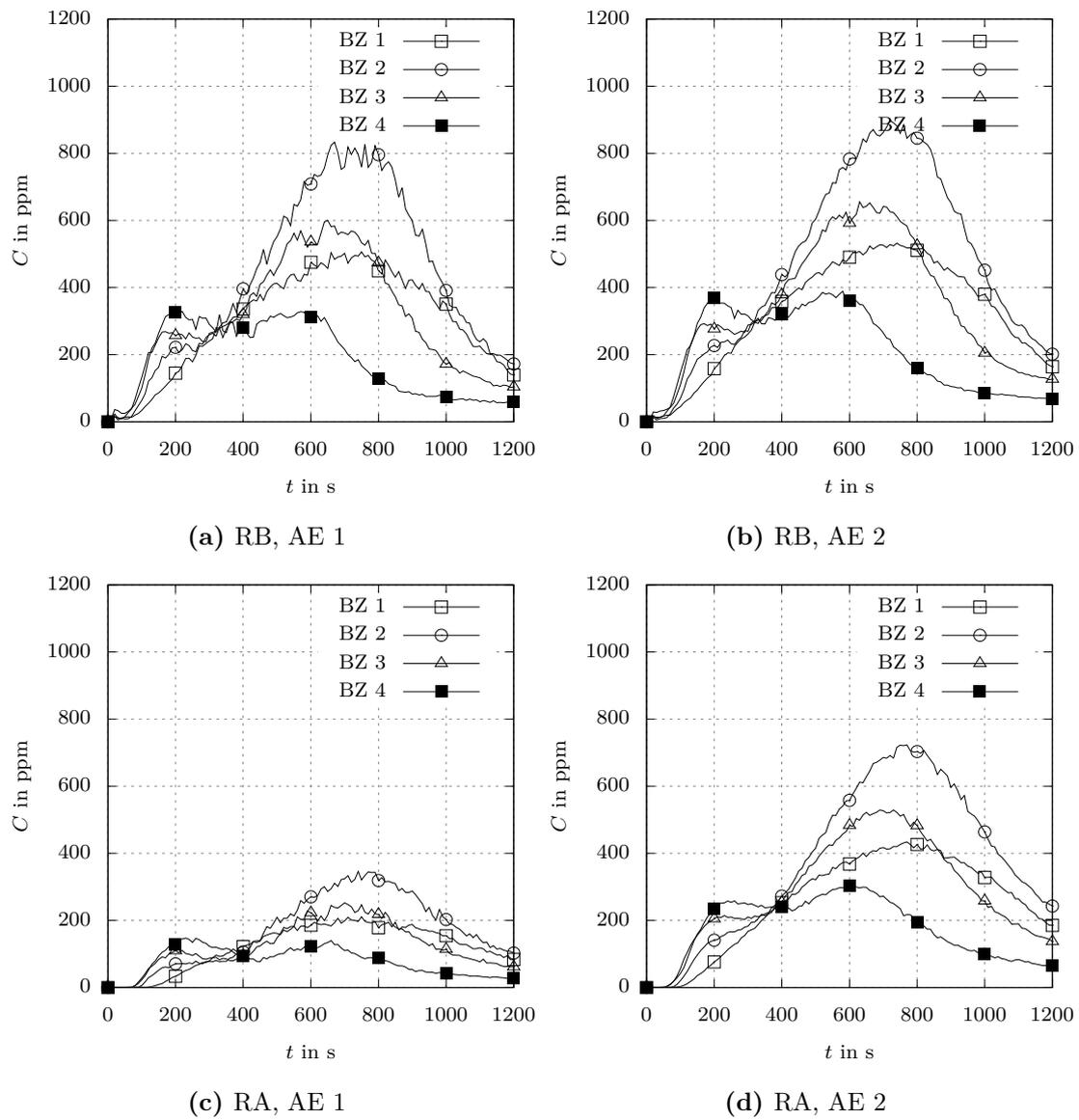
### 7.3.2 Rauchgaskonzentrationen

Die höchsten CO-Konzentrationen treten im Raum der Brandentstehung in der AE 2 für das jeweilige Brandszenario auf (Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10). Die niedrigsten CO-Konzentration treten für das jeweilige Brandszenario im angrenzenden Raum in der AE 1 auf.

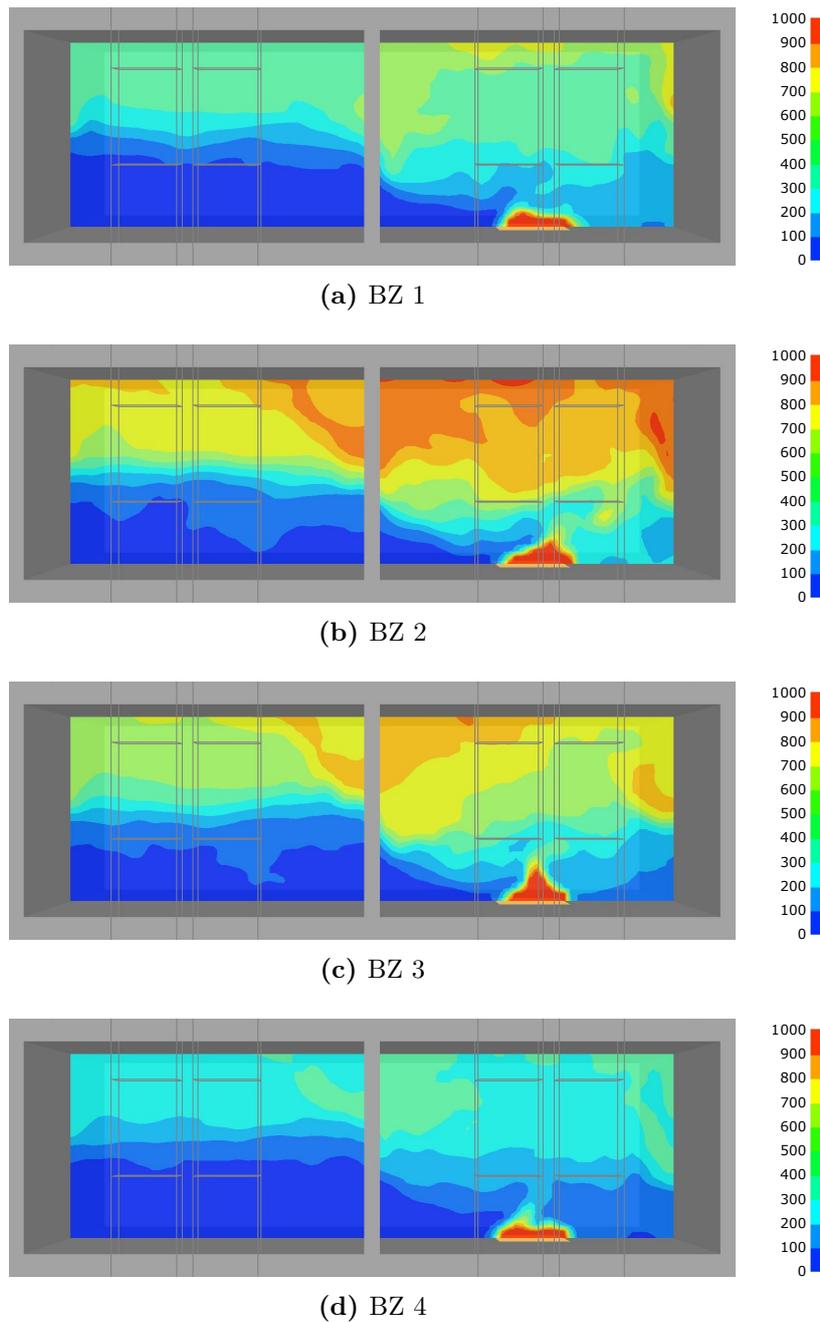
Der Vergleich der Brandszenarien 1 bis 4 zeigt, dass das Brandszenario BZ 1 zu niedrigeren CO-Konzentrationen führt als die Brandszenarien BZ 2 und BZ 3. Dies gilt sowohl für den Raum der Brandentstehung als auch für den angrenzenden Raum. Die im Brandszenario BZ 4 berechnete CO-Konzentration ist geringer als die der Brandszenarien BZ 1 bis BZ 3. Der Vergleich der Brandszenarien BZ 2 bis BZ 4 zeigt weiterhin, dass sich die zugrunde gelegte Materialzusammensetzung deutlich auf die berechneten CO-Konzentrationen auswirkt. So sinkt mit zunehmendem Anteil des Polyurethanes auch die sich einstellende CO-Konzentrationen. Grund hierfür ist die niedrigere CO-Ausbeute gegenüber Span. Jedoch treten die maximalen CO-Konzentrationen in den Brandszenarien BZ 2 bis BZ 4 früher ein als im Brandszenario BZ 1. Dieses zeitliche Verhalten beruht auf den zugrunde gelegten zeitabhängigen MLR (vgl. Kapitel 4.3.2).

## 7.4 Schlussfolgerungen

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen auf die Brandentstehungsphase in Wohnungen wurden vergleichende numerische Untersuchungen in einer Wohnungsgeometrie durchgeführt. Es wurden sowohl die sich im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum einstellenden Rauchgastemperaturen als auch CO-Konzentrationen berechnet. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass gegenwärtige Materialzusammensetzungen sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einem angrenzenden Raum mit zunehmendem Anteil polymerer Werkstoffe zu höheren Rauchgastemperaturen führen (vgl. Kapitel 6). Es wurde ebenfalls bestätigt, dass gegenwärtige Materialzusammensetzungen sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einem angrenzenden Raum überwiegend zu höheren CO-Konzentrationen führen.



**Abbildung 7.9:** Mit *FDS* berechnete und arithmetisch gemittelte CO-Konzentrationen im Raum der Brandentstehung (RB) sowie im angrenzenden Raum (RA) in den Auswertungsebenen (AE) 1 und 2 in Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Brandszenarien (BZ 1: ältere Materialzusammensetzung, BZ 2 bis BZ 4: gegenwärtige Materialzusammensetzungen) und der Zeit.



**Abbildung 7.10:** Mit *SMV* visualisierte CO-Konzentrationen in ppm (Schnitt durch die Raummitten) im Raum der Brandentstehung (rechts) sowie im angrenzenden Raum (links) in Abhängigkeit von den zugrunde gelegten Brandszenarien (BZ 1: ältere Materialzusammensetzung, BZ 2 bis BZ 4: gegenwärtige Materialzusammensetzungen) nach 600 s.



# KAPITEL 8

---

## Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Untersuchung war die Beschreibung des Einflusses einer veränderten stofflichen Zusammensetzung von Einrichtungsgegenständen durch zunehmende Verwendung von Werkstoffen auf der Basis von Holz und Polymeren auf den Verlauf von Raumbränden während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase in Wohnungen.

Zur experimentellen und numerischen Untersuchung der Brandentstehung und Brandausbreitung wurde zunächst ein repräsentatives Brandszenario auf der Grundlage amtlicher Statistiken, erhobener Daten von Feuerwehren sowie versicherungsrelevanter Daten zu Brandschäden ermittelt (Kapitel 3). Die Untersuchung zeigt, dass in den Jahren 2007 bis 2014 77 % der Brände mit Todesfolge auf den Wohnbereich entfallen. Vom Wohnbereich ausgehend führt die Brandentstehung im Wohnzimmer zu den häufigsten Todesopfern, gefolgt von der Brandentstehung im Schlafzimmer. Als häufigste Brandursache bei Bränden mit Todesfolge wurden Rauch- und Tabakwaren sowie Kerzen identifiziert.

Darauf aufbauend wurde der Einfluss unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzungen von Einrichtungsgegenständen in Wohnzimmern auf die Stoff- und Energiefreisetzung untersucht (Kapitel 4). Es wurden neben MLR und HRR auch effektive Verbrennungswärmen und Stoffausbeuten einzelner Materialien und Materialzusammensetzungen experimentell bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten gegenwärtigen Materialzusammensetzungen neben einer höheren maximalen HRR auch eine um 26 % bis 66 % höhere effektive Verbrennungswärme aufweisen als die untersuchte ältere Materialzusammensetzung (15 853 kJ/kg). Darüber hinaus führen sie zu teilweise höheren Stoffausbeuten in Bezug auf CO<sub>2</sub>, CO und Ruß.

Zur Untersuchung der Brandentstehung wurde ein Sessel mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung als erster brennender Einrichtungsgegenstand verwendet (Kapitel 5). In Abhängigkeit von unterschiedlichen Ventilationsbedingungen wurden neben MLR und HRR auch Rauchgastemperaturen experimentell bestimmt. Bei einer effektiven Verbrennungswärme von 20 619 kJ/kg betrug die maximale HRR nach 530 s 2,12 MW (Wandöffnung) bzw. nach 480 s 2,6 MW (Türöffnung). Neben der um 22 % höheren HRR führte die Türöffnung auch zu 32 % höheren maximalen Rauchgastemperaturen von 921 °C im deckennahen Bereich.

Aufbauend auf diesen Untersuchungsergebnissen zur Brandentstehung wurde die Brandausbreitungsphase in einem Wohnzimmer untersucht (Kapitel 6). In Abhängigkeit von einer veränderten stofflichen Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände sowie unterschiedlicher Ventilationsbedingungen wurden neben der Höhe der raucharmen Schicht und dem Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern auch Rauchgastemperaturen und Rauchgaskonzentrationen erfasst und ausgewertet. Die Untersuchungen bezogen sich neben dem Raum der Brandentstehung auch auf einen angrenzenden Raum.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei geschlossenen Fenstern gegenwärtige Einrichtungsgegenstände 300 s nach Zündbeginn zu einem schnelleren Absinken der raucharmen Schicht führen als ältere Einrichtungsgegenstände. Das betrifft sowohl den Raum der Brandentstehung (Höhe der raucharmen Schicht: 1,0 m) als auch den angrenzenden Raum (Höhe der raucharmen Schicht: 2,5 m). Gleichzeitig führten gegenwärtige Einrichtungsgegenstände im Vergleich zu älteren Einrichtungsgegenständen sowohl zu höheren maximalen Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung und im angrenzenden Raum als auch zu höheren maximalen Rauchgaskonzentrationen im angrenzenden Raum (CO<sub>2</sub>: Erwachsene +154 % bzw. Kinder +9 %, CO: Erwachsene +194 % bzw. Kinder +20 %, HCN: Erwachsene +107 % bzw. Kinder +6 %). Die Untersuchung der Ventilationsbedingungen bei gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen ergab, dass geöffnete Fenster gegenüber geschlossenen Fenstern 300 s nach Zündbeginn zu einem langsameren Absinken der raucharmen Schicht im Raum der Brandentstehung führen (Höhe der raucharmen Schicht: 1,5 m). Im angrenzenden Raum sank die raucharme Schicht hingegen schneller ab (Höhe der raucharmen Schicht: 2,0 m). Darüber hinaus führten die geöffneten Fenster zu einer weiteren Erhöhung der maximalen Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung und im angrenzenden Raum sowie zu einer weiteren Erhöhung der maximalen Rauchgaskonzentrationen im angrenzenden Raum (CO<sub>2</sub>: Erwachsene +185 % bzw. Kinder +112 %, CO: Erwachsene +1254 % bzw. Kinder +1098 %, HCN: Erwachsene +4161 % bzw. Kinder +2586 %).

Die Untersuchung der Ansprechzeiten von Rauchwarnmeldern sowohl im Raum der Brandentstehung als auch im angrenzenden Raum zeigt, dass diese geringer als die Zeit ist, bei der sich lebensbedrohliche Umgebungsbedingungen (Rauchgastemperatur und Rauchgaskonzentration) eingestellt hatten. Demzufolge können Rauchwarnmelder zu einer erfolgreichen Selbstrettung beitragen und dadurch die Anzahl der Todesopfer in Folge von Wohnungsbränden senken. Die Untersuchung hat ebenfalls gezeigt, dass sich gegenüber der O.R.B.I.T.-Studie sowohl höhere Rauchgastemperaturen als auch höhere CO-Konzentrationen durch eine veränderte stoffliche Zusammensetzung der Einrichtungsgegenstände eingestellt haben.

Ergänzend wurden numerische Untersuchungen zur Stoff- und Energiefreisetzung in Wohnungen während der Brandentstehungsphase (erster brennender Einrichtungsgegenstand) durchgeführt (Kapitel 7). Dazu wurden die in Kapitel 4 untersuchten Materialzusammensetzungen von älteren und gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen herangezogen. Es wurden sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einem angrenzenden Raum Rauchgastemperaturen und Rauchgaskonzentrationen berechnet und ausgewertet. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen, dass gegenwärtige Materialzusammensetzungen

---

im Vergleich zu älteren Materialzusammensetzungen sowohl im Raum der Brandentstehung als auch in einem angrenzenden Raum zu höheren Rauchgastemperaturen und überwiegend zu höheren CO-Konzentrationen führen.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass sich die auf Basis der O.R.B.I.T.-Studie [2, 3] definierten Standards nicht mehr als Grundlage zur Bedarfsplanung von Feuerwehren eignen. Weder der auf Brandversuchen von 1939 basierende Rauchgastemperaturverlauf noch der CO-Konzentrationsverlauf sind aufgrund der veränderten stofflichen Zusammensetzung in gegenwärtigen Einrichtungsgegenständen heute noch anwendbar. Die vorliegenden Ergebnisse zur Brandentstehung und Brandausbreitung in Wohnungen können im Rahmen einer zukünftigen Bedarfsplanung von Feuerwehren genutzt werden, um die Standards einer Prüfung zu unterziehen. So können die veränderten Rauchgastemperatur- und Rauchgaskonzentrationsverläufe berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zu den untersuchten Ansprechzeiten von Rauchwarnmeldern zeigen, dass die verpflichtende Einführung in Wohnungen sinnvoll ist.

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, ist der zeitliche Verlauf eines Raumbrandes in Wohnungen neben den im Brandraum vorhandenen Materialien in Form von Einrichtungsgegenständen und den sich während des Brandes einstellenden Ventilationsbedingungen auch von gebäude- und raumspezifischen Randbedingungen wie z. B. Außenwandbekleidungen mit Wärmedämmfunktion oder Innenraumdämmungen abhängig. Aus diesem Grund besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Untersuchung des Einflusses dieser gebäude- und raumspezifischen Randbedingungen auf die Stoff- und Energiefreisetzung bei Bränden in Wohnungen.



## Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland. *Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren für Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten*. Hrsg. von Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland. 1998.
- [2] Gert Beyerle u. a. *Feuerwehrsysteem - O.R.B.I.T.: Entwicklung eines Systems zur Optimierten Rettung Brandbekämpfung mit Integrierter Technischer Hilfeleistung: Grundlagenuntersuchung für die Entwicklung verbesserter Feuerwehrfahrzeuge zur Optimierung der Leistungsfähigkeit bei der Brandbekämpfung und anderen Einsätzen: Teil 1: Übersicht und Zusammenfassung*. Hrsg. von Bundesminister für Forschung und Technologie. 1978.
- [3] Gert Beyerle u. a. *Feuerwehrsysteem - O.R.B.I.T.: Entwicklung eines Systems zur Optimierten Rettung Brandbekämpfung mit Integrierter Technischer Hilfeleistung: Grundlagenuntersuchung für die Entwicklung verbesserter Feuerwehrfahrzeuge zur Optimierung der Leistungsfähigkeit bei der Brandbekämpfung und anderen Einsätzen: Teil 2: Ausführliche Darstellung der Probleme und ihrer Lösungen*. Hrsg. von Bundesminister für Forschung und Technologie. 1978.
- [4] George H. Tryon, Hrsg. *Fire Protection Handbook: Thirteenth Edition*. 13. Auflage. Boston: National Fire Protection Association, 1969.
- [5] S. Rodak und S. H. Ingberg. *Full-Scale Residential Occupancy Fire Tests of 1939*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 1967.
- [6] Richard W. Bukowski u. a. *Performance of Home Smoke Alarms: Analysis of the Response of Several Available Technologies in Residential Fire Settings*. 2008.
- [7] C. Abecassis-Empis u. a. „Characterisation of Dalmarnock fire Test One“. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008), S. 1334–1343.
- [8] Christian Knaust und Anja Hofmann. „Full Scale Investigations of Fast Spreading Room Fires“. In: *Materials Testing* 56.1 (2014), S. 7–15.
- [9] Jan H. Deubel u. a. *Forschungsbericht Raumbrände: Teil 1: Versuchsaufbau und brandtechnologische Untersuchungen*. Hrsg. von BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. 2013.
- [10] T. Beji u. a. „RABOT2012 – Presentation of the Multi-Compartment Full-Scale ('Rabot') Fire Tests“. In: *Fire and Explosion Hazards*. Hrsg. von Derek Bradley u. a. Providence: Research Publishing, 2013, S. 67–76.

- [11] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg. *Innovative Sicherheitsarchitektur der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr: Taktisch-Strategisch Innovativer Brandschutz auf Grundlage Risikobasierter Optimierung (T.I.B.R.O.): Verbundvorhaben: Förderkennzeichen 13N12174 bis 13N12177*. Berlin, 2015.
- [12] Dougal Drysdale. *An Introduction to Fire Dynamics*. Second Edition. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [13] Björn Karlsson und James G. Quintiere. *Enclosure Fire Dynamics*. 1. Auflage. Boca Raton: CRC Press, 2000.
- [14] Charles A. Harper, Hrsg. *Handbook of Building Materials for Fire Protection*. The McGraw-Hill Companies, Inc., 2004.
- [15] James G. Quintiere. *Fundamentals of Fire Phenomena*. 1. Auflage. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2006.
- [16] John A. Purkiss. *Fire Safety Engineering: Design of Structures*. 2. Auflage. Oxford: Elsevier, 2007.
- [17] Arthur E. Cote, Hrsg. *Fire Protection Handbook: Twentieth Edition*. 20. Auflage. Quincy (MA): National Fire Protection Association, 2008.
- [18] Ulrich Schneider. *Ingenieurmethoden im Brandschutz*. 2. Auflage. Köln: Werner Verlag, 2009.
- [19] Morgan J. Hurley, Hrsg. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5. Auflage. New York: Springer-Verlag, 2016.
- [20] Artur Witkowski, Anna A. Stec und Richard Hull. „Thermal Decomposition of Polymeric Materials“. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hrsg. von Morgan J. Hurley. New York: Springer-Verlag, 2016, S. 167–254.
- [21] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 13823:2015-02 Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen*. Berlin, 2015.
- [22] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *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*. Berlin, 2010.
- [23] Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen, Hrsg. *Single Burning Item-Versuchsapparatur*. 2015.
- [24] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. *Single Burning Item-Versuchsapparatur*.
- [25] Marc Janssens und William Parker. „Oxygen Consumption Calometry“. In: *Heat Release in Fires*. Hrsg. von Vytenis Babrauskas und Stephen Grayson. Interscience Communications Ltd, 2009, S. 31–59.

- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 13238:2010-06 Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Konditionierungsverfahren und allgemeine Regeln für die Auswahl von Trägerplatten*. Berlin, 2010.
- [27] Marc Janssens. „Calorimetry“. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hrsg. von Morgan J. Hurley. New York: Springer-Verlag, 2016, S. 905–951.
- [28] Anja Hofmann. „Modellierung eines Entstehungsbrandes und die Anwendung auf den Single Burning Item Test“. Dissertation. Berlin: Technischen Universität Berlin, 2003.
- [29] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 1716:2010-11 Prüfungen zum Brandverhalten von Produkten – Bestimmung der Verbrennungswärme (des Brennwertes)*. Berlin, 2010.
- [30] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 437:2009-09 Prüfgase – Prüfdrücke – Gerätekategorien*. Berlin, 2009.
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 51900-1:2000-04 Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes. Teil 1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren*. Berlin, 2000.
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 5499:1972-01 Brennwert und Heizwert - Begriffe*. Berlin, 1972.
- [33] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN ISO 13943:2011-02 Brandschutz – Vokabular*. Berlin, 2011.
- [34] Vytenis Babrauskas. „Gas Species Measurement“. In: *Heat Release in Fires*. Hrsg. von Vytenis Babrauskas und Stephen Grayson. Interscience Communications Ltd, 2009, S. 251–255.
- [35] Mohammed M. Khan, Archibald Tewarson und Marcos Chaos. „Combustion Characteristics of Materials and Generation of Fire Products“. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hrsg. von Morgan J. Hurley. New York: Springer-Verlag, 2016, S. 1143–1232.
- [36] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 1021-2:2006 Möbel - Bewertung der Entzündbarkeit von Polstermöbeln - Teil 2: Eine einem Streichholz vergleichbare Gasflamme als Zündquelle*. Berlin, 2006.
- [37] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 54341:1988-01 Prüfung von Sitzen für Schienenfahrzeuge des öffentlichen Personenverkehrs - Bestimmung des Brennverhaltens mit einem Papierkissen*. Berlin, 1988.
- [38] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *E DIN 5510-2:2007-10 Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen - Teil 2: Brennverhalten und Brandnebenscheinungen von Werkstoffen und Bauteilen - Klassifizierung, Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin, 2007.
- [39] Anja R. Paschedag. *CFD in der Verfahrenstechnik: Allgemeine Grundlagen und mehrphasige Anwendungen*. 1. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2004.

- [40] Stefan Lecheler. *Numerische Strömungsberechnung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [41] Heinz Herwig. *Strömungsmechanik A-Z: Eine systematische Einordnung von Begriffen und Konzepten der Strömungsmechanik*. 1. Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2004.
- [42] Joel H. Ferziger und Milovan Perić. *Numerische Strömungsmechanik*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [43] Kevin McGrattan u. a. *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide - Volume 1: Mathematical Model: NIST Special Publication 1018-1: Sixth Edition*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 2017.
- [44] Kevin McGrattan u. a. *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide - Volume 2: Verification: NIST Special Publication 1018-2: Sixth Edition*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 2017.
- [45] Kevin McGrattan u. a. *Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide - Volume 3: Validation: NIST Special Publication 1018-3: Sixth Edition*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 2017.
- [46] Kevin McGrattan u. a. *Fire Dynamics Simulator - User's Guide: NIST Special Publication 1019: Sixth Edition*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 2017.
- [47] Peter Gerlinger. *Numerische Verbrennungssimulation: Effiziente numerische Simulation turbulenter Verbrennung*. 1. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [48] Rüdiger Schwarze. *CFD Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [49] James W. Deardorff. „Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 18.4 (1980), S. 495–527.
- [50] Stephen B. Pope. *Turbulent Flows*. 1. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [51] J. Warnatz, U. Maas und R. W. Dibble. *Combustion*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [52] Forman A. Williams. *Combustion Theory: The Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems*. 2. Auflage. Menlo Park: The Benjamin/Cummings Publish Company, 1985.
- [53] B. F. Magnussen und B. H. Hjertager. „On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion“. In: *Proceedings of the Sixteenth Symposium (International) on Combustion* 16.1 (1977), S. 719–729.
- [54] Heinz Herwig und Andreas Moschallski. *Wärmeübertragung*. 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

- 
- [55] Matthias Münch, Hendrik Belaschk und Rupert Klein. „Grundlagen der Brandsimulation: Einführung in die übergeordneten Zusammenhänge“. In: *Bauphysik Kalender*. Hrsg. von Nabil A. Fouad. Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. 227–249.
- [56] Guan Heng Yeoh und Kwok Kit Yuen. *Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering*. 1. Auflage. Oxford: Elsevier, 2009.
- [57] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2007)*. Wiesbaden, 2008.
- [58] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2008)*. Wiesbaden, 2010.
- [59] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2009)*. Wiesbaden, 2010.
- [60] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2010)*. Wiesbaden, 2011.
- [61] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2011)*. Wiesbaden, 2012.
- [62] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2012)*. Wiesbaden, 2013.
- [63] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2013)*. Wiesbaden, 2014.
- [64] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Gesundheit: Todesursachen in Deutschland (2014)*. Wiesbaden, 2015.
- [65] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2007): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2008.
- [66] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2008): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2010.
- [67] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2009): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2010.
- [68] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2010): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2011.
- [69] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2011): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2012.
- [70] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2012): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2013.
- [71] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2013): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2014.
- [72] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland (2014): Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation*. Wiesbaden, 2015.

- [73] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg. *Laufende Stadtbeobachtung - Raumabgrenzungen: Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland*. 2013.
- [74] Berliner Feuerwehr, Hrsg. *Einsatzstatistik der Berliner Feuerwehr: Ausgewählte Einsätze zwischen dem 1.1.2005 und dem 30.06.2005 (unveröffentlicht)*. Berlin, 2005.
- [75] Interkantonaler Rückversicherungsverband IRV, Hrsg. *Brandfälle mit Todesopfer in der Schweiz von 2000 bis 2012 (unveröffentlicht)*. Bern, 2014.
- [76] Interkantonaler Rückversicherungsverband IRV, Hrsg. *Statistische Analyse: Analyse langfristiger Gebäudeschadendaten: Auswertung des Datenbestandes der Schadenstatistik VKF*. Bern, 2012.
- [77] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 312:2003-11 Spanplatten - Anforderungen*. Berlin, 2003.
- [78] Rainer Marutzky und Harald Schwab. *Span- und Faserplatten, OSB: Spezial*. Hrsg. von Informationsdienst Holz. 2009.
- [79] Anja Hofmann-Böllinghaus und Sven Kaudelka. *Abschlusskolloquium des Verbundvorhabens Innovative Sicherheitsarchitektur der nichtpolizeilichen Gefahrenabwehr. Taktisch-Strategisch Innovativer Brandschutz auf Grundlage Risikobasierter Optimierung (T.I.B.R.O.): Brandszenarien in Wohnungen - Experimente und numerische Untersuchungen (Vortrag): Förderkennzeichen 13N12174 bis 13N12177*. Hannover, 2015.
- [80] Anja Hofmann-Böllinghaus u. a. „Einfluss moderner Materialien auf die Rauchentwicklung bei Wohnungsbränden“. In: *63. Jahresfachtagung*. Hrsg. von Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. Stuttgart, 2016.
- [81] Anja Hofmann u. a. „Influence of Modern Furniture on the Fire Development in Fires in Homes: Large Scale Fire Tests in Living Rooms“. In: *Fire and Materials 2017. 15th International Conference*. Hrsg. von Interscience Communications. San Francisco: Interscience Communications Ltd, 2017.
- [82] Anja Hofmann. „Room fires - Changes in room fires and impact on safety of buildings and inhabitants“. In: *5. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag*. Hrsg. von Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Magdeburg, 2017.
- [83] Anja Hofmann u. a. „Influence of Modern Furniture on the Fire Development in Fires in Homes: Large Scale Fire Tests in Living Rooms“. In: *Fire and Materials* (eingereicht).
- [84] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 18101:2014-08 Türen - Türen für den Wohnungsbau - Türblattgrößen, Bandsitz und Schlosssitz - Gegenseitige Abhängigkeit der Maße*. Berlin, 2014.

- [85] Ernst Neufert und Johannes Kister. *Bauentwurfslehre: Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlage, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte mit dem Menschen als Maß und Ziel: Handbuch für den Baufachmann, Bauherrn, Lehrenden und Lernenden*. 40., überarb. und akt. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [86] Deutscher Wetterdienst.
- [87] Gunnar Heskestad. „Engineering Relations for Fire Plumes“. In: *Fire Safety Journal* 7.1 (1984), S. 25–32.
- [88] Ronald L. Alpert. „Ceiling Jet Flows“. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hrsg. von Morgan J. Hurley. New York: Springer-Verlag, 2016, S. 429–454.
- [89] British Standards Institution. *BS 7974:2001 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Code of practice*. London, 2001.
- [90] National Fire Protection Association. *NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems*. Quincy (MA), 2012.
- [91] International Organization for Standardization. *ISO/TS 16733:2006(E) Fire safety engineering - Selection of design fire scenarios and design fires*. Genf, 2006.
- [92] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12 Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Berlin, 2012.
- [93] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 60584-1:2014-07 Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584-1:2013)*. Berlin, 2014.
- [94] Karlheinz Wienand. „Thermoelemente“. In: *Temperaturmessung in der Technik*. Hrsg. von Wilfried J. Bartz. Kontakt und Studium. Ehningen bei Böblingen: expert verlag, 1992, S. 76–109.
- [95] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)*. 2007.
- [96] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 18050:1955-09 Fensteröffnungen für den Wohnungsbau*. Berlin, 1955.
- [97] Mario Fontana u. a. „Fire Load Density“. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hrsg. von Morgan J. Hurley. New York: Springer-Verlag, 2016, S. 1131–1142.
- [98] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 18230-1:1998-05 Baulicher Brandschutz im Industriebau. Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer*. Berlin, 1998.

- [99] Ulrich Schneider, Marita Kersken-Bradley und Hubert Kirchberger. „Brandschutz im Industriebau“. In: *Bauphysik Kalender*. Hrsg. von Nabil A. Fouad. Berlin: Ernst & Sohn, 2011, S. 213–270.
- [100] Vytenis Babrauskas. „Heat of Combustion and Potential Heat“. In: *Heat Release in Fires*. Hrsg. von Vytenis Babrauskas und Stephen Grayson. Interscience Communications Ltd, 2009, S. 207–231.
- [101] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. *Brandrisikobewertung: Berechnungsverfahren*. Hrsg. von Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1984.
- [102] Vytenis Babrauskas. „Effect of Environmental Variables“. In: *Heat Release in Fires*. Hrsg. von Vytenis Babrauskas und Stephen Grayson. Interscience Communications Ltd, 2009, S. 307–325.
- [103] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN EN 14604:2009-02 Rauchwarnmelder*. Berlin, 2009.
- [104] L. Reinken und G. van Oost. „Longitudinale Körperentwicklung gesunder Kinder von 0 bis 18 Jahren. Körperlänge/-höhe, Körpergewicht und Wachstumsgeschwindigkeit“. In: *Klinische Pädiatrie* 204 (1992), S. 129–133.
- [105] Statistisches Bundesamt, Hrsg. *Mikrozensus - Fragen zur Gesundheit: Körpermaße der Bevölkerung*. Wiesbaden, 2009.
- [106] David A. Purser und Jamie L. McAllister. „Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat“. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hrsg. von Morgan J. Hurley. New York: Springer-Verlag, 2016, S. 2308–2428.
- [107] Vytenis Babrauskas und Richard D. Peacock. „Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard“. In: *Fire Safety Journal* 18.3 (1992), S. 255–277.
- [108] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Hrsg. *Richtlinie zur Bewertung von Schadstoffkonzentrationen im ABC-Einsatz mit C-Gefahrstoffen (vfdB 10-01)*. Altenberge, 2016.
- [109] Klaus Buff und Helmut Greim. *Abschätzung der gesundheitlichen Folgen von Großbränden: Literaturstudie Teilbereich Toxikologie*. Hrsg. von Bundesamt für Zivilschutz. Bonn, 1997.
- [110] Andrea Löhnert. „Modellierung von Brandszenarien mit CFD unter Berücksichtigung des Einflusses der Brandrauchzusammensetzung auf die Toxizität und Sichtweiten“. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2015.
- [111] Glenn P. Forney. *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data - Volume 1: User's Guide: NIST Special Publication 1017-1: Sixth Edition*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 2017.

- 
- [112] Glenn P. Forney. *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data - Volume 2: Technical Reference Guide: NIST Special Publication 1017-2: Sixth Edition*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 2017.
- [113] Glenn P. Forney. *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data - Volume 3: Verification Guide: NIST Special Publication 1017-3: Sixth Edition*. Hrsg. von U.S. Department of Commerce. 2017.
- [114] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Hrsg. *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications: Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS): NUREG-1824*. 2007.
- [115] Hans Dieter Baehr und Karl Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [116] Fritz Schuster. *Handbuch der Brenngase und ihrer Eigenschaften*. 1. Aufl. Springer Fachmedien Wiesbaden, 1978.
- [117] Dougal Drysdale. „Thermochemistry“. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Hrsg. von Morgan J. Hurley. New York: Springer-Verlag, 2016, S. 138–150.
- [118] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 51850:1980-04 Brennwerte und Heizwerte gasförmiger Brennstoffe*. Berlin, 1980.



# Verzeichnis der Anhänge

<b>A Grundlagen</b>	<b>145</b>
A.1 HRR der Gasflamme . . . . .	145
<b>B Ermittlung eines repräsentativen Brandszenarios</b>	<b>147</b>
B.1 Verteilung der untersuchten Brände mit Todesfolge . . . . .	147
<b>C Experimentelle Untersuchung von Materialzusammensetzungen</b>	<b>149</b>
C.1 Experimentelles Design . . . . .	149
C.2 Brandentwicklung . . . . .	150
C.2.1 Zündquelle . . . . .	150
C.2.2 Holz (1 kg) . . . . .	151
C.2.3 Holz (20 kg) . . . . .	152
C.2.4 Span (1 kg) . . . . .	153
C.2.5 Span (5 kg) . . . . .	154
C.2.6 Span (10 kg) . . . . .	155
C.2.7 Span (15 kg) . . . . .	156
C.2.8 PUR (1 kg) . . . . .	157
C.2.9 PUR (5 kg) . . . . .	158
C.2.10 PUR (10 kg) . . . . .	159
C.2.11 PUR (15 kg) . . . . .	160
C.3 MLR . . . . .	161
C.3.1 Zündquelle . . . . .	161
C.3.2 Holz (1 kg) . . . . .	161
C.3.3 Holz (20 kg) . . . . .	162
C.3.4 Span (1 kg) . . . . .	162
C.3.5 Span (5 kg) . . . . .	163
C.3.6 Span (10 kg) . . . . .	163
C.3.7 Span (15 kg) . . . . .	164
C.3.8 PUR (1 kg) . . . . .	164
C.3.9 PUR (5 kg) . . . . .	165
C.3.10 PUR (10 kg) . . . . .	165
C.3.11 PUR (15 kg) . . . . .	166
C.4 HRR . . . . .	167
C.4.1 Zündquelle . . . . .	167
C.4.2 Holz (1 kg) . . . . .	167
C.4.3 Span (1 kg) . . . . .	168
C.4.4 PUR (1 kg) . . . . .	168

C.5	Effektive Verbrennungswärme . . . . .	169
C.5.1	Zündquelle . . . . .	169
C.5.2	Holz (1 kg) . . . . .	169
C.5.3	Span (1 kg) . . . . .	170
C.5.4	PUR (1 kg) . . . . .	170
C.6	Stofffreisetzung . . . . .	171
C.6.1	Zündquelle . . . . .	171
C.6.2	Holz (1 kg) . . . . .	174
C.6.3	Span (1 kg) . . . . .	177
C.6.4	PUR (1 kg) . . . . .	180
C.7	Stoffausbeute . . . . .	183
C.7.1	Zündquelle . . . . .	183
C.7.2	Holz (1 kg) . . . . .	183
C.7.3	Span (1 kg) . . . . .	184
C.7.4	PUR (1 kg) . . . . .	184
<b>D</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der Brandentstehung</b>	<b>185</b>
D.1	Experimentelles Design . . . . .	185
D.2	Bauphysikalische Eigenschaften der Gipskartonplatten . . . . .	185
D.3	Experimentelle Erprobung der Zündbedingungen . . . . .	186
D.4	Flammen- und Rauchgasausbreitung . . . . .	188
D.4.1	Versuch 1 . . . . .	188
D.4.2	Versuch 2 . . . . .	189
D.5	Rauchgastemperaturen . . . . .	190
<b>E</b>	<b>Experimentelle Untersuchung der Brandausbreitung</b>	<b>191</b>
E.1	Experimentelles Design . . . . .	191
E.2	Bauphysikalische Eigenschaften der Einbaufenster . . . . .	192
E.3	Höhe der Messebene 1 . . . . .	192
E.4	Obere Messbereichsgrenzen (FTIR-Spektrometer) . . . . .	193
E.5	Rauchgasausbreitung . . . . .	194
E.5.1	Versuch 1.1 . . . . .	194
E.5.2	Versuch 2.1 . . . . .	195
E.5.3	Versuch 2.2 . . . . .	196
E.6	Rauchgastemperaturen . . . . .	197
E.6.1	Versuch 1.1: Raum der Brandentstehung . . . . .	197
E.6.2	Versuch 1.1: angrenzender Raum . . . . .	198
E.6.3	Versuch 2.1: Raum der Brandentstehung . . . . .	199
E.6.4	Versuch 2.1: angrenzender Raum . . . . .	200
E.6.5	Versuch 2.2: Raum der Brandentstehung . . . . .	201
E.6.6	Versuch 2.2: angrenzender Raum . . . . .	202
<b>F</b>	<b>Numerische Untersuchung von Brandszenarien</b>	<b>203</b>
F.1	Thermophysikalische Stoffeigenschaften des Betons . . . . .	203

# ANHANG A

---

## Grundlagen

### A.1 HRR der Gasflamme

Die Berechnung der HRR der Gasflamme (*n*-Butans) erfolgt durch Gleichung A.1.

$$\dot{Q}(t) = \dot{m}_f(t) \cdot \Delta H_{c,eff} \quad (\text{A.1})$$

$\dot{m}_f(t)$  ist der Massenstrom des *n*-Butans in kg/s.  $\Delta H_{c,eff}$  ist die effektive Verbrennungswärme des Gases in MJ/kg.

Die Berechnung des Massenstroms des *n*-Butans erfolgt durch Gleichung A.2.

$$\dot{m}_f(t) = \rho_f \cdot \dot{V}_f(t) \quad (\text{A.2})$$

$\rho_f$  ist die Dichte des *n*-Butans in kg/m<sup>3</sup> und  $\dot{V}_f(t)$  der Volumenstrom des *n*-Butans in m<sup>3</sup>/s.

Die Berechnung der effektiven Verbrennungswärme erfolgt durch Gleichung A.3.

$$\Delta H_{c,eff} = \Delta H_{c,net} \cdot \chi \quad (\text{A.3})$$

$\Delta H_{c,net}$  ist der Heizwert des *n*-Butans in MJ/kg.  $\chi$  ist die Verbrennungseffizienz.

Gemäß [36] beträgt der Volumenstrom zur Erzeugung einer Gasflamme (*n*-Butan) mit einer Flammenlänge von 0,035 m ca. 0,000 751/s. Die Dichte von *n*-Butan beträgt nach [116] 2,703 kg/m<sup>3</sup>. Gemäß [100, 117, 118] kann für den Heizwert  $\Delta H_{c,net}$  des *n*-Butan ein Wert von 45,69 MJ/kg bis 45,72 MJ/kg angenommen werden. Der herangezogene arithmetische Mittelwert beträgt 45,71 MJ/kg. Die Verbrennungseffizienz entspricht nach [27] für gasförmige Brennstoffe wie Butan, die eine vergleichsweise geringe Rußfreisetzungsrate aufweisen, näherungsweise einem Wert von 1,0. Daraus ergibt sich eine konstante HRR von 0,093 kW. Die THR beträgt nach einer Brenndauer von 300 s insgesamt 0,028 MJ.



# ANHANG B

---

## Ermittlung eines repräsentativen Brandszenarios

### B.1 Verteilung der untersuchten Brände mit Todesfolge

**Tabelle B.1:** Aus den Datensätzen 1 und 2 selektierte Anzahl von Bränden in mehrgeschossigen Wohngebäuden mit Todesfolge zwischen den Jahren 1999 und 2012 in der BRD.

Jahr	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Summe
1999	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
2000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2001	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	2
2002	1	-	1	1	-	-	-	-	-	1	4
2003	1	-	-	-	-	-	-	-	7	15	23
2004	-	-	-	3	1	3	-	-	3	2	12
2005	6	-	1	3	4	-	-	1	4	3	22
2006	-	-	1	2	3	2	-	-	5	5	18
2007	-	-	1	1	1	-	1	-	4	2	10
2008	-	-	2	1	1	-	-	1	5	1	11
2009	-	1	-	1	2	-	-	-	3	3	10
2010	-	1	2	-	-	-	-	-	2	2	7
2011	-	1	-	-	5	-	-	-	-	4	10
2012	-	-	-	-	4	-	-	-	-	1	5
Summe	10	3	10	12	21	5	1	2	33	39	136

A: Berlin, B: Dortmund, C: Dresden, D: Düsseldorf, E: Essen, F: Frankfurt am Main, G: Hamburg, H: Hannover, I: Köln, J: München



# ANHANG C

---

## Experimentelle Untersuchung von Materialzusammensetzungen

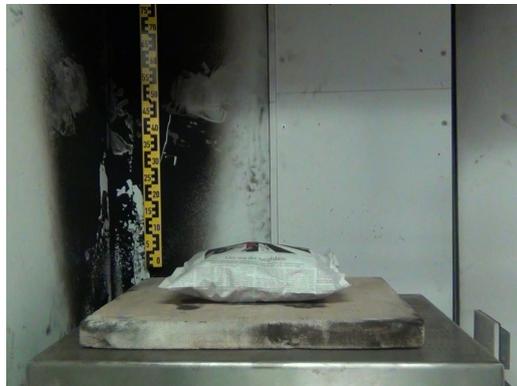
### C.1 Experimentelles Design

Tabelle C.1: Zusammenfassung des experimentellen Designs.

