



MASTERARBEIT

Personensicherheit im Mehrfamilienhaus – Untersuchung der Rauchgasströmung bei einem Kellerbrand in Bezug zum einsatztaktischen Vorgehen der Feuerwehr

vorgelegt am 15. März 2021
Moritz Mayer 20193085

1. Gutachterin: Prof. Dr.-Ing. Stefanie Schubert-Polzin
2. Gutachter: Dipl.-Ing. Thomas Fink

in Zusammenarbeit mit der
Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg



OTTO-VON-GUERICKE UNIVERSITÄT MAGDEBURG
Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik



HOCHSCHULE MAGDEBURG-STENDAL
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit

**Personensicherheit im Mehrfamilienhaus –
Untersuchung der Rauchgasströmung bei einem Kellerbrand
in Bezug zum einsatztaktischen Vorgehen der Feuerwehr**

Masterarbeit vorgelegt von
Moritz Mayer

**OTTO-VON-GUERICKE-UNIVERSITÄT
MAGDEBURG**



Fakultät für Verfahrens- und
Systemtechnik
**HOCHSCHULE MAGDEBURG-
STENDAL**



Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau
und Sicherheit

Aufgabenstellung der Masterarbeit für

Herrn Moritz Mayer **Matrikelnummer:** 20193085

Thema: Personensicherheit im Mehrfamilienhaus – Untersuchung der Rauchgasströmung bei einem Kellerbrand in Bezug zum einsatztaktischen Vorgehen der Feuerwehr

Erläuterung:

Ein Kellerbrand in einem innerstädtischen Mehrfamilienhaus ohne besondere bauordnungsrechtliche Anforderungen stellt die Feuerwehr vor besondere Herausforderungen, da sich Rauchgase und Schadstoffe im gesamten Treppenraum ungehindert ausbreiten. Über den Treppenraum führt in der Regel der erste Rettungsweg und der Angriffsweg der Feuerwehr, weshalb die Rauchausbreitung in die Geschosswohnungen, vor dem Hintergrund dichtschießender Wohnungsabschlusstüren, und die Personensicherheit während der Selbstrettungsphase über den ersten Rettungsweg untersucht werden soll. Dabei werden einsatztaktische Vorgehensweisen des abwehrenden Brandschutzes in Bezug auf die Personensicherheit berücksichtigt. Dieses Gesamtszenario stellt für die Feuerwehr eine große Herausforderung dar und ist gerade im urbanen Raum von hoher Relevanz. Der zumeist unterventilierte Kellerbrand mit massiver Rauchausbreitung über den Angriffsweg der Einsatzkräfte, der Kamineffekt des Treppenraumes für aufsteigende Rauchgasströmungen in Kombination zu Brandthermiken und toxischen Luftschadstoffen und die komplexe und langwierige Brandbekämpfung sind nur einige der wesentlichen Herausforderung.

Die Aufgabenschwerpunkte sind die folgenden:

- Untersuchung der Rauchgasströmung mittels numerischer Brandsimulation
- Erarbeitung und Begründung eines Bemessungsbrandszenarios
- Betrachtung und Bewertung der einsatztaktischen Vorgehensweise des abwehrenden Brandschutzes
- Erstellung von wissenschaftlichen Lehr- und Ausbildungsunterlagen

Beginn der Arbeit: 15. Okt. 2020

Abgabe der Arbeit: 15. März 2021

Unterschriften

St. Schubert-Polzin

Erstgutachterin

Prof. Dr.-Ing.

Stefanie Schubert-Polzin

Hochschule Magdeburg-Stendal

Thomas Fink

Zweitgutachter

Dipl.-Ing. Thomas Fink

Landesfeuerwehrschule

Baden-Württemberg

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ausdrücklich, dass es sich bei der von mir eingereichten schriftlichen Arbeit mit dem Titel

Personensicherheit im Mehrfamilienhaus – Untersuchung der Rauchgasströmung bei einem Kellerbrand in Bezug zum einsatztaktischen Vorgehen der Feuerwehr

um eine von mir erstmalig, selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasste Arbeit handelt.