Versuchsapparatur	Gegenstand der Untersuchung	Versuchskörpermasse
-	-	<i>m</i> in kg
SBI	MLR, HRR, Rauchgaskonzentrationen	1
WAP/TTS	MLR	5, 10, 15, 20

## C.2 Brandentwicklung

### C.2.1 Zündquelle



(a) 0 s



(b) 30 s



(c) 60 s



(d) 90 s



(e) 120 s



(f) 150 s

**Abbildung C.1:** Brandentwicklung einer Zündquelle in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.2 Holz (1 kg)



(a) 0 s



(b) 240 s



(c) 480 s



(d) 720 s



(e) 960 s



(f) 1200 s

**Abbildung C.2:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Holz (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.3 Holz (20 kg)



(a) 0 s



(b) 360 s



(c) 720 s



(d) 1080 s



(e) 1440 s



(f) 1800 s

**Abbildung C.3:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Holz (Versuchskörpermasse: 20 kg) im WAP in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.4 Span (1 kg)



(a) 0s



(b) 240s



(c) 480s



(d) 720s



(e) 960s



(f) 1200s

Abbildung C.4: Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.5 Span (5 kg)



(a) 0 s



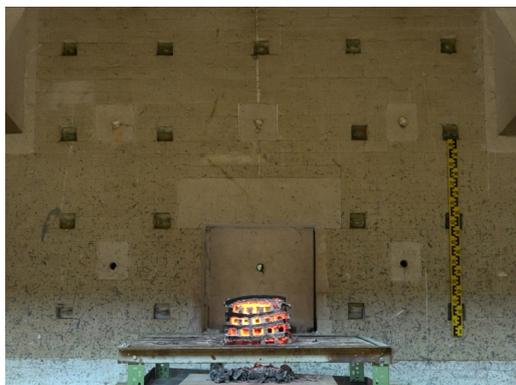
(b) 360 s



(c) 720 s



(d) 1080 s



(e) 1440 s



(f) 1800 s

**Abbildung C.5:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (Versuchskörpermasse: 5 kg) im WAP in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.6 Span (10 kg)



(a) 0 s



(b) 360 s



(c) 720 s



(d) 1080 s



(e) 1440 s



(f) 1800 s

**Abbildung C.6:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (Versuchskörpermasse: 10 kg) im WAP in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.7 Span (15 kg)



(a) 0 s



(b) 360 s



(c) 720 s



(d) 1080 s



(e) 1440 s



(f) 1800 s

**Abbildung C.7:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus Span (Versuchskörpermasse: 15 kg) im WAP in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.8 PUR (1 kg)



(a) 0s



(b) 120s



(c) 240s



(d) 360s



(e) 480s



(f) 600s

**Abbildung C.8:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.9 PUR (5 kg)



(a) 0s



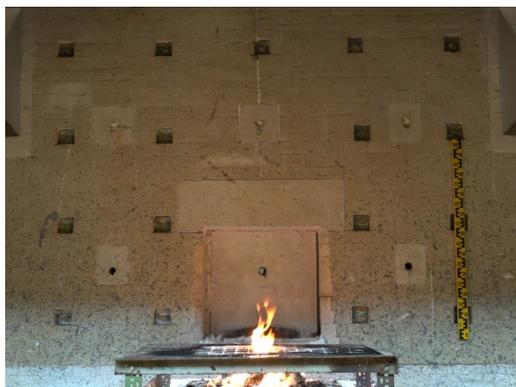
(b) 120s



(c) 240s



(d) 360s



(e) 480s



(f) 600s

**Abbildung C.9:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (Versuchskörpermasse: 5 kg) im WAP in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.10 PUR (10 kg)



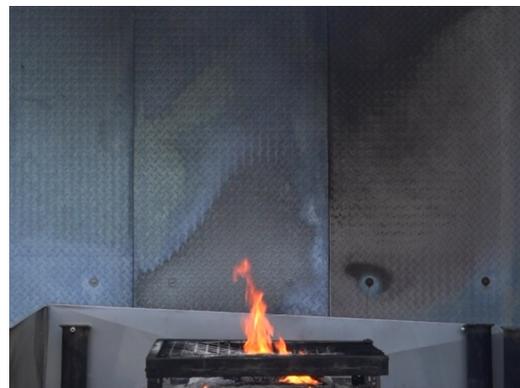
(a) 0s



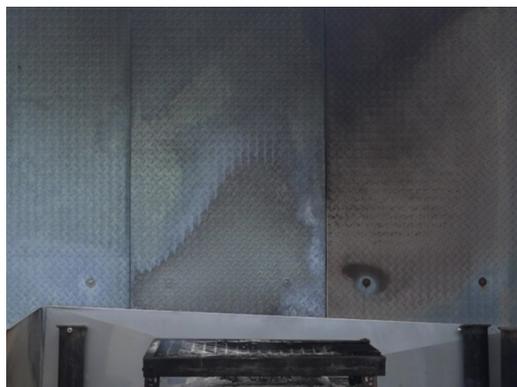
(b) 120s



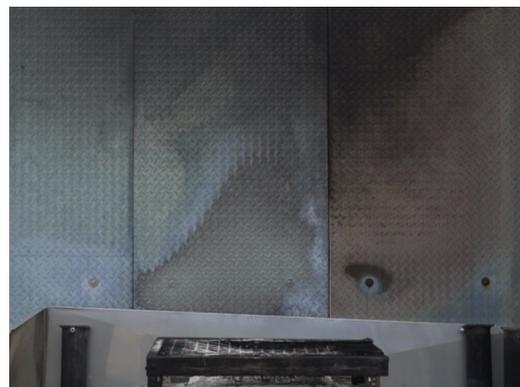
(c) 240s



(d) 360s



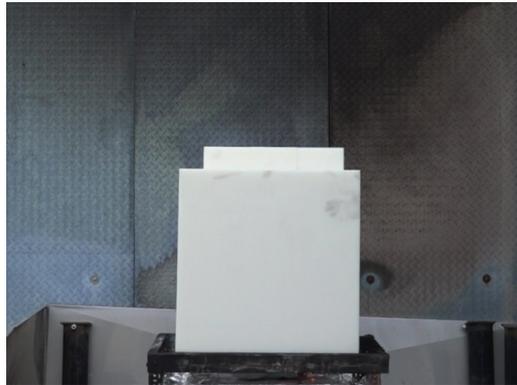
(e) 480s



(f) 600s

**Abbildung C.10:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (Versuchskörpermasse: 10 kg) auf dem TTS in Abhängigkeit von der Zeit.

C.2.11 PUR (15 kg)



(a) 0 s



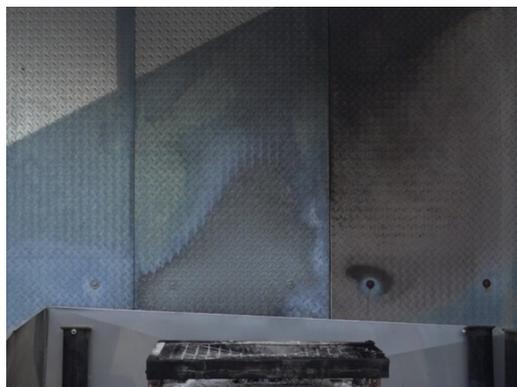
(b) 120 s



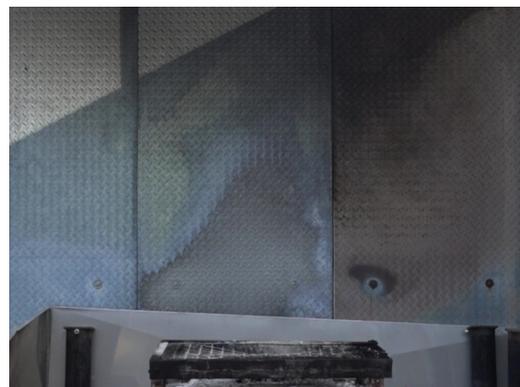
(c) 240 s



(d) 360 s



(e) 480 s

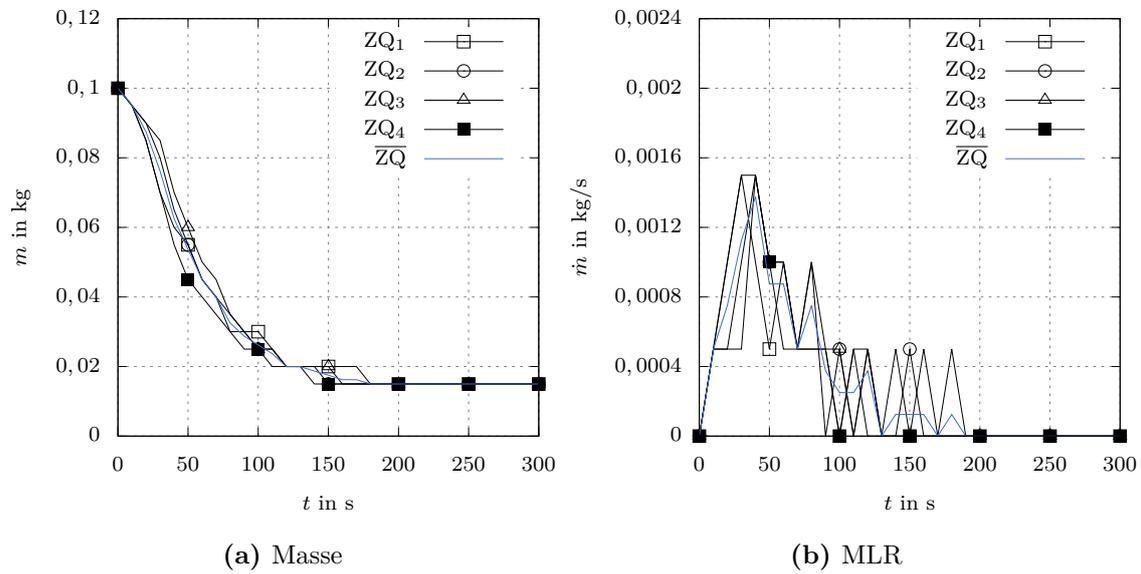


(f) 600 s

**Abbildung C.11:** Brandentwicklung eines Versuchskörpers aus PUR (Versuchskörpermasse: 15 kg) auf dem TTS in Abhängigkeit von der Zeit.

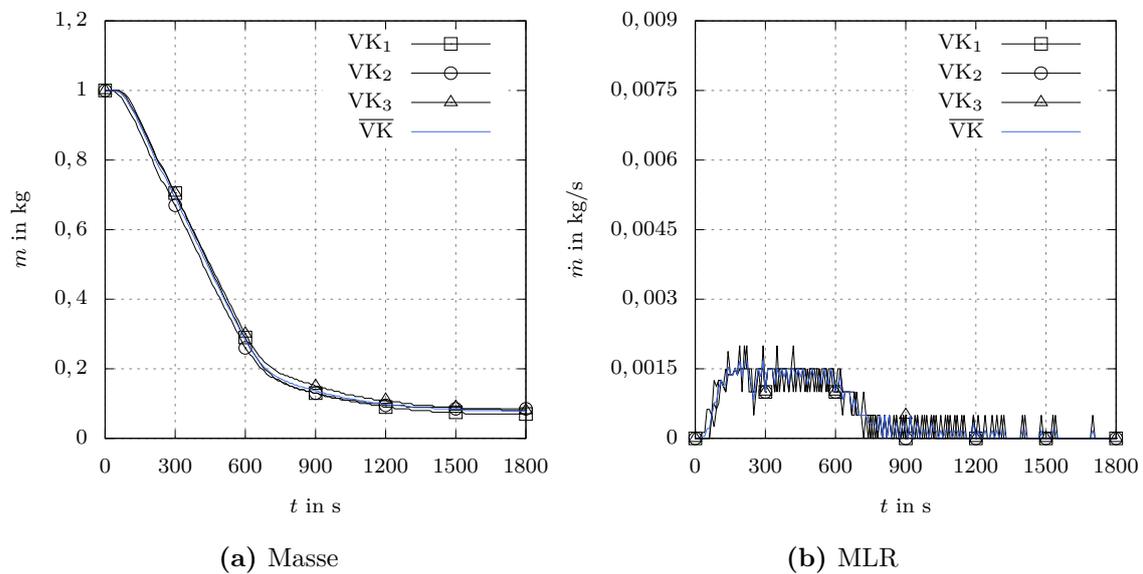
## C.3 MLR

### C.3.1 Zündquelle



**Abbildung C.12:** (a) Massen und (b) MLR der Zündquellen 1 bis 4 ( $ZQ_{1-4}$ ) in der SBI-Versuchsapparatur sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{ZQ}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.3.2 Holz (1 kg)



**Abbildung C.13:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ ) aus Holz (Versuchskörpermasse: 1 kg) im WAP sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.3.3 Holz (20 kg)

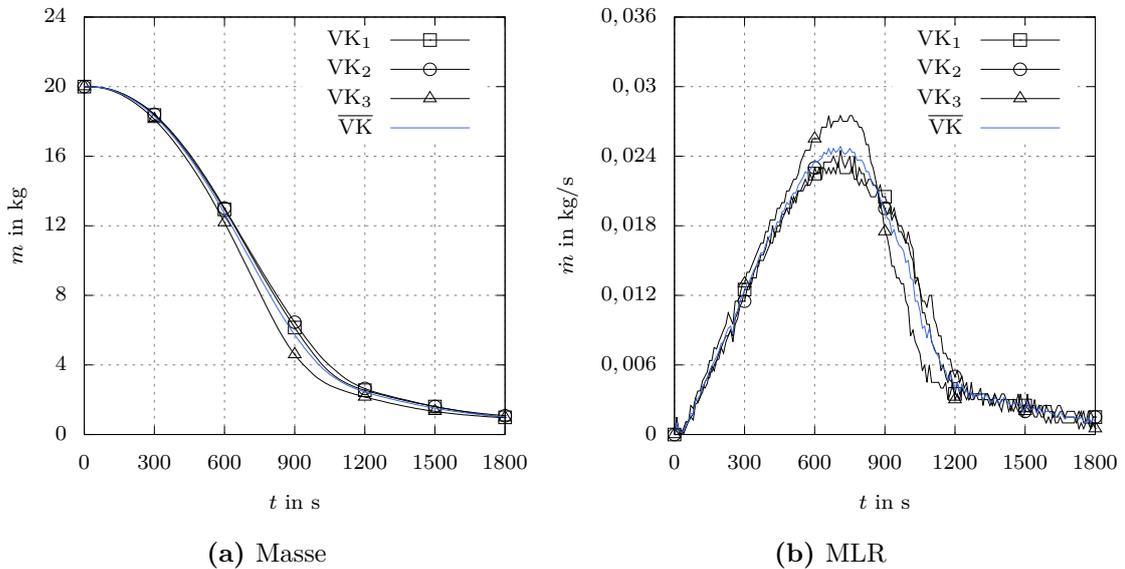


Abbildung C.14: (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus Holz (Versuchskörpermasse: 20 kg) im WAP sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert (VK) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.3.4 Span (1 kg)

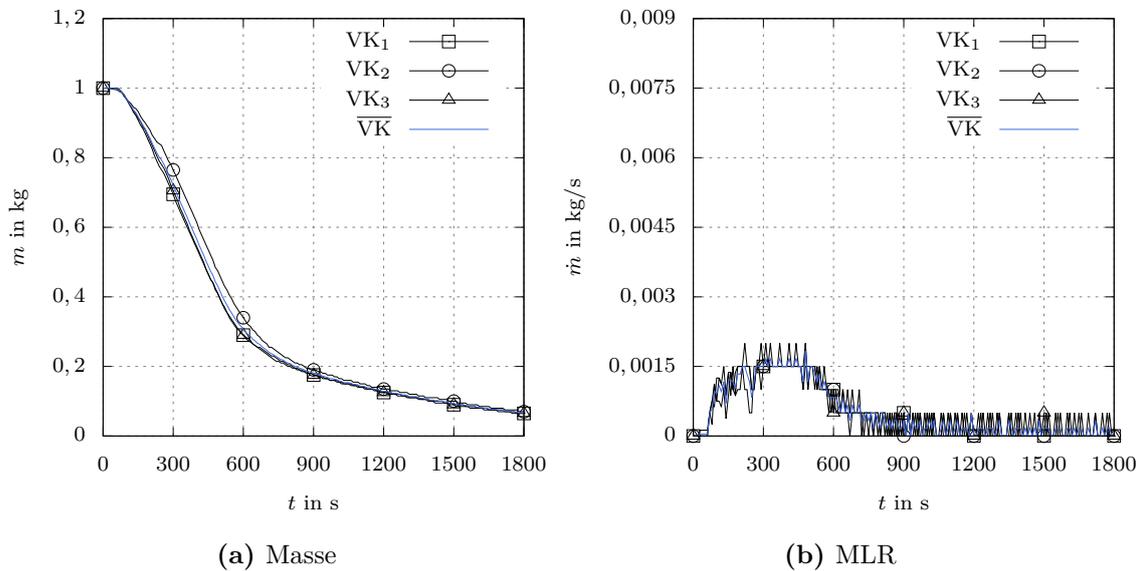
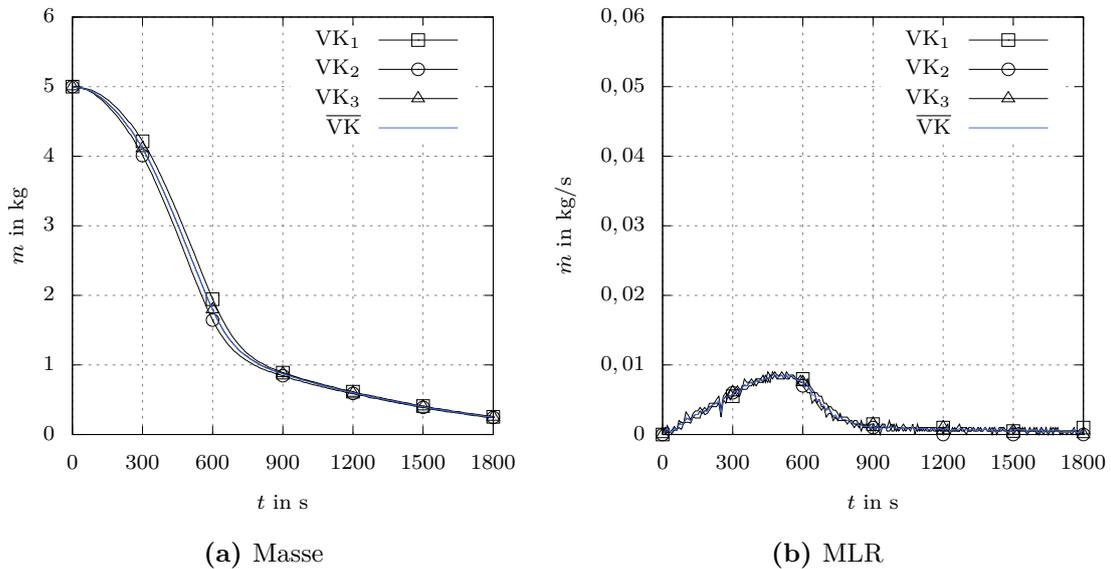


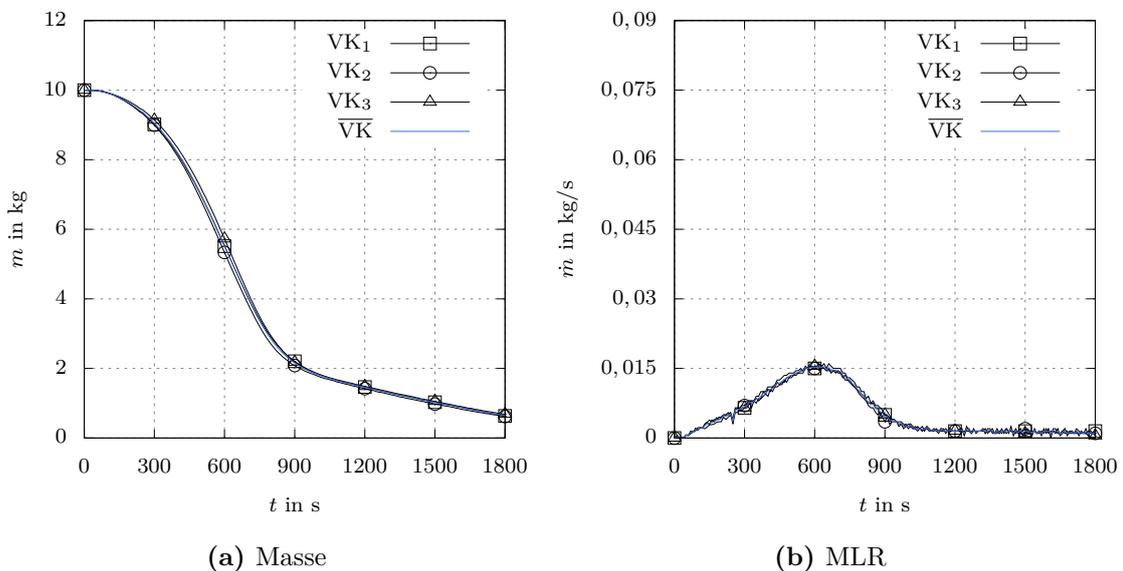
Abbildung C.15: (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus Span (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert (VK) in Abhängigkeit von der Zeit.

## C.3.5 Span (5 kg)



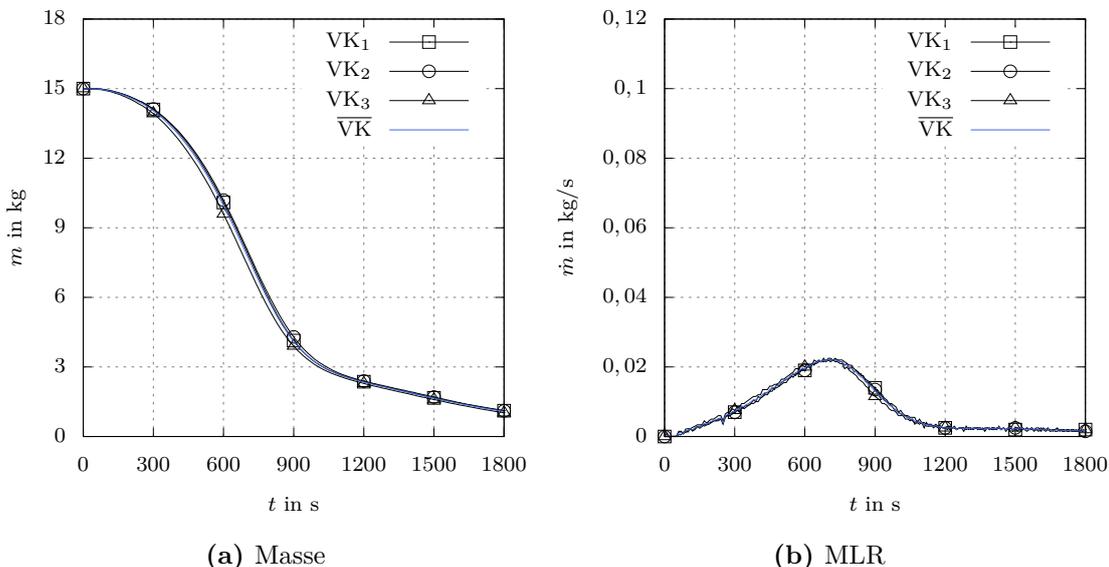
**Abbildung C.16:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ ) aus Span (Versuchskörpermasse: 5 kg) im WAP sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

## C.3.6 Span (10 kg)



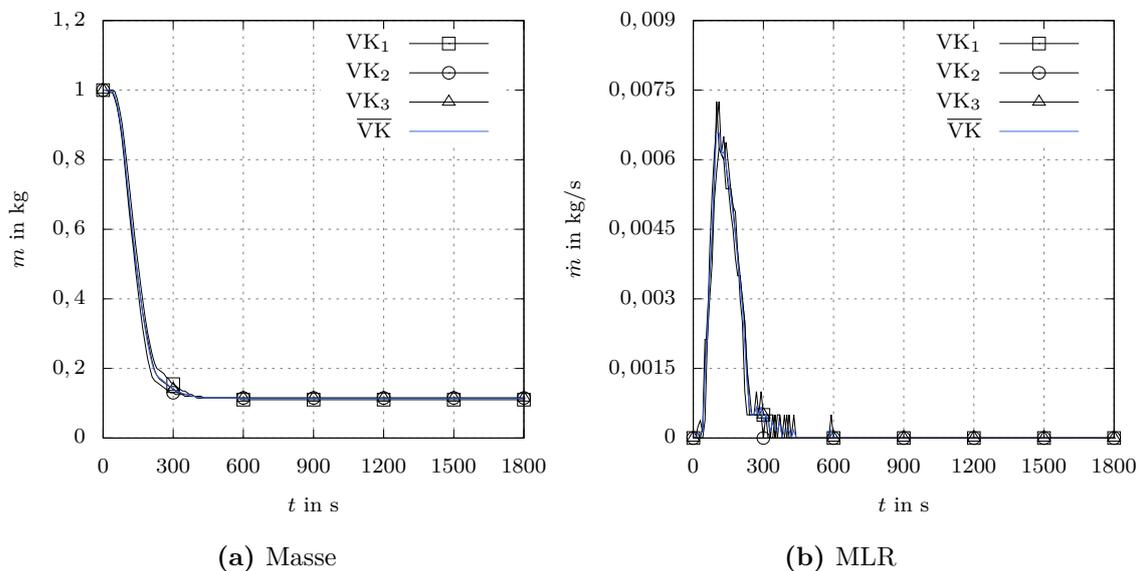
**Abbildung C.17:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ ) aus Span (Versuchskörpermasse: 10 kg) im WAP sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.3.7 Span (15 kg)



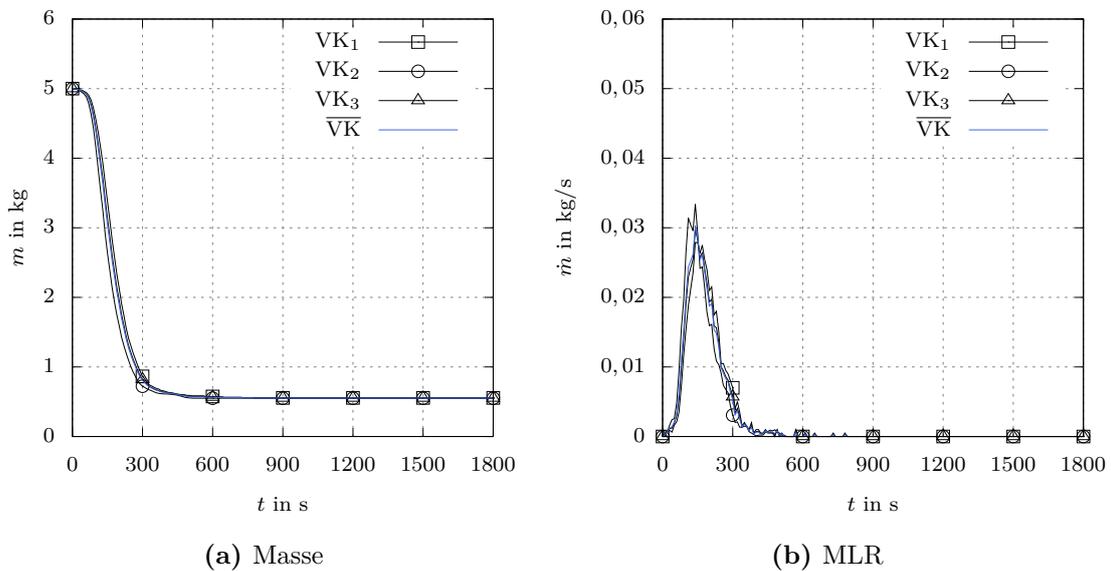
**Abbildung C.18:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus Span (Versuchskörpermasse: 15 kg) im WAP sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert (VK̄) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.3.8 PUR (1 kg)



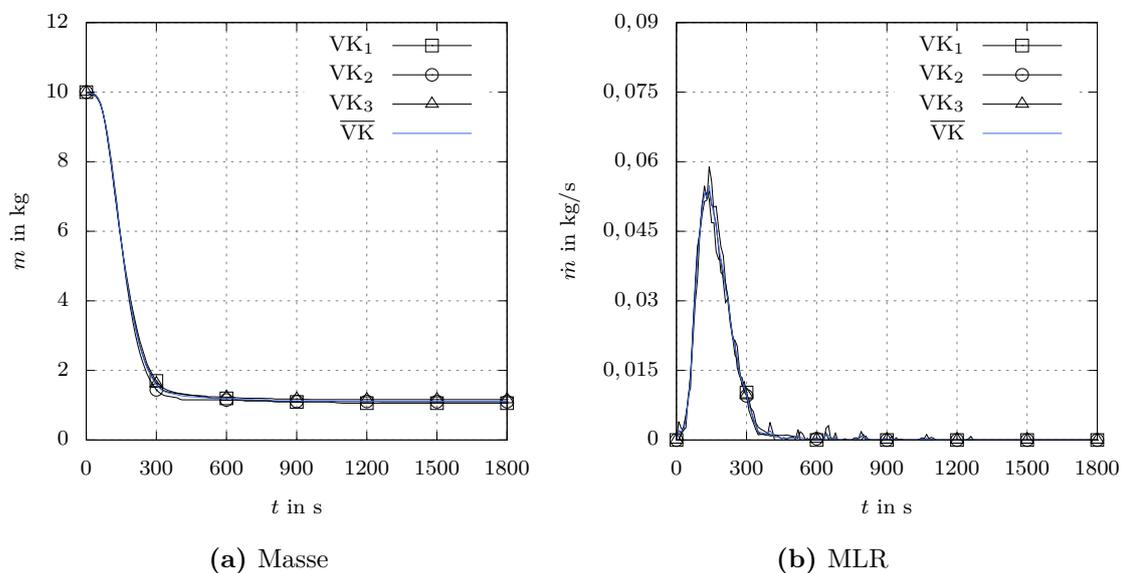
**Abbildung C.19:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert (VK̄) in Abhängigkeit von der Zeit.

## C.3.9 PUR (5 kg)



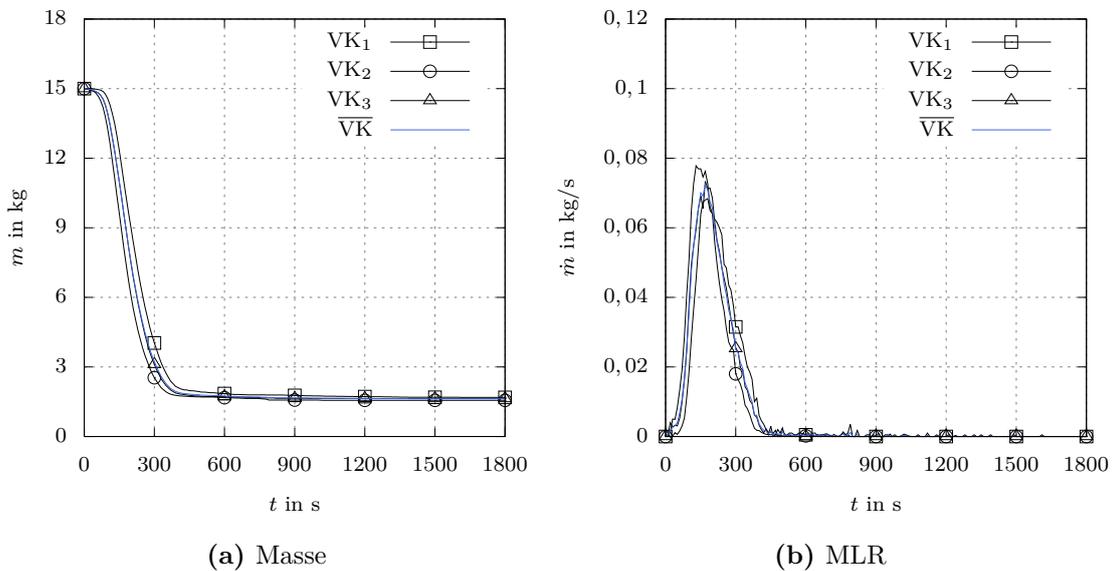
**Abbildung C.20:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus PUR (Versuchskörpermasse: 5 kg) im WAP sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

## C.3.10 PUR (10 kg)



**Abbildung C.21:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus PUR (Versuchskörpermasse: 10 kg) auf dem TTS sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

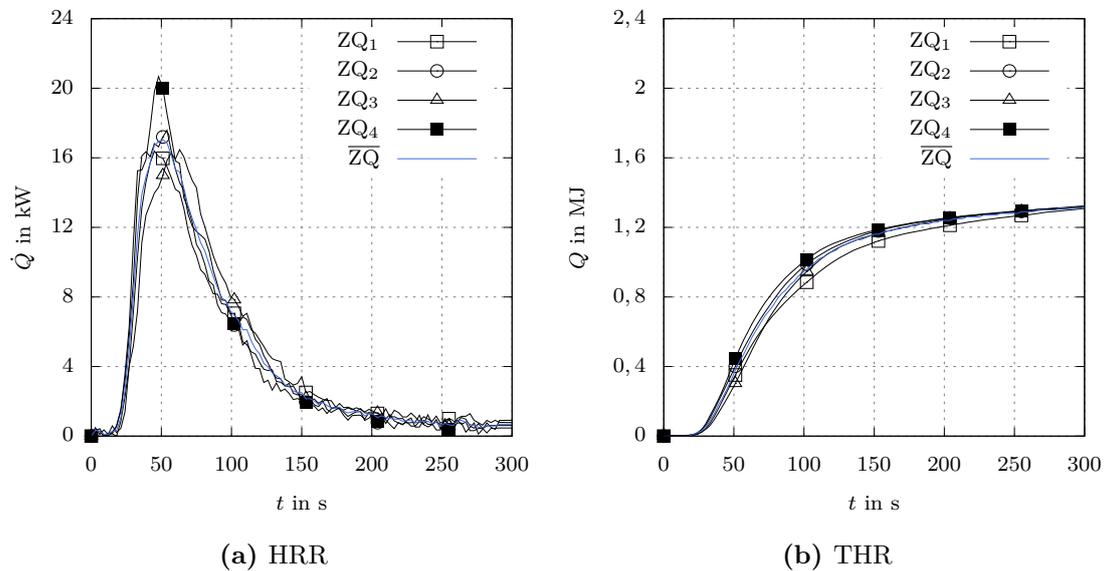
C.3.11 PUR (15 kg)



**Abbildung C.22:** (a) Massen und (b) MLR der Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ ) aus PUR (Versuchskörpermasse: 15 kg) auf dem TTS sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

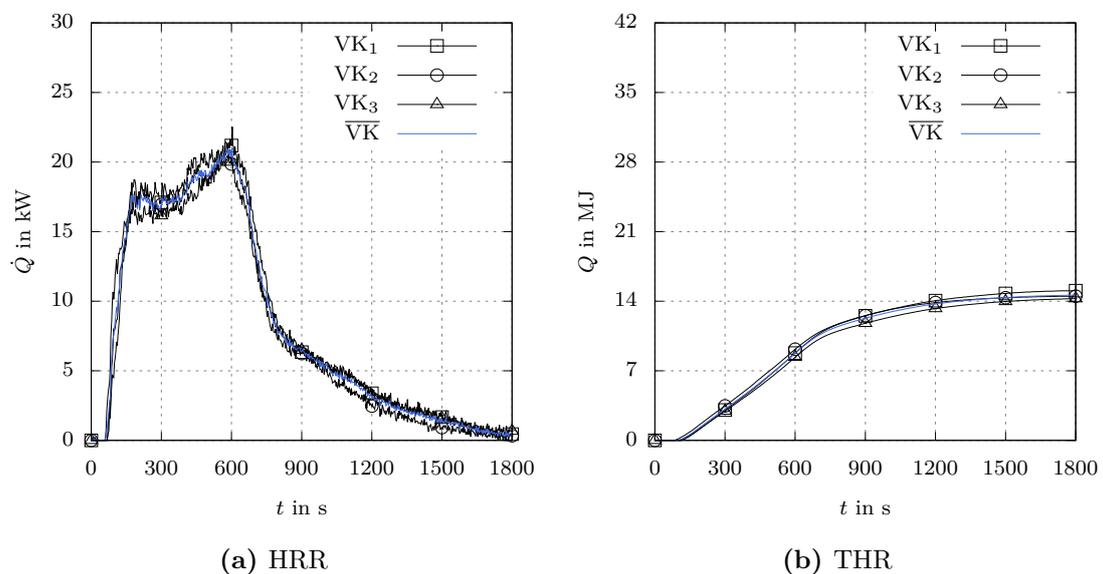
## C.4 HRR

### C.4.1 Zündquelle



**Abbildung C.23:** (a) HRR und (b) THR der Zündquellen 1 bis 4 ( $ZQ_{1-4}$ ) in der SBI-Versuchsapparatur sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{ZQ}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.4.2 Holz (1 kg)



**Abbildung C.24:** (a) HRR und (b) THR der Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ ) aus Holz (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.4.3 Span (1 kg)

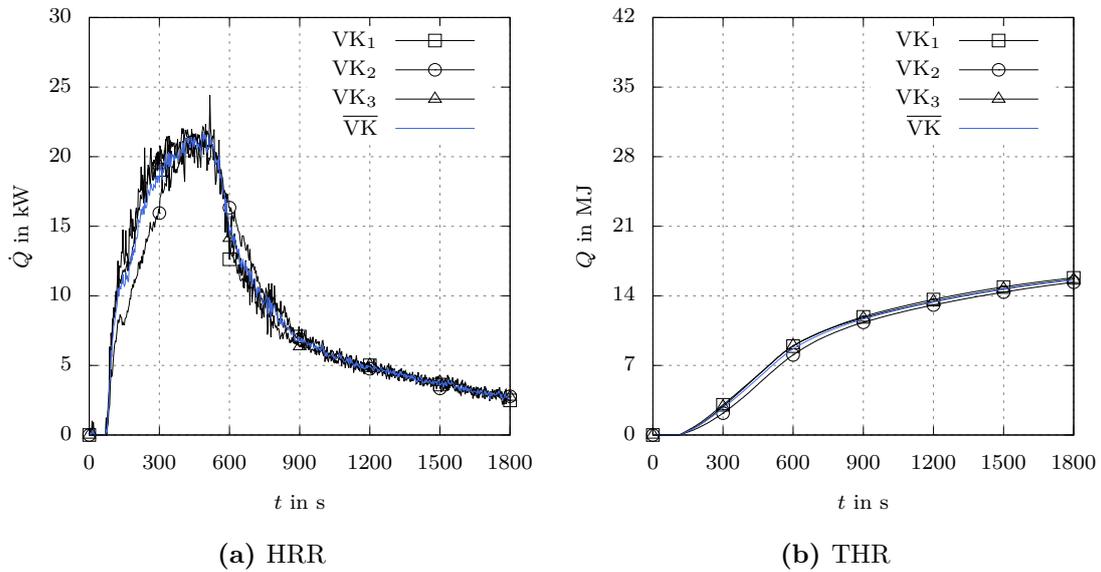


Abbildung C.25: (a) HRR und (b) THR der Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ ) aus Span (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

### C.4.4 PUR (1 kg)

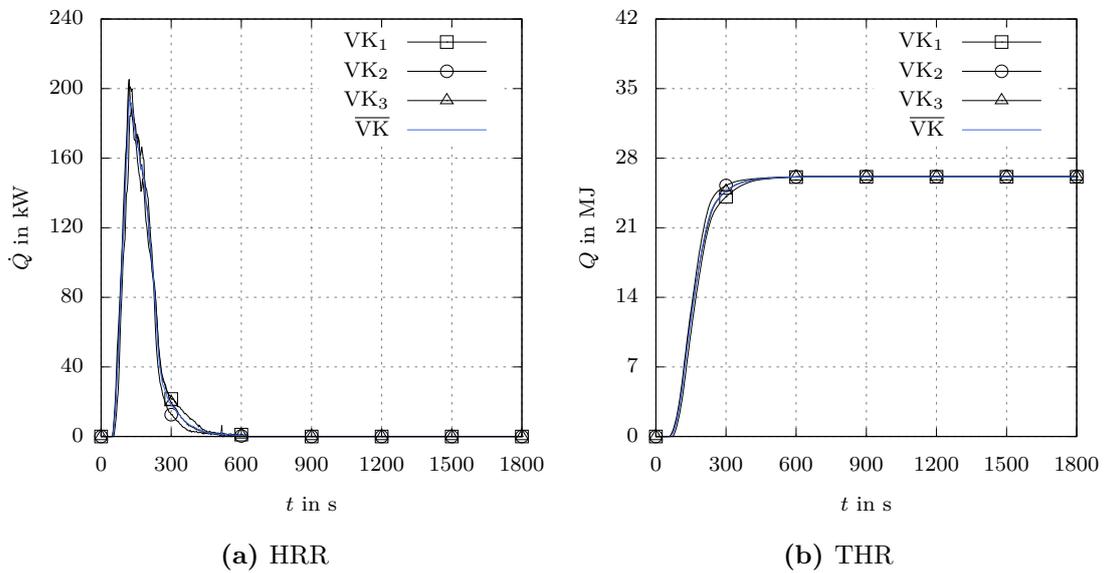


Abbildung C.26: (a) HRR und (b) THR der Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ ) aus PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) in der SBI-Versuchsapparatur sowie der jeweilige arithmetische Mittelwert ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

## C.5 Effektive Verbrennungswärme

### C.5.1 Zündquelle

**Tabelle C.2:** Berechnung der effektiven Verbrennungswärmen der Zündquellen 1 bis 4 (ZQ<sub>1-4</sub>) sowie Berechnung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

Zünd- quelle	Massen- abbrand	THR	effektive Verbrennungswärme
-	$\Delta m$ in kg	$Q$ in kJ	$\Delta H_{c,eff}$ in kJ/kg
1	0,085	1308,30	15 391,76
2	0,085	1319,10	15 518,82
3	0,085	1323,40	15 569,41
4	0,085	1316,60	15 489,41
arithmetischer Mittelwert	0,085	1316,85	15 492,35

### C.5.2 Holz (1 kg)

**Tabelle C.3:** Berechnung der effektiven Verbrennungswärmen der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus Holz (Versuchskörpermasse: 1 kg) sowie Berechnung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

Versuchs- körper	Massen- abbrand	THR	effektive Verbrennungswärme
-	$\Delta m$ in kg	$Q$ in kJ	$\Delta H_{c,eff}$ in kJ/kg
1	0,930	15 057,75	16 191,13
2	0,915	14 512,75	15 860,93
3	0,920	14 263,05	15 503,32
arithmetischer Mittelwert	0,922	14 611,18	15 853,00

### C.5.3 Span (1 kg)

**Tabelle C.4:** Berechnung der effektiven Verbrennungswärmen der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus Span (Versuchskörpermasse: 1 kg) sowie Berechnung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

Versuchs- körper	Massen- abbrand	THR	effektive Verbrennungswärme
-	$\Delta m$ in kg	$Q$ in kJ	$\Delta H_{c,eff}$ in kJ/kg
1	0,935	15 813,45	16 912,78
2	0,930	15 371,15	16 528,12
3	0,935	15 653,95	16 742,19
arithmetischer Mittelwert	0,933	15 612,85	16 728,05

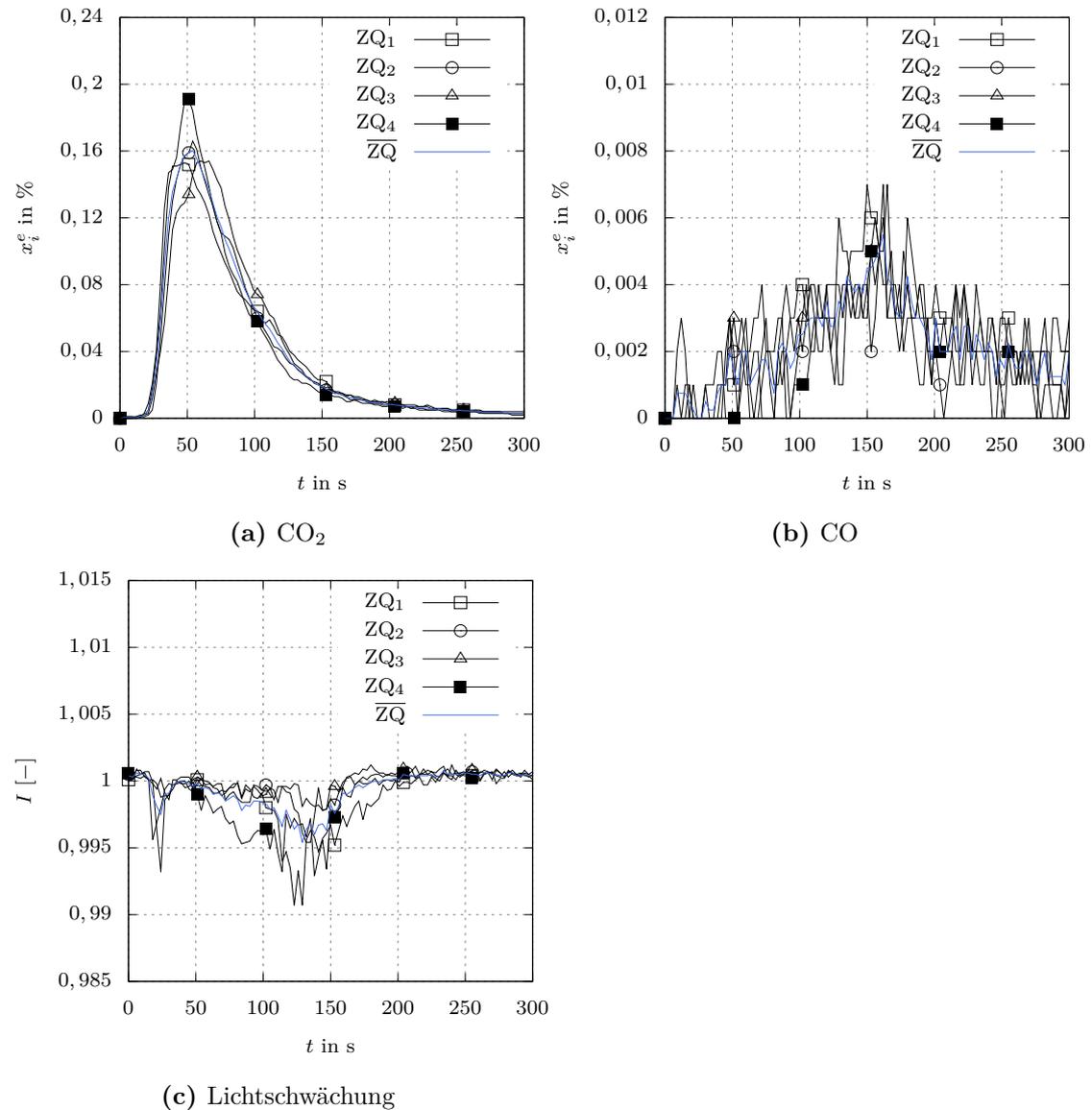
### C.5.4 PUR (1 kg)

**Tabelle C.5:** Berechnung der effektiven Verbrennungswärmen der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) sowie Berechnung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

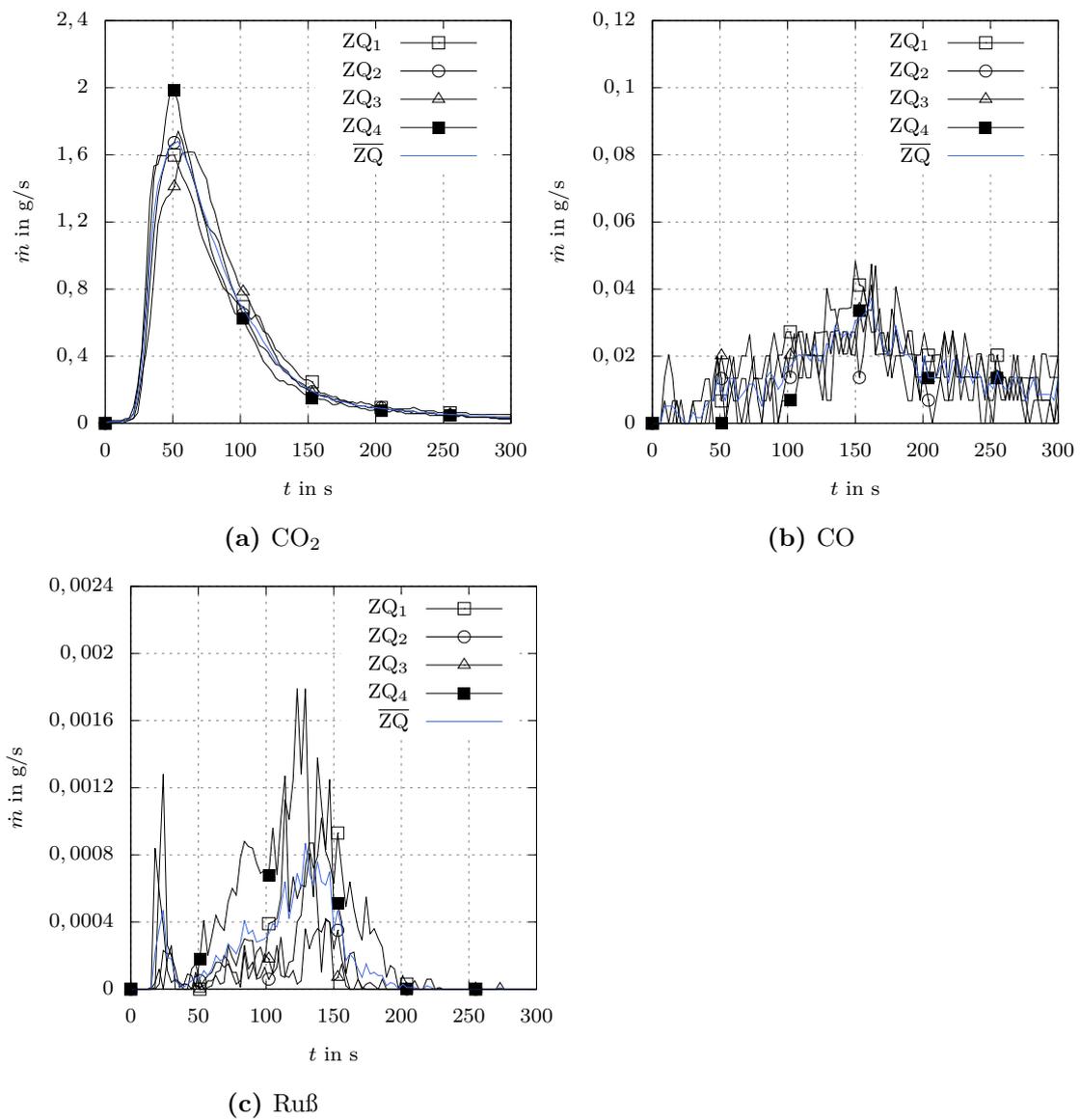
Versuchs- körper	Massen- abbrand	THR	effektive Verbrennungswärme
-	$\Delta m$ in kg	$Q$ in kJ	$\Delta H_{c,eff}$ in kJ/kg
1	0,890	26 117,55	29 345,56
2	0,885	26 153,05	29 551,47
3	0,885	26 119,55	29 513,62
arithmetischer Mittelwert	0,887	26 130,05	29 469,98