Ich versichere, dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und alle wörtlichen oder sinngemäß übernommenen Textstellen unter Verwendung der üblichen Regeln des wissenschaftlichen Zitierens als solche kenntlich gemacht habe. Dies gilt auch für Quellen aus dem Internet, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken und andere Darstellungen.

Mit ist bekannt, dass die ungekennzeichnete Übernahme fremder Texte als Täuschung gewertet wird und die entsprechende Prüfungsleistung als nicht erbracht gilt.

Ort, Datum

Moritz Mayer

Anmerkung

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit und des Textflusses das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

Die aufgelisteten Einheiten im Symbolverzeichnis entsprechen dem internationalen Einheitensystem und sind in den SI-Einheiten aufgeführt. Diese Einheiten stehen vorne, durch Kommata getrennt sind des Weiteren die im Brandschutzingenieurwesen und in dieser Arbeit meistverwendeten Einheiten aufgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	viii
Abstract.....	ix
Abbildungsverzeichnis.....	x
Tabellenverzeichnis.....	xii
Formelverzeichnis.....	xiii
Symbolverzeichnis.....	xiv
Abkürzungsverzeichnis.....	xv
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	1
1.2 Gefahren an der Einsatzstelle.....	4
2 Ingenieurmethoden im Brandschutz.....	6
2.1 Anwendungsfeld.....	6
2.2 Rauchgasberechnungen.....	7
3 Bauordnungsrechtliche Gebäudeeinstufung.....	9
4 Brand- und Rauchgassimulation mit FDS.....	11
4.1 Erklärung und Haftungsausschluss.....	11
4.2 Grundlagen der Brandsimulation.....	12
4.3 Modellauswahl und Erhaltungsgleichungen.....	13
4.4 Die Netzkonfiguration.....	16
4.5 Bestimmung der Rechengitterweite.....	17
5 Schutzzielbestimmung.....	23
5.1 Definition Schutzziele.....	23
5.2 Schutzinteressen und Schutzziele.....	24
5.3 Funktionale Anforderungen.....	25
5.4 Leistungskriterien.....	25
5.5 Quantifizierung.....	29
5.6 Sicherheitsbeiwerte.....	30

6	Bemessungsbrandszenario	32
6.1	Das Brandszenario	32
6.2	Der Bemessungsbrand	34
6.3	Festlegung der Brandverlaufphasen.....	36
6.4	Das Pyrolysemodell.....	39
7	Einsatztaktische Herangehensweise	41
7.1	Gesamteinsatztaktische Ergänzung.....	41
7.2	Leistungsfähigkeit der Feuerwehr	43
7.3	Führungsorganisation.....	47
7.4	Operativ-taktische Vorgehensweise	49
7.5	Grundlagen der Brandbekämpfung und der taktischen Ventilation	55
8	Die Brand- und Rauchgassimulation.....	56
8.1	Randparameter	56
8.1.1	Simulationsdauer.....	56
8.1.2	Simulationsablauf.....	57
8.1.3	Erleichterungen.....	58
8.2	Mesh-Anordnung.....	59
8.3	Raumanordnung	61
8.3.1	Keller- und Brandraum	61
8.3.2	Treppenraum	62
8.3.3	Wohneinheiten	63
8.4	Objektanordnung.....	64
8.4.1	Lichtschacht	64
8.4.2	Stufengeometrien.....	65
8.4.3	Treppenraumfenster	66
8.4.4	Gebäudeabschlussöffnung.....	66
8.4.5	Taktische Ventilation - Überdruckbelüftung.....	67
8.4.6	Wohnungsabschlussöffnungen mit Leckage.....	71
8.4.7	Mobiler Rauchverschluss	75