## C.6 Stofffreisetzung

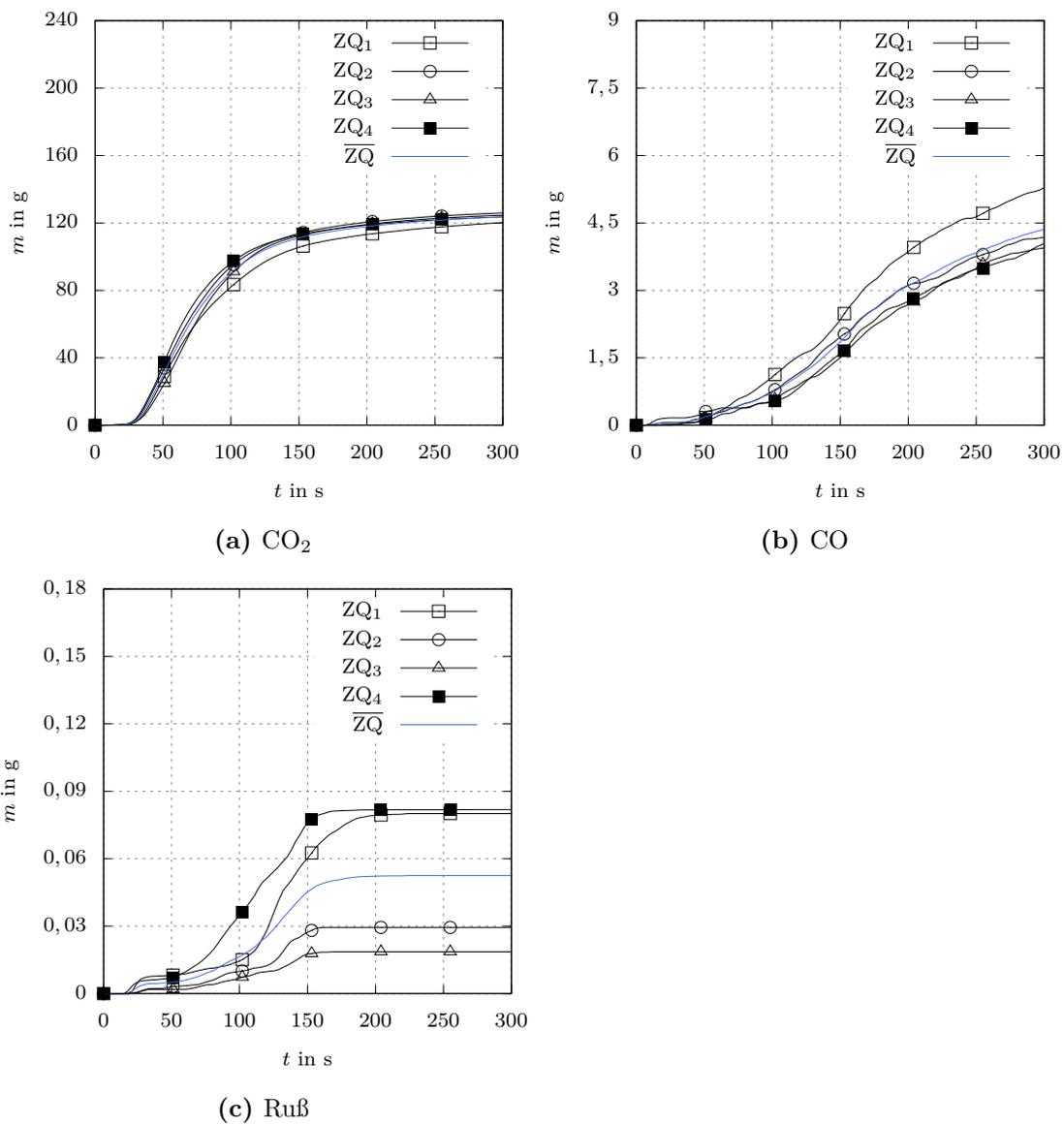
### C.6.1 Zündquelle



**Abbildung C.27:** Experimentelle Bestimmung des in der abgesaugten Luft im Messabschnitt enthaltenen Stoffmengenanteils (a) des CO<sub>2</sub> und (b) des CO sowie (c) der Lichtschwächung mittels SBI-Versuchsapparatur bei Verbrennung der Zündquellen 1 bis 4 (ZQ<sub>1-4</sub>) sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{ZQ}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

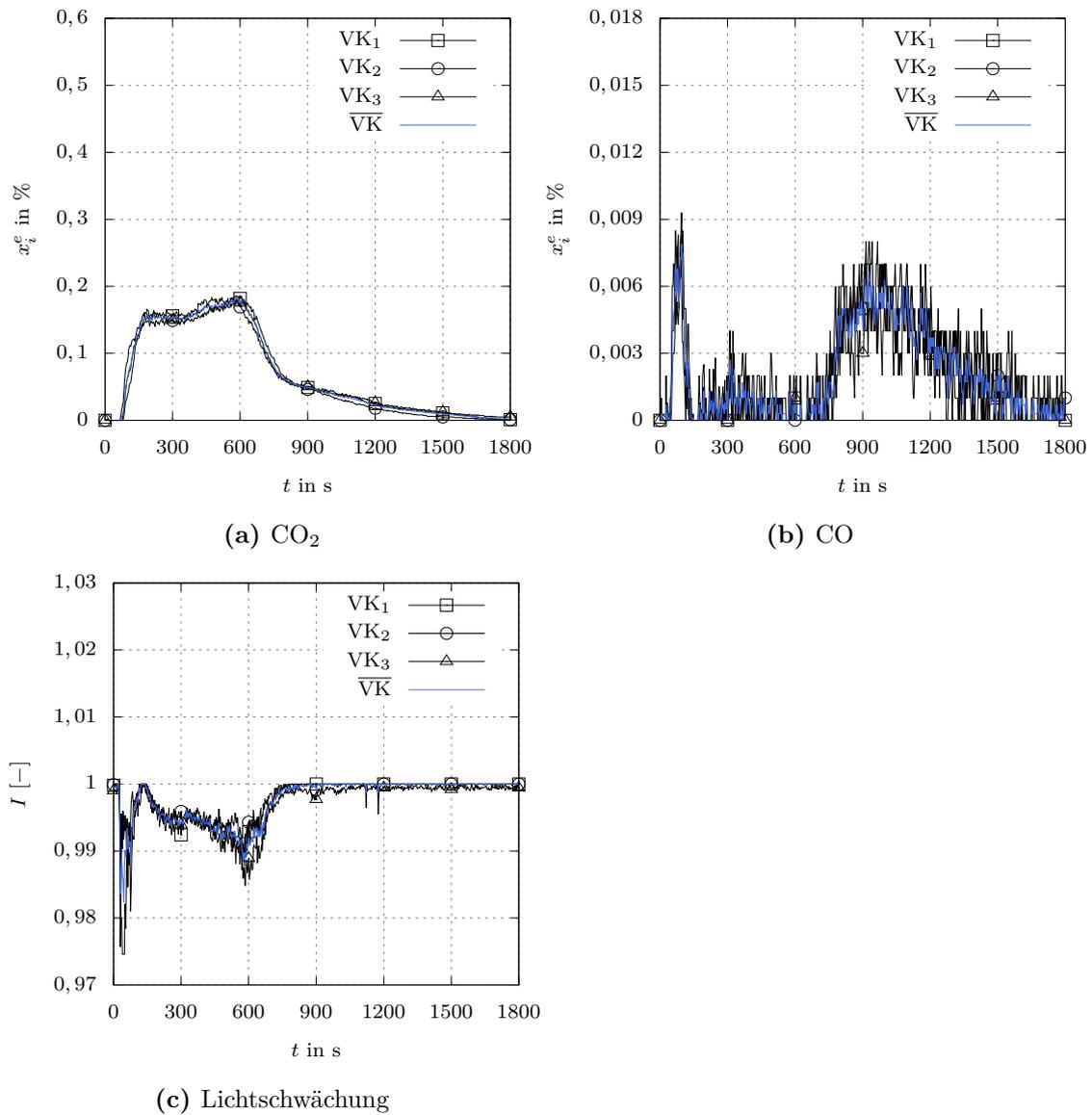


**Abbildung C.28:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der Zündquellen 1 bis 4 ( $ZQ_{1-4}$ ) ausgehenden Stofffreisetzungsraten für (a)  $CO_2$ , (b)  $CO$  und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparat sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{ZQ}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

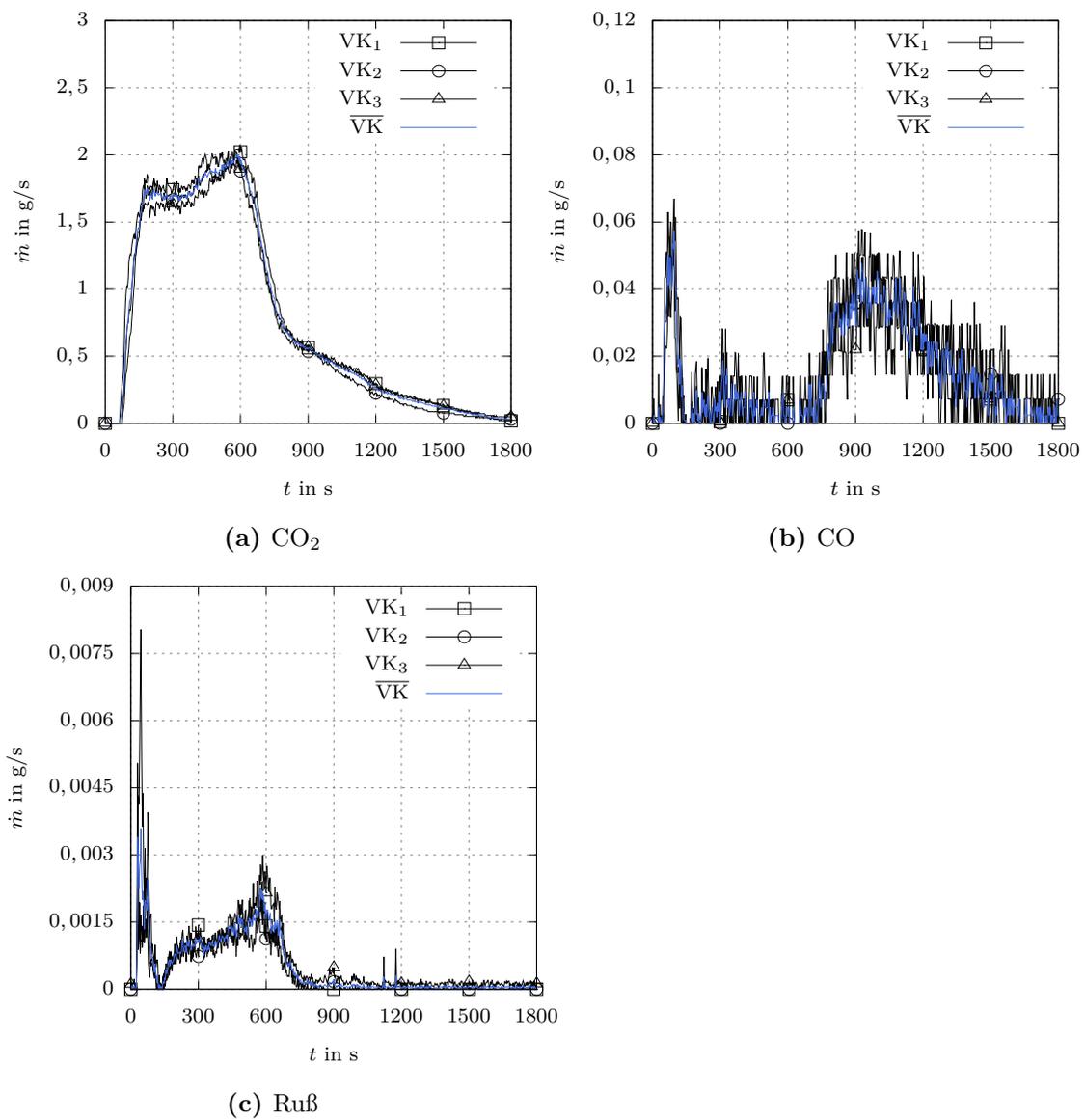


**Abbildung C.29:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der Zündquellen 1 bis 4 (ZQ<sub>1-4</sub>) gesamten ausgehenden Stofffreisetzung für (a) CO<sub>2</sub>, (b) CO und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparat sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{ZQ}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

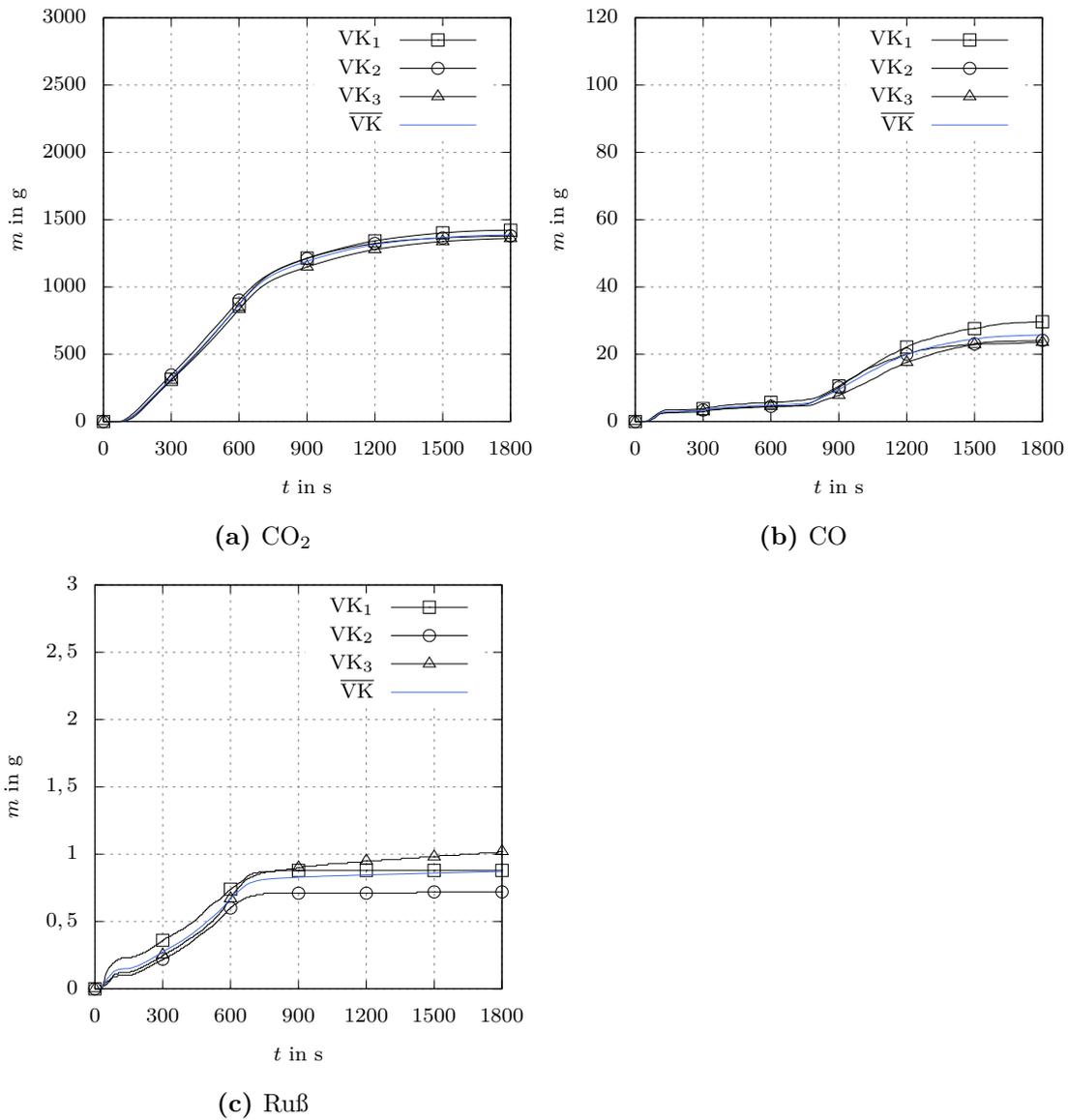
C.6.2 Holz (1 kg)



**Abbildung C.30:** Experimentelle Bestimmung des in der abgesaugten Luft im Messabschnitt enthaltenen Stoffmengenanteils (a) des CO<sub>2</sub> und (b) des CO sowie (c) der Lichtschwächung mittels SBI-Versuchsapparatur bei Verbrennung der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus Holz (Versuchskörpermasse: 1 kg) sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

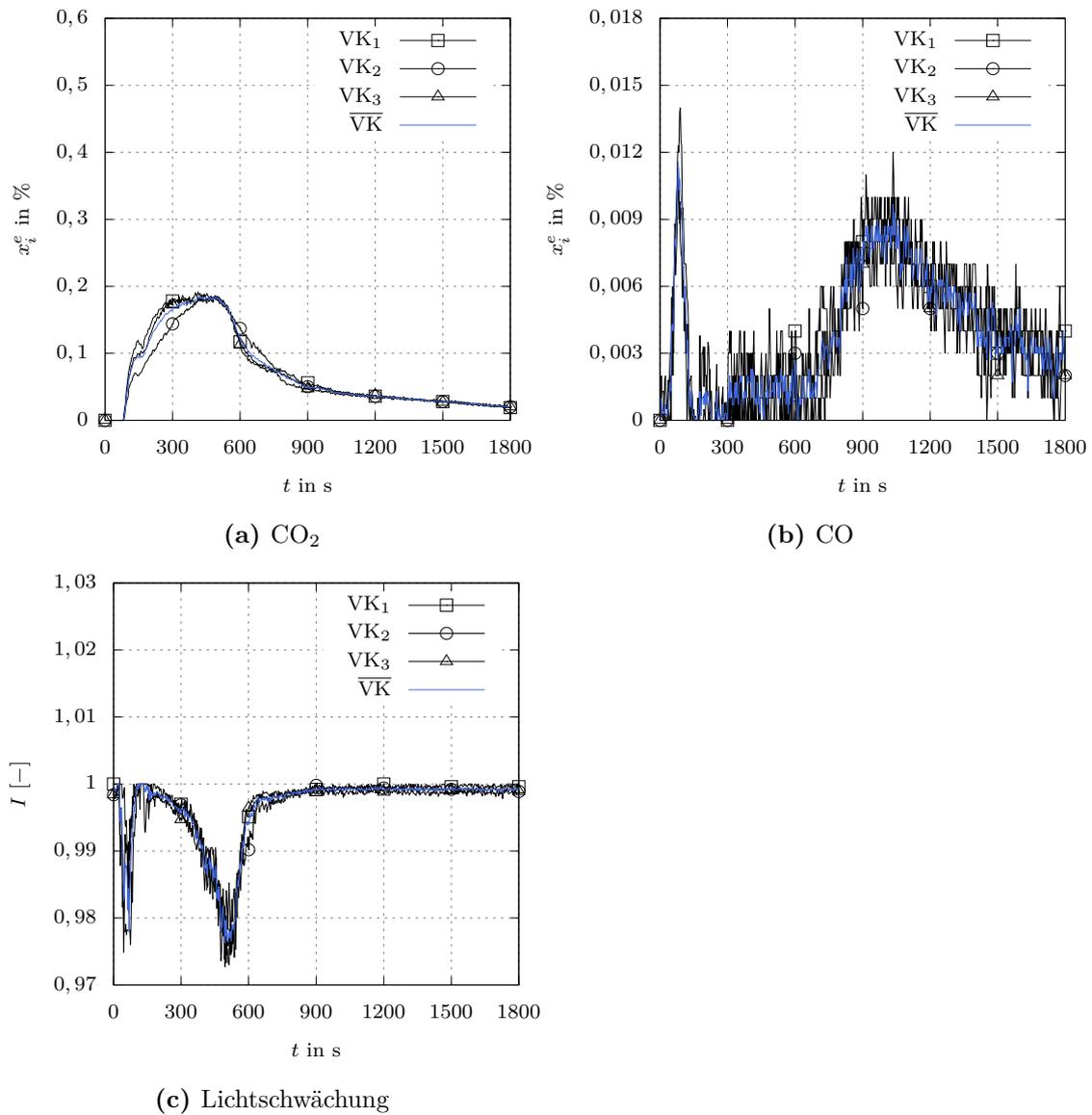


**Abbildung C.31:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus Holz bestehenden Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ , Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stofffreisetzungsraten für (a)  $CO_2$ , (b)  $CO$  und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