8.5	Auswertungssteuerung.....	76
8.6	Auswertung der Simulationsergebnisse.....	78
8.6.1	Übergabeparameter der Mesh-Schnittstelle.....	78
8.6.2	Optische Auswertung.....	79
8.6.3	S_1_LEAK_1_REAC_1	83
8.6.4	S_2_LEAK_1_REAC_1_FW	86
8.6.5	S_3_LEAK_1_REAC_2	88
8.6.6	S_4_LEAK_2_REAC_1	90
8.6.7	S_5_LEAK_2_REAC_1_FW	92
8.6.8	S_6_LEAK_2_REAC_2	93
8.6.9	Simulationsübergreifende Auswertung.....	95
8.6.10	Einsatztaktische Simulationsauswertung.....	99
8.6.11	Brandverlaufsphasen	103
8.7	Plausibilitätsprüfung der Brand- und Rauchgassimulation.....	105
9	Zusammenfassung der einsatztaktischen Erkenntnisse.....	107
10	Fazit, Diskussion und Ausblick	109
	Literaturverzeichnis	111
	Anhang.....	115
	Anlage 1: Ablaufplan des Führungsvorgangs der LFS BW	A-1
	Anlage 2: Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände	A-2
	Anlage 3: Input File FDS - Masterarbeit von Moritz Mayer, 20193085.....	A-7
	Anlage 4: Lehr- und Ausbildungsaussage für die LFS BW.....	A-21
	Anlage 5: Tabellarische Darstellung der Simulationsauswertungen	A-23

Zusammenfassung

In enger Zusammenarbeit mit der Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg als Kooperationspartner wird ein Bemessungs- und Betrachtungsbrandszenario ausgearbeitet und mit der Software *Fire Dynamics Simulator* (FDS) simuliert. Dieses wird im Rahmen der bauordnungsrechtlichen Einordnung und der Ingenieurmethoden im Brandschutz charakterisiert. Untersucht wird ein Mehrfamilienhaus im urbanen Bereich. Als Annahme wird ein ausgedehntes Kellerbrandszenario mit geöffneter Kellerabschlusstüre und realitätsnahen Ventilationsöffnungsflächen konkretisiert. Unter Beachtung diverser Modellierungskonfigurationen der Brand- und Rauchgassimulation mittels *Computational Fluid Dynamics* (CFD) kann eine umfangreiche und detaillierte Gebäudestruktur implementiert werden.

Auf Grundlage der funktionalen Anforderungen und Quantifizierung des Schutzziels Personensicherheit werden drei aussagekräftige Leistungs- und Nachweiskriterien definiert. Thermische, toxische und sichtrübende Eigenschaften des Brandrauches werden mit einer quantitativen Nachweisführung bezüglich der Selbst- und Fremdrettungsphase der Bewohner analysiert. Neben der Untersuchung des notwendigen Treppenraumes, hat die Beurteilung der schädigenden Wirkung von Rauch- und Schadstoffinhalationen der Bewohner hinter einem dichtschießenden Wohnungsabschluss hohe Relevanz. Durch die Entwicklung und Implementierung von Modellierungsansätzen der Rauchdichtheit von dichtschießenden Wohnungsabschlüssen können korrespondierende und einsatzrelevante Zeiten für den abwehrenden Brandschutz abgeleitet werden.

Durch die Einbindung von einsatztaktischen Herangehensweisen und Maßnahmen der Feuerwehr in die Simulation entsteht eine detailgetreue Nachstellung des Einsatzszenarios. Zur praktischen Umsetzung aller relevanten Aspekte werden sechs Brand- und Rauchgassimulationen mit variierten Parametern und sowohl unbeeinflusst als auch mit simuliertem Eingreifen der Feuerwehr durchgeführt.

Bei allen durchgeführten Simulationen werden die drei Nachweiskriterien vor dem Eintreffen der Einsatzkräfte im Bereich des notwendigen Treppenraums überschritten. Durch eine Integration von einsatztaktischen Maßnahmen kann eine positive Veränderung der Umgebungsverhältnisse in Treppenraum und Wohneinheiten beobachtet werden. Besonders durch eine gezielte Kombination von Brandbekämpfung und Belüftungsmaßnahmen im Zuge der Fremdrettungsphase kann eine deutliche Verbesserung herbeigeführt werden.

Abstract

In close cooperation with the Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg, both a 'design fire' and an 'observation fire' is elaborated and simulated with the Fire Dynamics Simulator (FDS) software. It is characterized in the context of the building regulations and engineering methods in the area of fire protection. An apartment building in an urban area is the object of interest. As an assumption, an extended basement fire with an open basement door and realistic ventilation opening areas is studied. Respecting various modeling configurations of the fire and flue gas simulation using CFD, an extensive and highly detailed building structure can be implemented.