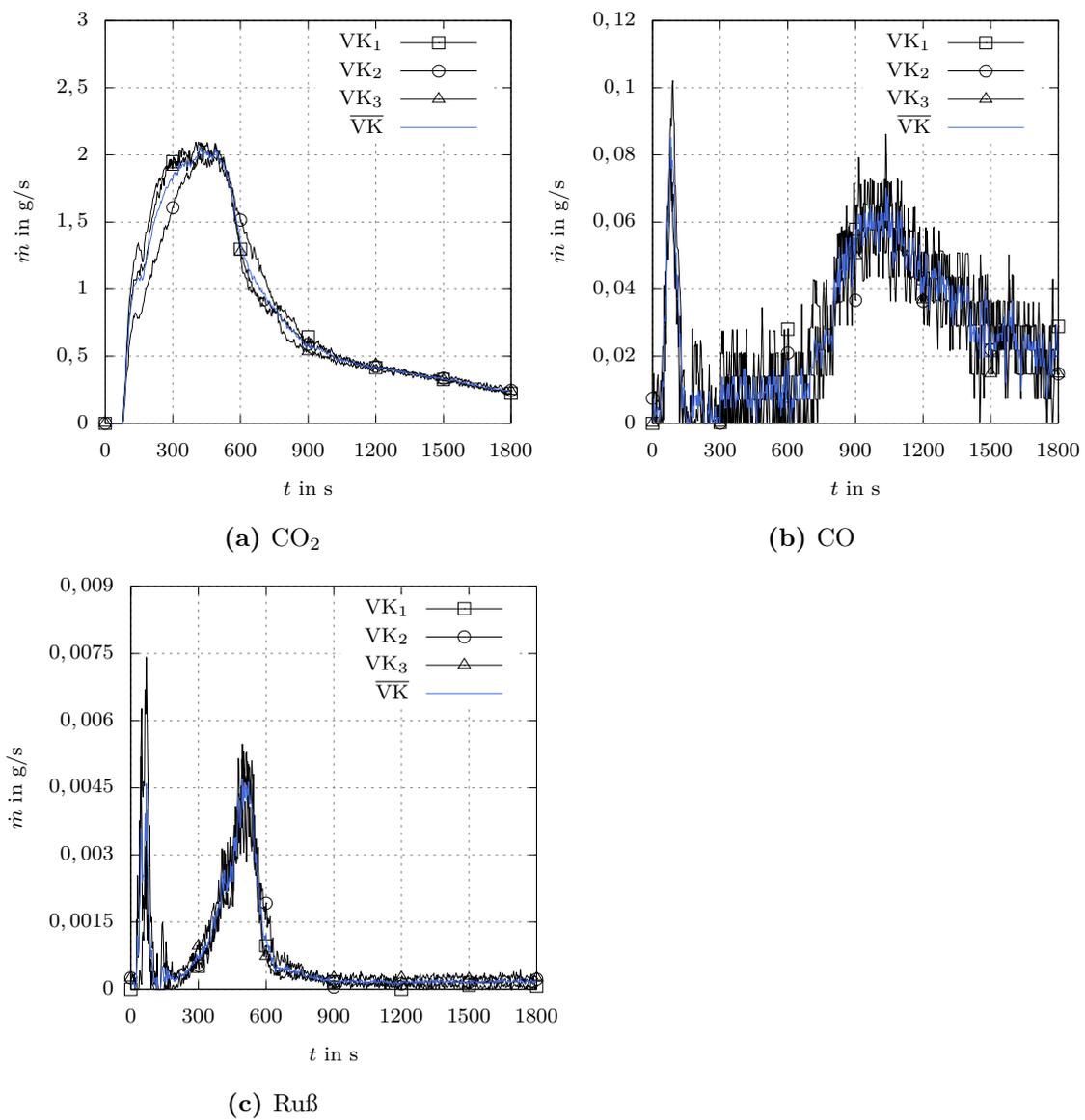


**Abbildung C.32:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus Holz bestehenden Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>, Versuchskörpermasse: 1 kg) gesamten ausgehenden Stofffreisetzung für (a) CO<sub>2</sub>, (b) CO und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

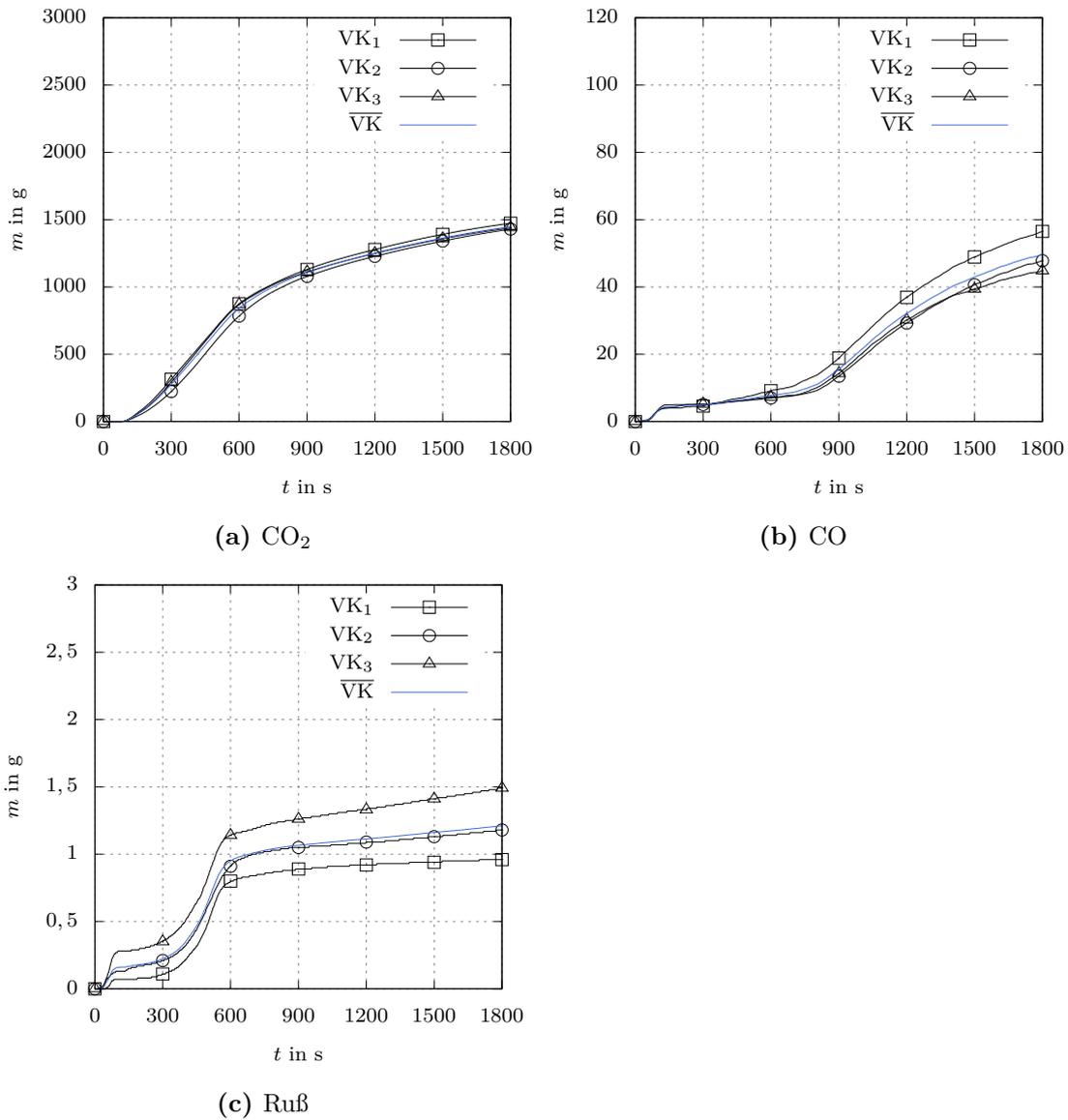
## C.6.3 Span (1 kg)



**Abbildung C.33:** Experimentelle Bestimmung des in der abgesaugten Luft im Messabschnitt enthaltenen Stoffmengenanteils des (a)  $\text{CO}_2$  und des (b)  $\text{CO}$  sowie der (c) Lichtschwächung mittels SBI-Versuchsapparatur bei Verbrennung der Versuchskörper 1 bis 3 ( $\text{VK}_{1-3}$ ) aus Span (Versuchskörpermasse: 1 kg) sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{\text{VK}}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

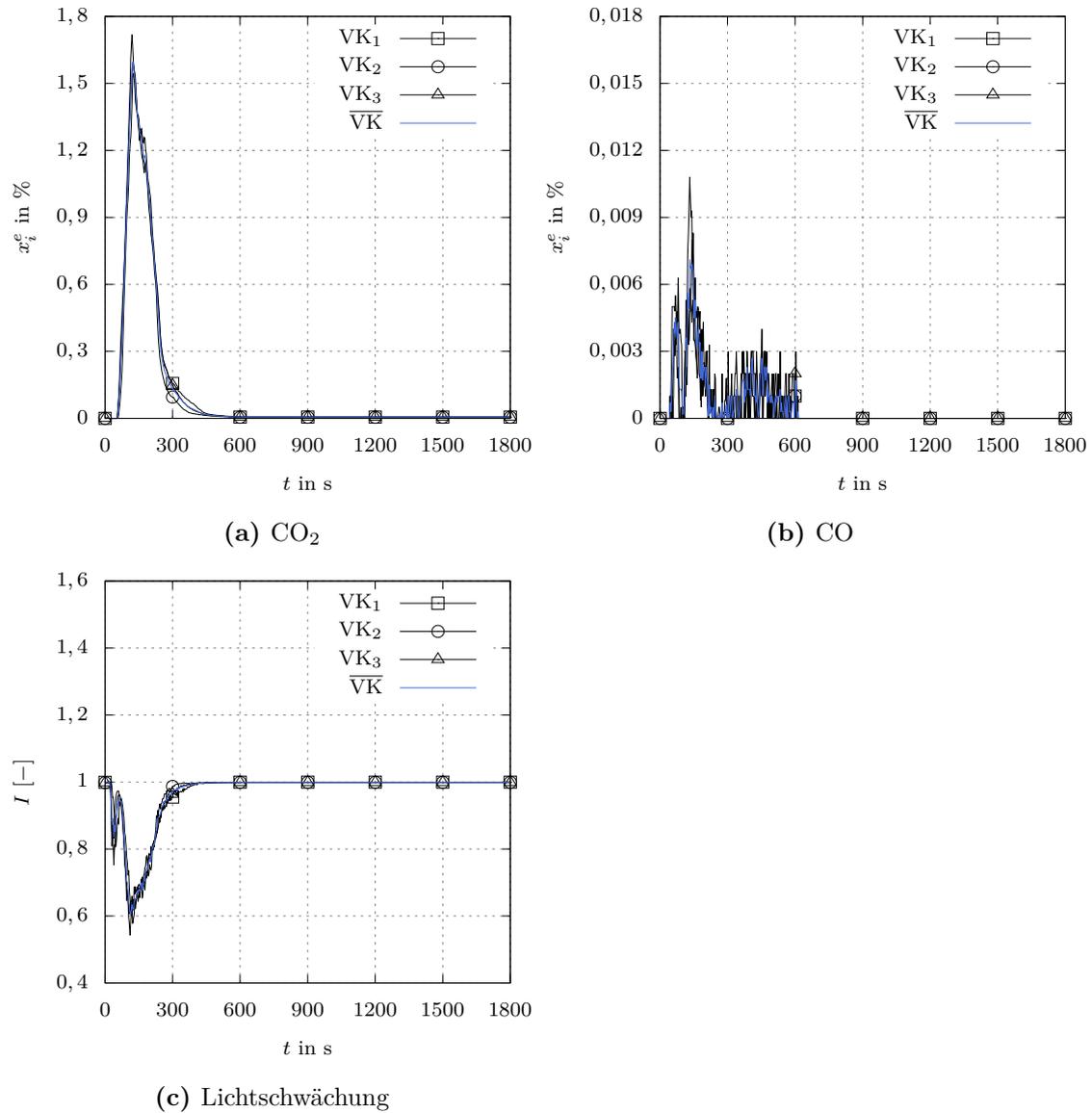


**Abbildung C.34:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus Span bestehenden Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ , Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stofffreisetzungsraten für (a)  $CO_2$ , (b)  $CO$  und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

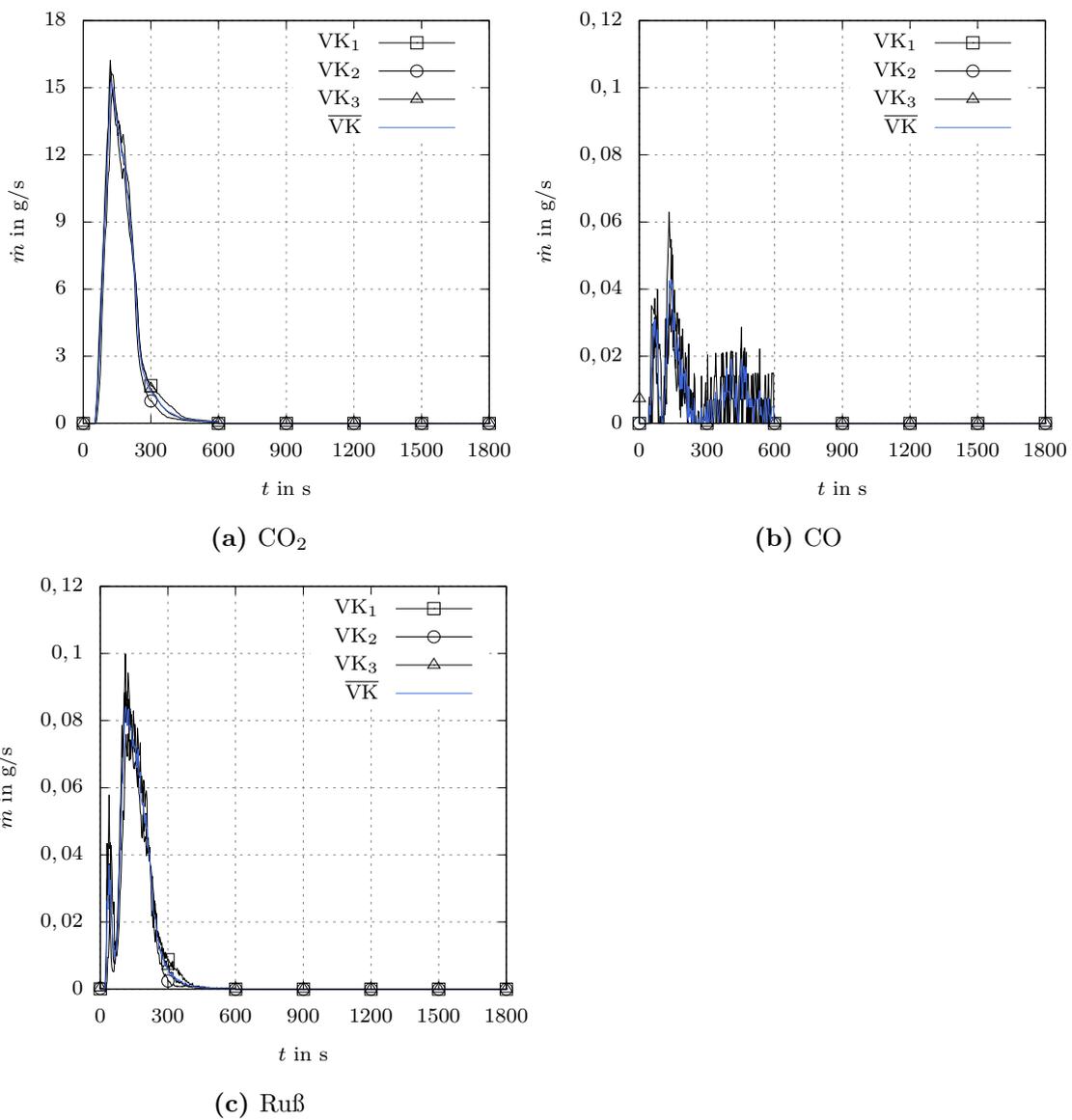


**Abbildung C.35:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus Span bestehenden Versuchskörper 1 bis 3 ( $\text{VK}_{1-3}$ , Versuchskörpermasse: 1 kg) gesamten ausgehenden Stofffreisetzung für (a)  $\text{CO}_2$ , (b)  $\text{CO}$  und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{\text{VK}}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

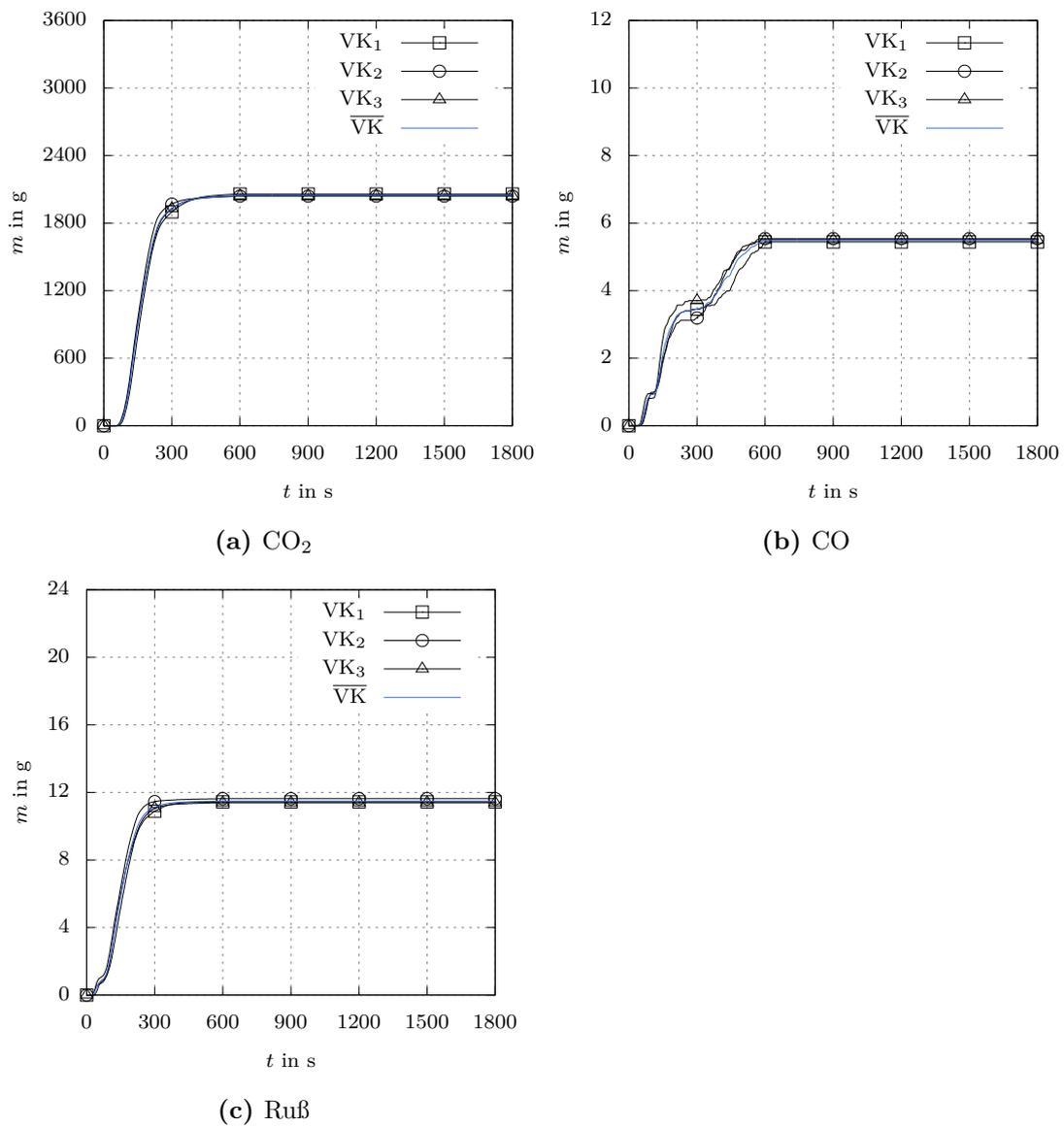
C.6.4 PUR (1 kg)



**Abbildung C.36:** Experimentelle Bestimmung des in der abgesaugten Luft im Messabschnitt enthaltenen Stoffmengenanteils (a) des CO<sub>2</sub> und (b) des CO sowie (c) der Lichtschwächung mittels SBI-Versuchsapparatur bei Verbrennung der Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>) aus PUR (Versuchskörpermasse: 1 kg) sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abbildung C.37:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus PUR bestehenden Versuchskörper 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ , Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stofffreisetzungsraten für (a) CO<sub>2</sub>, (b) CO und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.



**Abbildung C.38:** Experimentelle Bestimmung der bei der Verbrennung der aus PUR bestehenden Versuchskörper 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>, Versuchskörpermasse: 1 kg) gesamten ausgehenden Stofffreisetzung für (a) CO<sub>2</sub>, (b) CO und (c) Ruß mittels SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes ( $\overline{VK}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit.

## C.7 Stoffausbeute

### C.7.1 Zündquelle

**Tabelle C.6:** Berechnung der von den Zündquellen 1 bis 4 ( $ZQ_{1-4}$ ) ausgehenden Stoffausbeute für  $CO_2$ , CO und Ruß in der SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

Zündquelle	$m_{CO_2}$	$m_{CO}$	$m_{Ru\beta}$	$\Delta m_{VK}$	$Y_{CO_2}$	$Y_{CO}$	$Y_{Ru\beta}$
-	g	g	g	g	$\frac{g_{CO_2}}{g_{VK}}$	$\frac{g_{CO}}{g_{VK}}$	$\frac{g_{Ru\beta}}{g_{VK}}$
1	120,23	5,29	0,08	85,00	1,4144	0,0622	0,0009
2	126,04	4,19	0,03	85,00	1,4828	0,0493	0,0003
3	124,68	3,94	0,02	85,00	1,4669	0,0464	0,0002
4	123,69	4,04	0,08	85,00	1,4551	0,0476	0,0010
arithmetischer Mittelwert	123,66	4,37	0,05	85,00	1,4548	0,0514	0,0006

### C.7.2 Holz (1 kg)

**Tabelle C.7:** Berechnung der von den aus Holz bestehenden Versuchskörpern 1 bis 3 ( $VK_{1-3}$ , Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stoffausbeuten für  $CO_2$ , CO und Ruß in der SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

Versuchskörper	$m_{CO_2}$	$m_{CO}$	$m_{Ru\beta}$	$\Delta m_{VK}$	$Y_{CO_2}$	$Y_{CO}$	$Y_{Ru\beta}$
-	g	g	g	g	$\frac{g_{CO_2}}{g_{VK}}$	$\frac{g_{CO}}{g_{VK}}$	$\frac{g_{Ru\beta}}{g_{VK}}$
1	1421,79	29,64	0,88	930,00	1,5288	0,0319	0,0009
2	1379,09	24,13	0,72	915,00	1,5072	0,0264	0,0008
3	1360,83	23,52	1,02	920,00	1,4792	0,0256	0,0011
arithmetischer Mittelwert	1387,24	25,76	0,87	921,67	1,5051	0,0279	0,0009

### C.7.3 Span (1 kg)

**Tabelle C.8:** Berechnung der von den aus Span bestehenden Versuchskörpern 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>, Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stoffausbeuten für CO<sub>2</sub>, CO und Ruß in der SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

Versuchskörper	m <sub>CO<sub>2</sub></sub>	m <sub>CO</sub>	m <sub>Ruß</sub>	Δm <sub>VK</sub>	Y <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Y <sub>CO</sub>	Y <sub>Ruß</sub>
-	g	g	g	g	$\frac{\text{gCO}_2}{\text{gVK}}$	$\frac{\text{gCO}}{\text{gVK}}$	$\frac{\text{gRuß}}{\text{gVK}}$
1	1473,22	56,51	0,96	935,00	1,5756	0,0604	0,0010
2	1430,57	47,81	1,18	930,00	1,5382	0,0514	0,0013
3	1440,69	44,81	1,49	935,00	1,5408	0,0479	0,0016
arithmetischer Mittelwert	1448,16	49,71	1,21	933,33	1,5516	0,0533	0,0013

### C.7.4 PUR (1 kg)

**Tabelle C.9:** Berechnung der von den aus PUR bestehenden Versuchskörpern 1 bis 3 (VK<sub>1-3</sub>, Versuchskörpermasse: 1 kg) ausgehenden Stoffausbeuten für CO<sub>2</sub>, CO und Ruß in der SBI-Versuchsapparatur sowie Darstellung des jeweiligen arithmetischen Mittelwertes.

Versuchskörper	m <sub>CO<sub>2</sub></sub>	m <sub>CO</sub>	m <sub>Ruß</sub>	Δm <sub>VK</sub>	Y <sub>CO<sub>2</sub></sub>	Y <sub>CO</sub>	Y <sub>Ruß</sub>
-	g	g	g	g	$\frac{\text{gCO}_2}{\text{gVK}}$	$\frac{\text{gCO}}{\text{gVK}}$	$\frac{\text{gRuß}}{\text{gVK}}$
1	2058,42	5,44	11,44	890,00	2,3128	0,0061	0,0129
2	2039,86	5,54	11,63	885,00	2,3049	0,0063	0,0131
3	2041,63	5,50	11,39	885,00	2,3069	0,0062	0,0129
arithmetischer Mittelwert	2046,64	5,49	11,49	886,67	2,3082	0,0062	0,0130

# ANHANG D

---

## Experimentelle Untersuchung der Brandentstehung

### D.1 Experimentelles Design

Tabelle D.1: Zusammenfassung des experimentellen Designs.

Versuch	Untersuchungsgeometrie	SBI
1	MLR, Rauchgastemperatur	- -
2	MLR, Rauchgastemperatur	- -
3	- -	MLR, HRR

### D.2 Bauphysikalische Eigenschaften der Gipskartonplatten

Tabelle D.2: Bauphysikalische Eigenschaften der Gipskartonplatten „Rigips® Bauplatte RB 12,5“.

Eigenschaft	Wert
Nennstärke	0,0125 m
Längen- und Breitenmaß	1,25 m × 2,5 m
Brandverhalten	A2-s1, d0 (B)
Rohdichte	680 kg/m <sup>3</sup>
flächenspezifische Masse	8,5 kg/m <sup>2</sup>
Wärmeleitfähigkeit	1,30 W/(m K)
Farbe	grau

### D.3 Experimentelle Erprobung der Zündbedingungen

Zur experimentellen Erprobung der in Kapitel 2.1.4 beschriebenen Zündquelle wurde ein Zündversuch in einer Versuchshalle durchgeführt (Abbildung D.1).



(a) 0 s



(b) 120 s



(c) 240 s



(d) 360 s



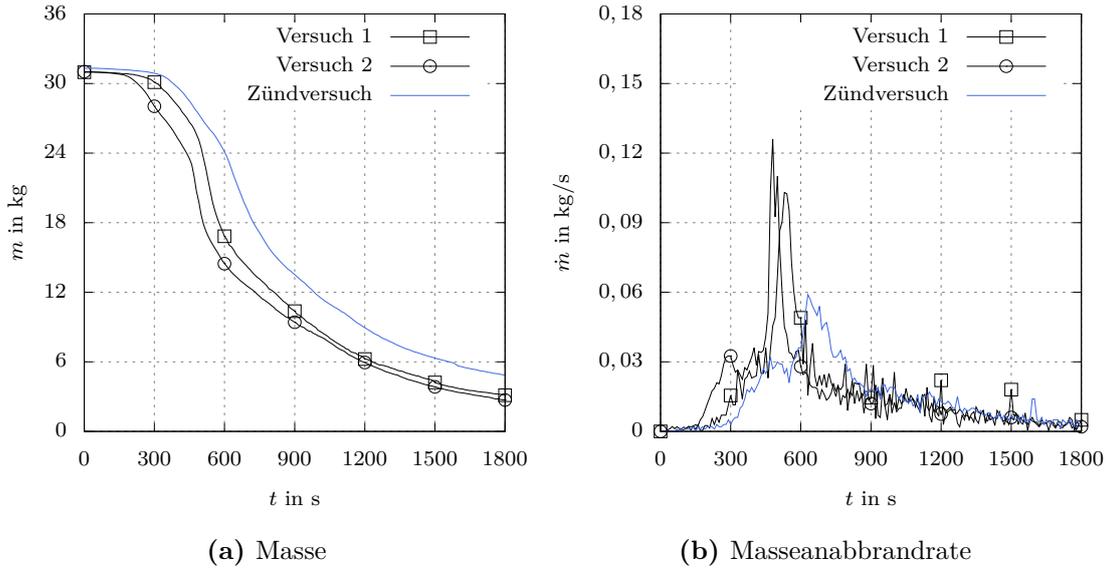
(e) 480 s



(f) 600 s

**Abbildung D.1:** Experimentelle Erprobung der Zündbedingungen am (baugleichen) Sessel mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Zeit.

Der Versuch darf jedoch nicht zur weiteren Untersuchung des Einflusses der Ventilationsbedingungen herangezogen werden, da der in diesem Versuch herangezogene Versuchskörper im Gegensatz zu den Versuchskörpern der Versuche 1 und 2 nicht dem erforderlichen Klima zur Konditionierung von Bauprodukten nach [26] ausgesetzt war (Tabelle 2.1). Aufgrund veränderter Klimabedingungen (höhere relative Luftfeuchtigkeit) und einer damit einhergehenden höheren Materialfeuchte war die nach Gleichung 2.9 berechnete maximale MLR zum einen um 53 % geringer als die im Versuch 2 berechnete maximale MLR (Abbildung D.2). Zum anderen trat sie 150 s später auf.



**Abbildung D.2:** Gegenüberstellung der experimentell bestimmten (a) Masse sowie der daraus berechneten (b) MLR des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in der Versuchshalle (Zündversuch) sowie in der Untersuchungsgeometrie (Versuch 1: Wandöffnung, Versuch 2: Türöffnung) in Abhängigkeit von der Zeit.

## D.4 Flammen- und Rauchgasausbreitung

### D.4.1 Versuch 1



(a) 0 s



(b) 120 s



(c) 240 s



(d) 360 s



(e) 480 s



(f) 600 s

**Abbildung D.3:** Versuch 1 (Wandöffnung): Flammen- und Rauchgasausbreitung in der Untersuchungsgeometrie durch den Brand des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Zeit.

D.4.2 Versuch 2



(a) 0 s



(b) 120 s



(c) 240 s



(d) 360 s



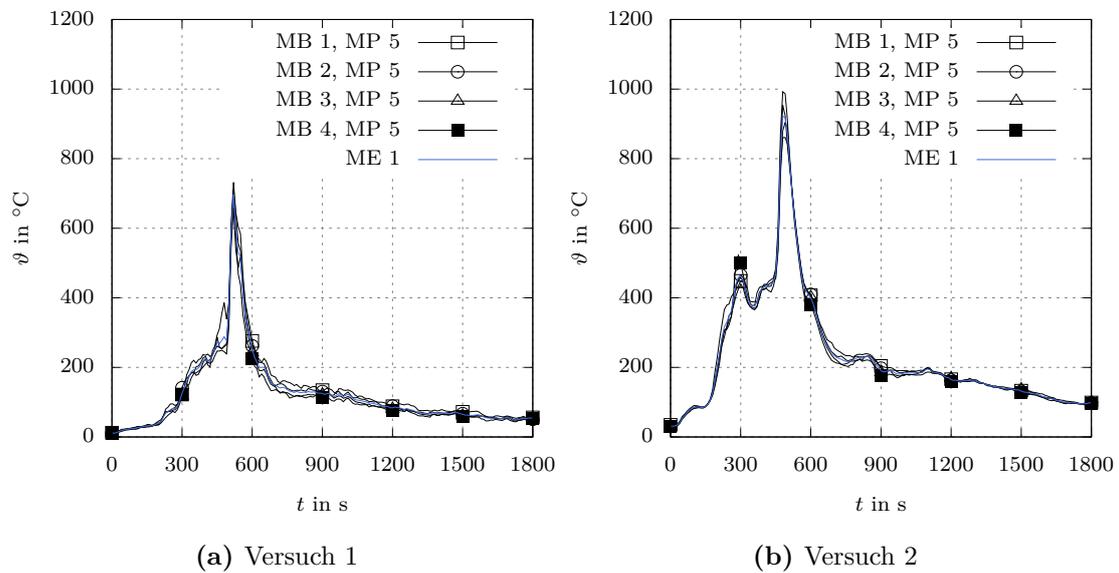
(e) 480 s



(f) 600 s

**Abbildung D.4:** Versuch 2 (Türöffnung): Flammen- und Rauchgasausbreitung in der Untersuchungsgeometrie durch den Brand des Sessels mit gegenwärtiger stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Zeit.

## D.5 Rauchgastemperaturen



**Abbildung D.5:** Rauchgastemperaturen in der Untersuchungsgeometrie in Abhängigkeit von der Zeit und des Ortes (MP: Messpunkt, MB: Messbaum) sowie der Ventilationsbedingungen. (a) Versuch 1: Wandöffnung, (b) Versuch 2: Türöffnung. Darstellung des arithmetischen Mittelwertes aus den Rauchgastemperaturen in identischen Messpunkten (MP) in Form einer Messebene (ME).

# ANHANG E

---

## Experimentelle Untersuchung der Brandausbreitung

### E.1 Experimentelles Design

Tabelle E.1: Zusammenfassung des experimentellen Designs.

Versuch	Raum der Brandentstehung	angrenzender Raum
1.1	Rauchgasausbreitung, Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern, Rauchgastemperatur -	Rauchgasausbreitung, Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern, Rauchgastemperatur, Rauchgaskonzentrationen
2.1	Rauchgasausbreitung, Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern, Rauchgastemperatur -	Rauchgasausbreitung, Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern, Rauchgastemperatur, Rauchgaskonzentrationen
2.2	Rauchgasausbreitung, Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern, Rauchgastemperatur -	Rauchgasausbreitung, Ansprechverhalten von Rauchwarnmeldern, Rauchgastemperatur, Rauchgaskonzentrationen

## E.2 Bauphysikalische Eigenschaften der Einbaufenster

**Tabelle E.2:** Bauphysikalische Eigenschaften der Einbaufenster „PVC ME 60/2“.

Eigenschaft	Wert
Rohbaurichtmaße	0,8 m×1,2 m (Breite×Höhe)
Fenstertyp	einflügelig, Dreh-Kipp-Beschlag
Verglasung	Wärmeschutzglas, Zweifachverglasung
Dichtung	doppelte umlaufende Dichtung
Farbe	weiß
Wärmedurchgangskoeffizient (gesamt)	1,30 W/(m <sup>2</sup> K)
Wärmedurchgangskoeffizient (Glas)	1,10 W/(m <sup>2</sup> K)
Material (Rahmen)	Polyvinylchlorid (PVC)

## E.3 Höhe der Messebene 1

**Tabelle E.3:** Berechnung der arithmetisch gemittelten Körpergrößen von Kindern zwischen 0 und 14 Jahren zur Bestimmung der Höhe der Messebene 1 (ME 1).

Alter	mittlere Körpergröße Jungen <sup>a</sup>	mittlere Körpergröße Mädchen <sup>a</sup>	$\bar{x}$
Jahre	m	m	m
1	0,761	0,748	0,755
2	0,885	0,878	0,882
3	0,893	0,968	0,931
4	1,053	1,045	1,049
5	1,121	1,111	1,116
6	1,184	1,179	1,182
7	1,251	1,247	1,249
8	1,309	1,307	1,308
9	1,365	1,359	1,362
10	1,414	1,416	1,415
11	1,461	1,471	1,466
12	1,507	1,535	1,521
13	1,581	1,590	1,586
14	1,652	1,617	1,635
$\bar{x}$	-	-	1,247

<sup>a</sup>nach [104]

Anmerkung: Die Berechnung der mittleren Größe von Kindern zwischen 0 und 14 Jahren zur Bestimmung der Höhe der Messebene 1 (ME 1) erfolgte unter der Annahme, dass sowohl die Anzahl von Jungen und Mädchen pro Alter als auch die Anzahl von Kindern insgesamt pro Alter gleich verteilt ist.

## E.4 Obere Messbereichsgrenzen (FTIR-Spektrometer)

**Tabelle E.4:** Obere Messbereichsgrenzen des FTIR-Spektrometers (ME 2) in den Versuchen 1.1, 2.1 und 2.2.

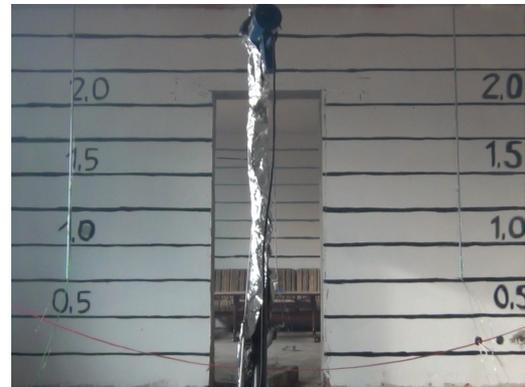
<b>Versuch</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>HCN</b>
-	<i>C</i> in ppm	<i>C</i> in ppm	<i>C</i> in ppm
1.1	300 000	10 000	300
2.1	300 000	10 000	300
2.2	300 000	30 000	2500

## E.5 Rauchgasausbreitung

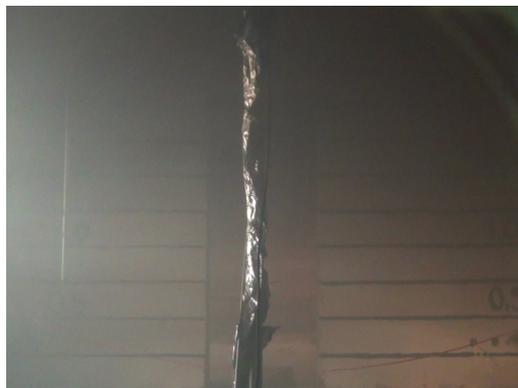
### E.5.1 Versuch 1.1



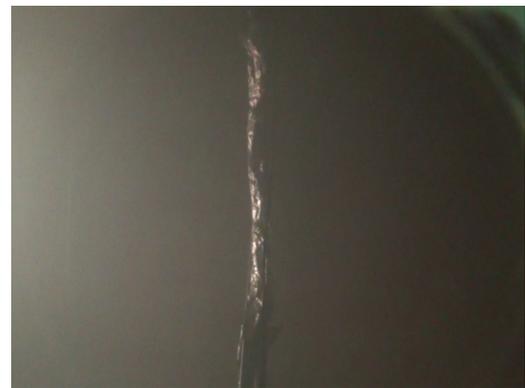
(a) 0 s



(b) 300 s



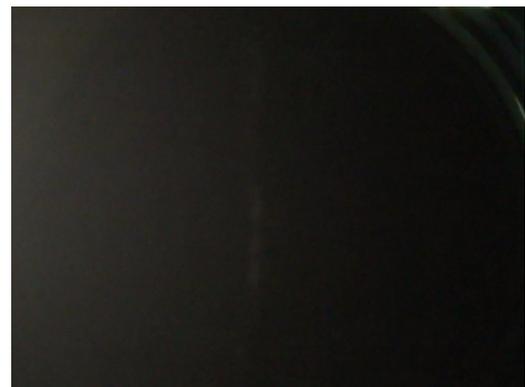
(c) 600 s



(d) 900 s



(e) 1200 s



(f) 1500 s

**Abbildung E.1:** Versuch 1.1: Rauchgasausbreitung während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im Raum der Brandentstehung (Hintergrund) sowie in einem angrenzenden Raum (Vordergrund) in Abhängigkeit von der Zeit.

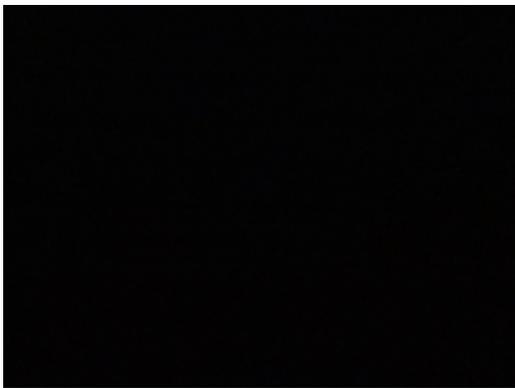
## E.5.2 Versuch 2.1



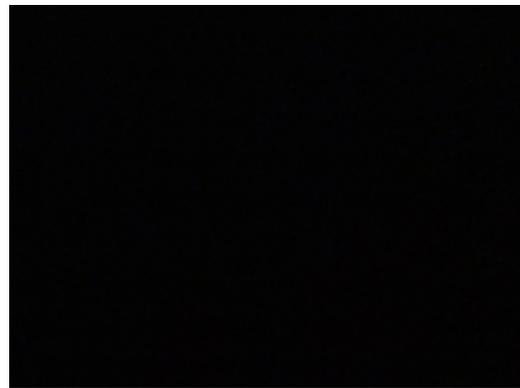
(a) 0 s



(b) 300 s



(c) 600 s



(d) 900 s



(e) 1200 s



(f) 1500 s

**Abbildung E.2:** Versuch 2.1: Rauchgasausbreitung während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im Raum der Brandentstehung (Hintergrund) sowie in einem angrenzenden Raum (Vordergrund) in Abhängigkeit von der Zeit. Anmerkung: Die von der Videokamera ausgehende Sichtweite betrug nach 360 s  $<1,0$  m.

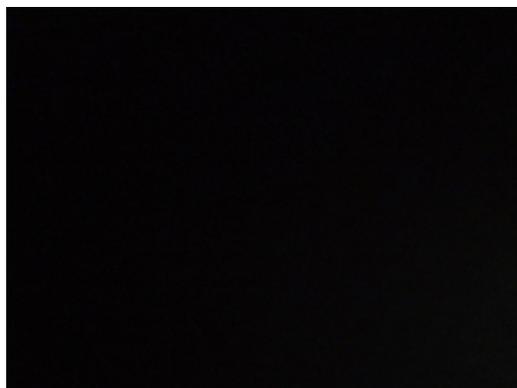
### E.5.3 Versuch 2.2



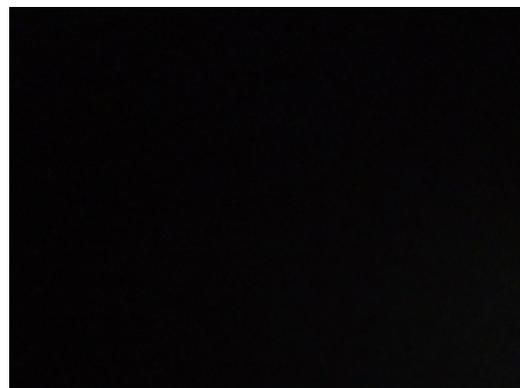
(a) 0 s



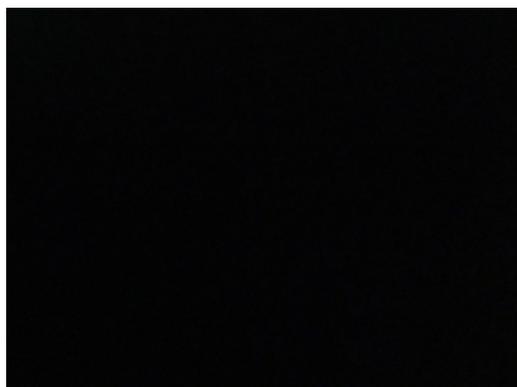
(b) 300 s



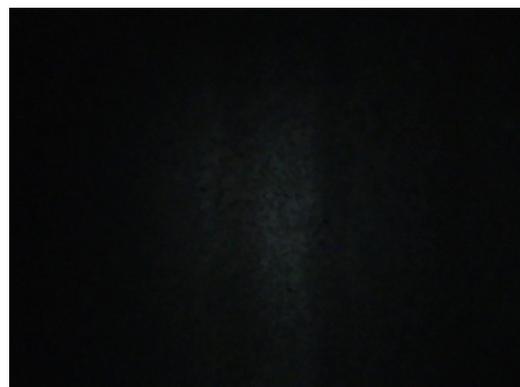
(c) 600 s



(d) 900 s



(e) 1200 s

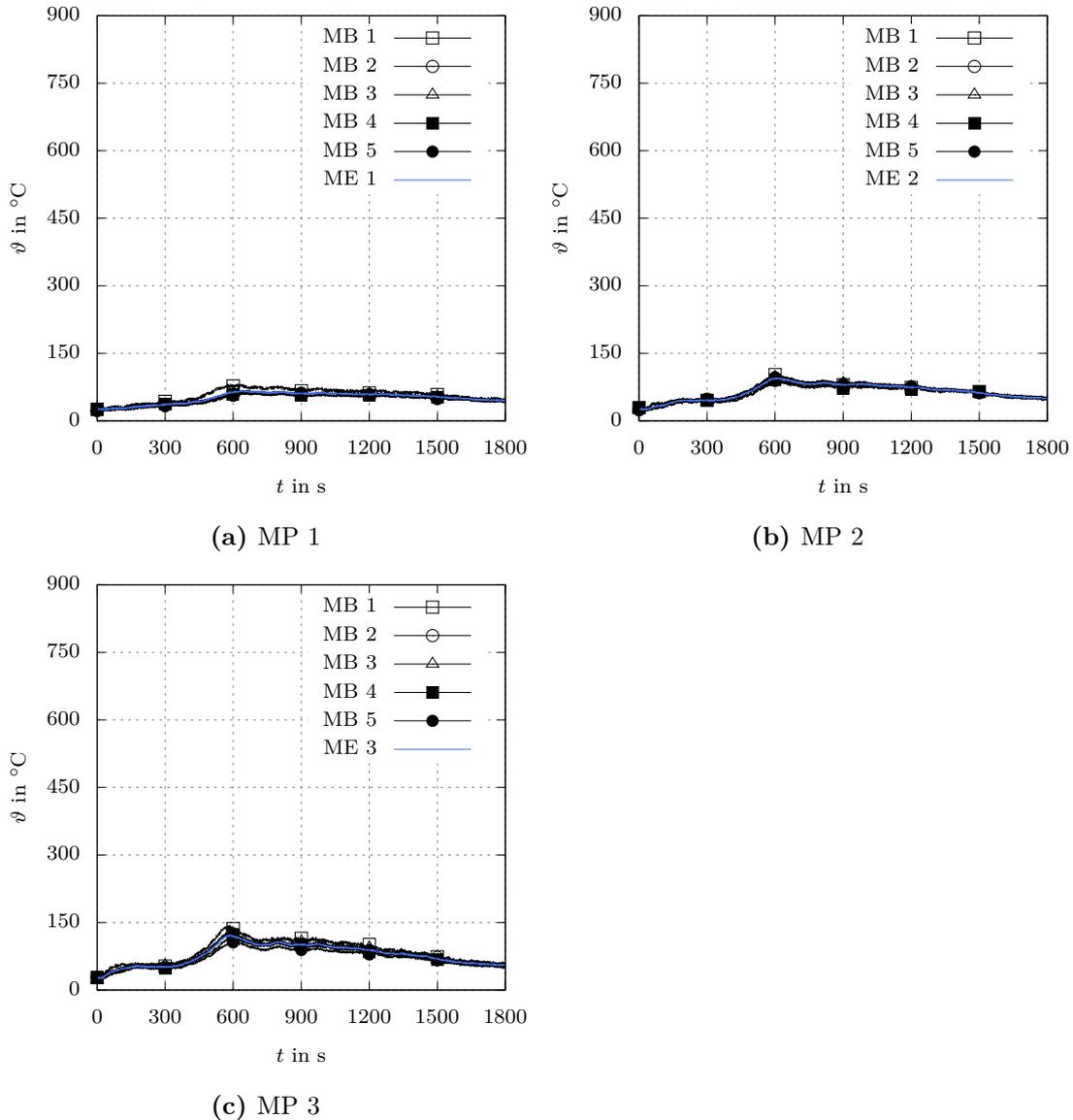


(f) 1500 s

**Abbildung E.3:** Versuch 2.2: Rauchgasausbreitung während der Brandentstehungs- und Brandausbreitungsphase im Raum der Brandentstehung (Hintergrund) sowie in einem angrenzenden Raum (Vordergrund) in Abhängigkeit von der Zeit. Anmerkung: Die von der Videokamera ausgehende Sichtweite betrug nach 450 s  $<1,0$  m.