Based on the functional requirements and quantification of the personal safety protection objective, three meaningful performance and verification criteria are defined. Thermal, toxic, and visual properties of the fire smoke are analyzed based on the procedure of the self-rescue and external rescue phase of the residents. In addition to the investigation of the necessary stairwell, the assessment of the damaging effect of smoke and toxic inhalation by the residents behind a tightly closed apartment door is highly relevant. By developing and implementing a model for the behavior of smoke leakage through tightly closing apartment doors, corresponding times for defensive fire protection can be derived.

The integration of tactical approaches of the fire department into the simulation results in a detailed recreation of the described scenario. For the practical implementation of all relevant aspects, six fire and smoke gas simulations are carried out with varied parameters. Both an uninfluenced development and simulated intervention by the fire department are considered.

The three performance and verification criteria are exceeded in the area of the necessary stairwell in all carried out simulations before the arrival of the emergency forces. By integrating tactical measures, a positive change of the surrounding conditions in the stairwell and apartments can be observed. A focused combination of fire fighting and ventilation measures in the course of the external rescue phase, results in a significant improvement.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Frontansicht (links) und Rückansicht (rechts) des MFH mit Kellerbrand	1
Abbildung 2: Gefahrenmatrix mit Aufgabenpriorisierung –Kellerbrand im MFH.....	4
Abbildung 3: Multiple-Mesh Geometrie mit 5 Meshes	16
Abbildung 4: Einordnung der Rechengitterweiten	22
Abbildung 5: Charakteristischer Brandverlauf des Bemessungsbrandes.....	38
Abbildung 6: Einsatzrelevante Zeiten für den Standardwohnungsbrand in BW	44
Abbildung 7: Operativ-taktischer Kräfte- und Mittelansatz	46
Abbildung 8: Raumordnung der Einsatzstelle bei einem Kellerbrandszenario	48
Abbildung 9: Mesh-Übergang im Untergeschoss des Mehrfamilienhauses.....	59
Abbildung 10: Keller- und Brandraum der FDS-Simulation in SMV	61
Abbildung 11: Treppenraum der FDS-Simulation in SMV.....	62
Abbildung 12: Wohneinheiten der FDS-Simulation in SMV	63
Abbildung 13: Kellerlichtschacht mit Verglasung der FDS-Simulation in SMV	64
Abbildung 14: Stufengeometrie der FDS-Simulation in SMV.....	65
Abbildung 15: Treppenraumöffnungsflächen der FDS-Simulation in SMV	66
Abbildung 16: Modellierungsskizze der taktischen Ventilation.....	69
Abbildung 17: Einsatz der taktischen Ventilation der FDS-Simulation in SMV.....	70
Abbildung 18: Seitenansicht Hauseingangsbereich der FDS-Simulation in SMV.....	70
Abbildung 19: Modellierungsskizze eines dichtschießenden Wohnungsabschlusses	73
Abbildung 20: Frontalansicht Wohnungsabschlussöffnung der FDS-Simulation in SMV	74
Abbildung 21: Einsatz der modellierten Türleckage der FDS-Simulation in SMV	74
Abbildung 22: Ansicht des mobilen Rauchverschlusses der FDS-Simulation in SMV.....	75
Abbildung 23: Isosurface von ≥ 180 °C der FDS-Simulation in SMV	80
Abbildung 24: Slice File – Temperature bei $Y = 1,2$ m der FDS-Simulation in SMV.....	80
Abbildung 25: Carbon Dioxide Density der FDS-Simulation in SMV.	81
Abbildung 26: Soot Optical Density der FDS-Simulation in SMV	82
Abbildung 27: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_1	84
Abbildung 28: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_1..	85
Abbildung 29: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_2	87
Abbildung 30: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_3	88
Abbildung 31: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_3..	89
Abbildung 32: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_4	90
Abbildung 33: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_4..	91
Abbildung 34: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_5	92