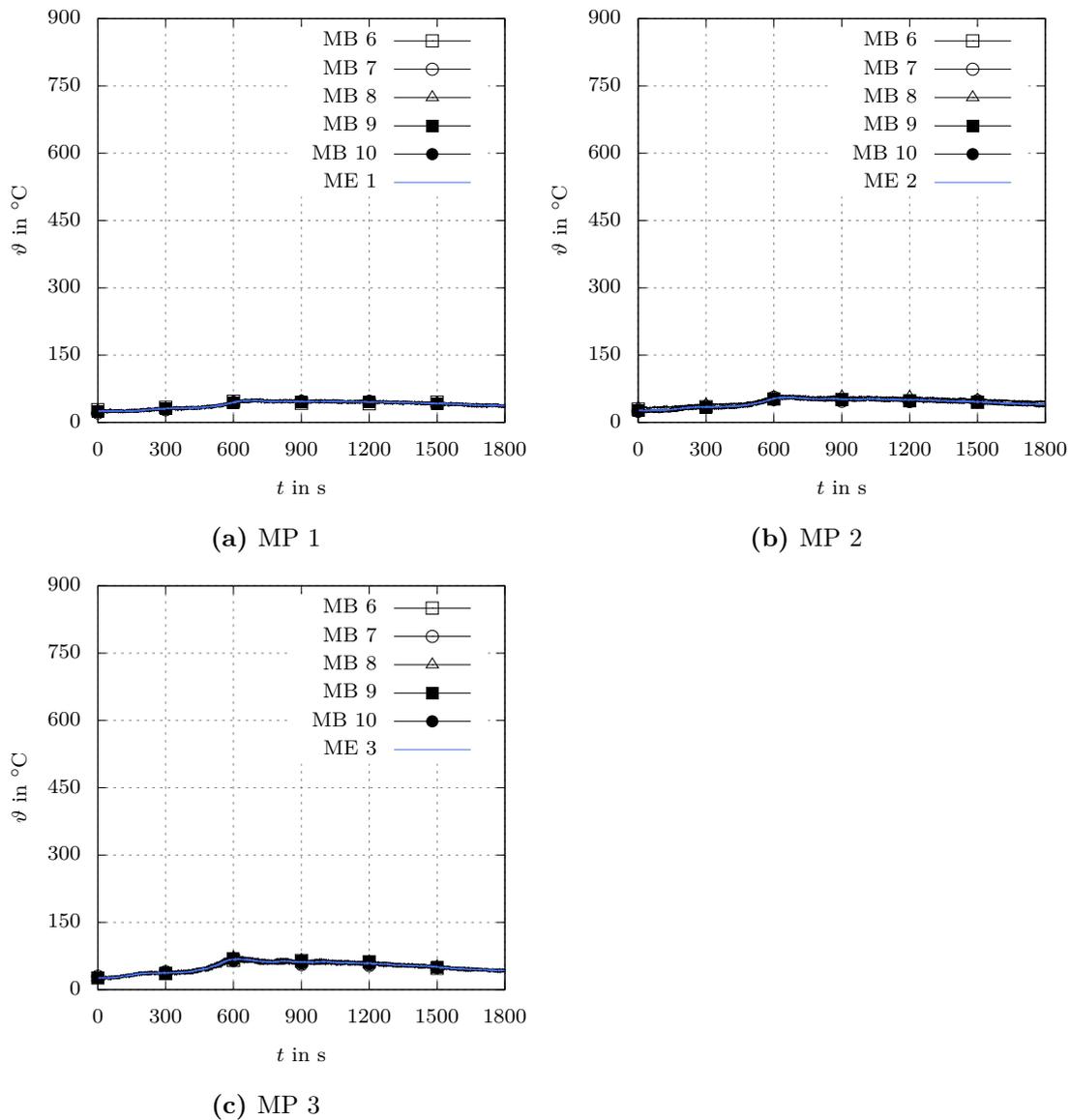
## E.6 Rauchgastemperaturen

### E.6.1 Versuch 1.1: Raum der Brandentstehung



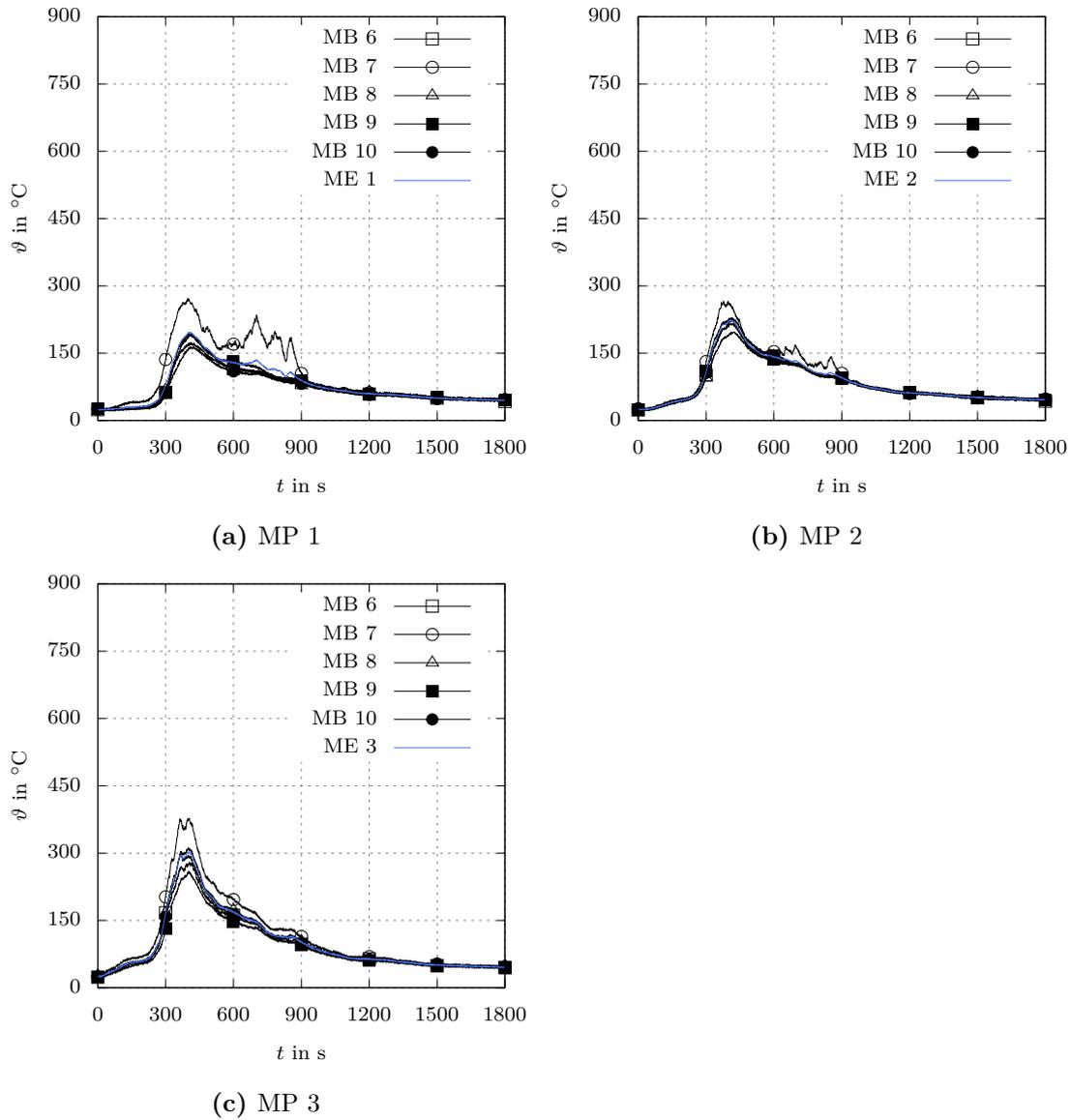
**Abbildung E.4:** Versuch 1.1. Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung in Abhängigkeit von der Zeit und des Ortes (MP: Messpunkt, MB: Messbaum). Darstellung des arithmetischen Mittelwertes aus den Rauchgastemperaturen in identischen Messpunkten (MP) in Form einer Messebene (ME).

E.6.2 Versuch 1.1: angrenzender Raum



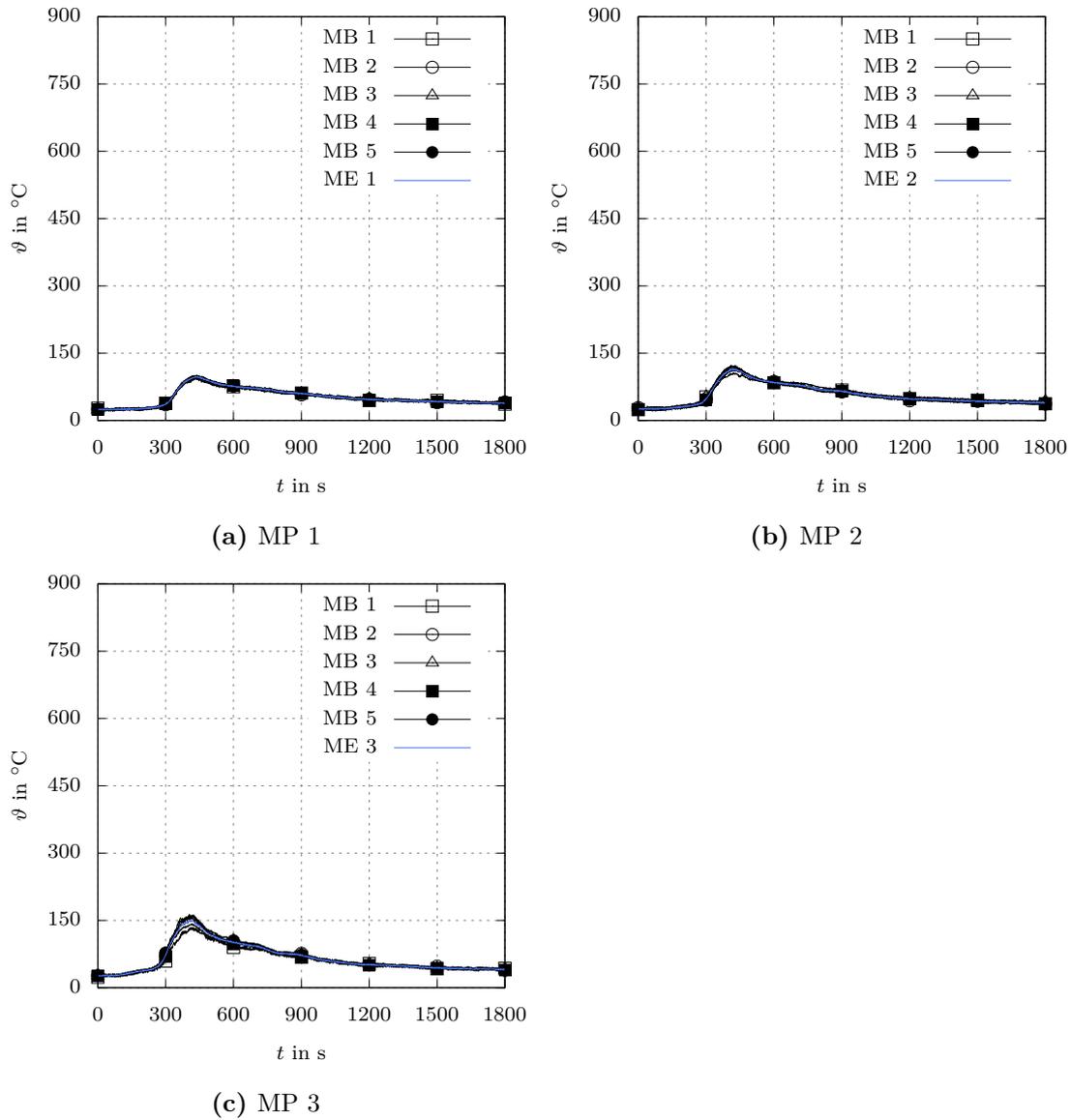
**Abbildung E.5:** Versuch 1.1. Rauchgastemperaturen in einem angrenzenden Raum in Abhängigkeit von der Zeit und des Ortes (MP: Messpunkt, MB: Messbaum). Darstellung des arithmetischen Mittelwertes aus den Rauchgastemperaturen in identischen Messpunkten (MP) in Form einer Messebene (ME).

## E.6.3 Versuch 2.1: Raum der Brandentstehung



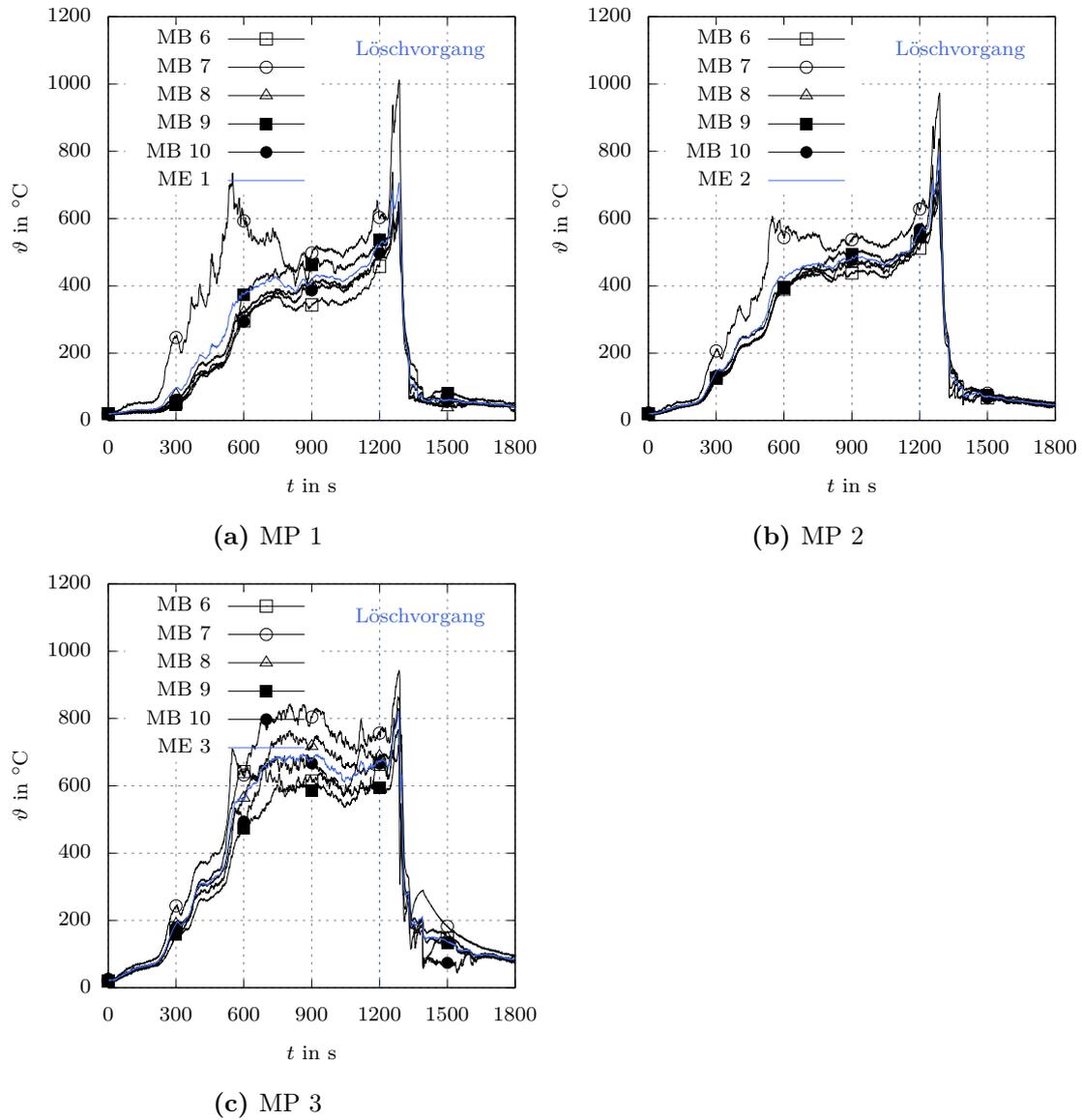
**Abbildung E.6:** Versuch 2.1. Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung in Abhängigkeit von der Zeit und des Ortes (MP: Messpunkt, MB: Messbaum). Darstellung des arithmetischen Mittelwertes aus den Rauchgastemperaturen in identischen Messpunkten (MP) in Form einer Messebene (ME).

E.6.4 Versuch 2.1: angrenzender Raum



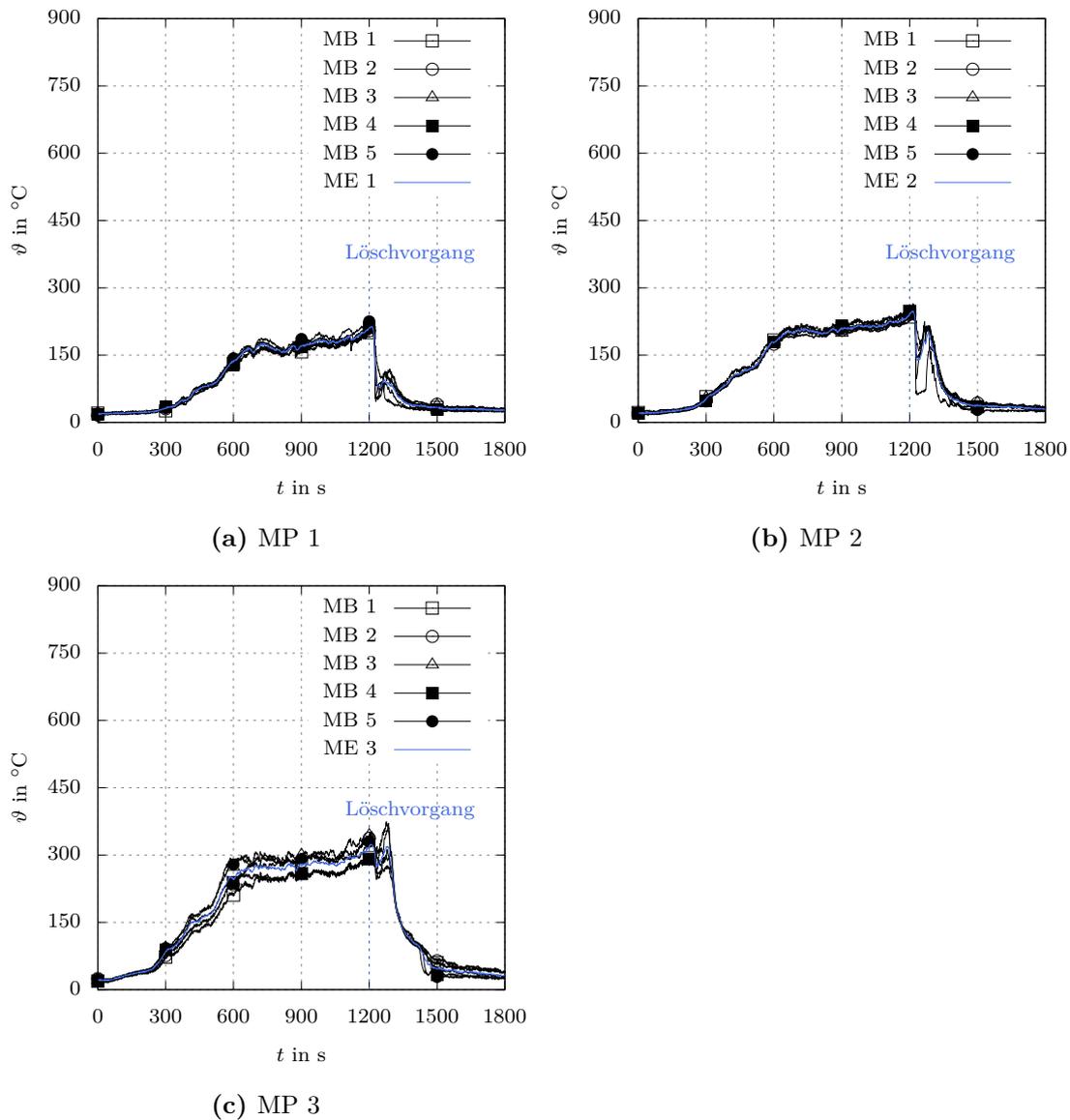
**Abbildung E.7:** Versuch 2.1. Rauchgastemperaturen in einem angrenzenden Raum in Abhängigkeit von der Zeit und des Ortes (MP: Messpunkt, MB: Messbaum). Darstellung des arithmetischen Mittelwertes aus den Rauchgastemperaturen in identischen Messpunkten (MP) in Form einer Messebene (ME).

## E.6.5 Versuch 2.2: Raum der Brandentstehung



**Abbildung E.8:** Versuch 2.2. Rauchgastemperaturen im Raum der Brandentstehung in Abhängigkeit von der Zeit und des Ortes (MP: Messpunkt, MB: Messbaum). Darstellung des arithmetischen Mittelwertes aus den Rauchgastemperaturen in identischen Messpunkten (MP) in Form einer Messebene (ME).

E.6.6 Versuch 2.2: angrenzender Raum



**Abbildung E.9:** Versuch 2.2. Rauchgastemperaturen in einem angrenzenden Raum in Abhängigkeit von der Zeit und des Ortes (MP: Messpunkt, MB: Messbaum). Darstellung des arithmetischen Mittelwertes aus den Rauchgastemperaturen in identischen Messpunkten (MP) in Form einer Messebene (ME).

# ANHANG F

## Numerische Untersuchung von Brandszenarien

### F.1 Thermophysikalische Stoffeigenschaften des Betons

Als Dichte für den Beton  $\rho_B$  wurde nach [99] ein Wert von  $2210 \text{ kg/m}^3$  herangezogen.

**Tabelle F.1:** Wärmeleitfähigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur nach [99].

Temperaturbereich	Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit
$\vartheta_B < 100^\circ\text{C}$	$\lambda_B = 1,7455 + 0,1163 \cdot F + 0,001628 \cdot (\vartheta_B - 20) \cdot F$
$100^\circ\text{C} \leq \vartheta_B < 700^\circ\text{C}$	$\lambda_B = 1,7455 - 0,000872 \cdot (\vartheta_B - 100)$
$\vartheta_B \geq 700^\circ\text{C}$	$\lambda_B = 1,23$

**Tabelle F.2:** Spezifische Wärmekapazität des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur nach [99].

Temperaturbereich	Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität
$20^\circ\text{C} \leq \vartheta_B < 100^\circ\text{C}$	$c_B = 0,8346 + 0,0041 \cdot \vartheta_B + 1 \cdot 10^{-5} \cdot (\vartheta_B)^2$
$100^\circ\text{C} \leq \vartheta_B < 140^\circ\text{C}$	$c_B = 2,542 - 0,0012 \cdot \vartheta_B$
$140^\circ\text{C} \leq \vartheta_B < 200^\circ\text{C}$	$c_B = 0,7976 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_B + 7 \cdot 10^{-6} \cdot (\vartheta_B)^2$
$200^\circ\text{C} \leq \vartheta_B < 525^\circ\text{C}$	$c_B = 1,0268 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_B + 1 \cdot 10^{-6} \cdot (\vartheta_B)^2$
$525^\circ\text{C} \leq \vartheta_B < 700^\circ\text{C}$	$c_B = 1,796 - 0,0008 \cdot \vartheta_B$
$700^\circ\text{C} \leq \vartheta_B \leq 1200^\circ\text{C}$	$c_B = 1,22$