Abbildung 35: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_6	93
Abbildung 36: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_6	94
Abbildung 37: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_1, S_3, S_4 und S_6	96
Abbildung 38: Ergebnisdarstellung der Rauchwarnmelder (smoke detector) der Simulationen S_1, S_3, S_4 und S_6	97
Abbildung 39: Ergebnisdarstellung der einsatztaktischen Maßnahmen im TR - S_2	101
Abbildung 40: Ergebnisdarstellung der Einflussnahme von einsatztaktischen Maßnahmen auf die WE EG der Simulationen S_1, S_2, S_4 und S_5	102
Abbildung 41: Charakteristische Brandverlaufphasen der Brand- und Rauchgassimulationen.....	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bauteilanforderungen für die GK 4 nach MBO	10
Tabelle 2: Charakteristische Brandparameter bei der Wohngebäudenutzung.....	19
Tabelle 3: Schutzzieldefinition des Betrachtungsszenarios.....	29
Tabelle 4: Geometrisches Brandausbreitungsmodell – kreisförmige Brandfläche A_{Kreis} ..	35
Tabelle 5: Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten der REAC-Eingaben.....	40
Tabelle 6: Bezeichnungen der Brand- und Rauchgassimulationen	57
Tabelle 7: Netzwerkkonfiguration – Gitterweite, Volumina und Zellenanzahl.....	60
Tabelle 8: Implementierung der LEAK-Kanalquerschnittsflächen	73
Tabelle 9: Überblick der Auswertungssteuerung - Gaseigenschaften.....	76
Tabelle 10: Aktivierungs- und Deaktivierungszeit der einsatztaktischen Maßnahmen	77
Tabelle 11: Übergabeparameter der Mesh-Schnittstelle.....	78
Tabelle 12: Simulationsübergreifende optische Auswertung mit SMV	79
Tabelle 13: Exemplarische Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien.	83

Formelverzeichnis

Formel 1: Massenerhaltungsgleichung	14
Formel 2: Impulserhaltungsgleichung.....	14
Formel 3: Energieerhaltungsgleichung.....	14
Formel 4: Charakteristischer Branddurchmesser D^*	17
Formel 5: Maximale Wärmefreisetzungsrage (brandlastgesteuert) Q	18
Formel 6: Radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit (spread rate) v_{aus}	35
Formel 7: Kreisförmige Brandfläche A_{Kreis}	35
Formel 8: Zeitansatz - Brandentwicklungsphase t_1	36
Formel 9: Brandlast - Entwicklungs- und Vollbrandphase Q_{02}	36
Formel 10: Brandlast - Entwicklungsphase Q_{01}	36
Formel 11: Brandlast - Vollbrandphase Q_{12}	37
Formel 12: Zeitansatz - Entwicklungs- und Vollbrandphase t_2	37
Formel 13: Brandlast - Abklingphase Q_{23}	37
Formel 14: Zeitansatz - Entwicklungs-, Vollbrand- und Abklingphase t_3	37
Formel 15: Brandlast - Entwicklungs-, Vollbrand- und Abklingphase Q_{03}	37
Formel 16: Kreisfläche $A_{Kreis, Lüfter}$ der Überdruckbelüftung	68
Formel 17: Strömungsgeschwindigkeit v_s des Überdruckbelüftungsgeräts	68
Formel 18: Strömungsgeschwindigkeit $v_{s,neu}$ der Überdruckbelüftungsfläche	68
Formel 19: Mach-Zahl Ma der Überdruckbelüftung.....	69

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A_{Brand}	maximale Brandfläche	m^2
A_{Kipp}	gekippte Öffnungsfläche	m^2
A_{Kreis}	kreisförmige Brandfläche	m^2
A_{offen}	freie Öffnungsfläche	m^2
c	Schallgeschwindigkeit	m/s
c_{CO}	Gaskonzentration Kohlenstoffmonoxid	ppm
c_p	spezifische Wärmekapazität	$kJ/kg \cdot K$
D^*	charakteristischer Branddurchmesser	m
D_L	optische Dichte	m^{-1}
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
Ma	Mach-Zahl	-
ρ_∞	Dichte	kg/m^3
q	mittlere Brandbelastung, Brandlastdichte	MJ/m^2
\dot{q}	flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate	MW/m^2
Q_n	Brandlasten der Brandverlaufsphase	MJ
\dot{Q}	maximale Wärmefreisetzungsrate	kW, MW
\dot{Q}_{max}	maximale Wärmefreisetzungsrate	kW, MW
S	Erkennungsweite	m
t_α	charakteristische Brandentwicklungszeit	s
t_n	Zeiten der Brandverlaufsphase	s, min
T_∞	Umgebungstemperatur	$K, ^\circ C$
v_{aus}	radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit	m/s
v_s	Strömungsgeschwindigkeit	m/s
\dot{V}	Volumenstrom	m^3/s
δx	Kantenlänge einer Gitterzelle	m, cm

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
AAO	Alarm- und Ausrückeordnung
AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren
BNDF	Boundary File
BSt	Brandstoff
CFD	Computational Fluid Dynamics
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DEVC	Device
DLK	Drehleiter mit Korb
DNS	Direct Numerical Simulation
EA	Einsatzabschnitt
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve
FDS UG	Fire Dynamics Simulator User's Guide
FDS	Fire Dynamics Simulator
FED	Fractional Effective Dose
FO	Flashover
FPS	Frames Per Second
FüAss	Führungsassistent
FVM	Finite-Volumen-Methode
GK	Gebäudeklasse
HCN	Cyanwasserstoff
HLF	Hilfeleistungslöschgruppenfahrzeug
HRR	Heat Release Rate
HRRPUA	Heat Release Rate Per Unit Area
HVAC	HVAC System Definition
ISOF	Isosurface File
KdoW	Kommandowagen
LBO BW	Landesbauordnung für Baden-Württemberg
LBOAVO	Allgemeine Ausführungsverordnung des Wirtschaftsministeriums zur Landesbauordnung
LES	Large Eddy Simulation
LFS BW	Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg

MBO	Musterbauordnung
MFH	Mehrfamilienhaus
NE	Nutzungseinheit
NIST	National Institute of Standards and Technology
NSG	Navier-Stokes-Gleichung
OBST	Obstruction Parameters
OK FFB	Oberkante Fertigfußboden
PE	Polyethylen
PS	Polystyrol
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PUR	Polyurethan
SEG	Schnelleinsatzgruppe
SLCF	Slice File
SMV	Smokeview
STR	Sicherheitstreppenraum
TR	Treppenraum
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WE	Wohneinheit

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Mit einer Alarmierung zu einem ausgedehnten Kellerbrand in einem Mehrfamilienhaus (MFH) ist den ausrückenden Einsatzkräften bereits auf der Anfahrt bewusst, dass ihnen ein zumeist langwieriger, kräftezehrender und herausfordernder Einsatz bevorsteht. Zu nachtschlafender Zeit ist mit einer Vielzahl an betroffenen und massiv gefährdeten Personen zu rechnen. Der erste Rettungsweg ist womöglich mittlerweile unpassierbar aufgrund von dichtem Raucheintrag in den notwendigen Treppenraum (TR). Einige Personen konnten das Gebäude während der Selbstrettungsphase in letzter Sekunde verlassen. Weitere Personen öffneten ihre Wohnungstür und sorgten so für einen Rauch- und Schadstoffeintrag in die jeweilige Wohneinheit (WE). An Fenstern und Balkonen machen sich einzelne Personen und ganze Familien bemerkbar und erwarten bangend die Hilfe über die Leitern der Feuerwehr. Zuletzt werden außerdem Personen gänzlich vermisst. Aufgrund des voranschreitenden Brandereignisses im Untergeschoss hat sich die Rauchgassituation und die thermische und toxische Ausgangssituation im TR drastisch verschlechtert. Mit einer solchen Diversität an potenziell geschädigten und bedrohten Personen wird die ersteintreffende Feuerwehrführungskraft in der Regel innerhalb weniger Sekunden konfrontiert. Bei einem derartigen Szenario sollte frühzeitig und in aller Konsequenz die Situation erkannt und zielführend bewertet werden. Auch die Anzahl der betroffenen und im weiteren Verlauf geretteten Personen kann überschlagsmäßig schnell abgeschätzt werden. *Abbildung 1* soll dieses Ausgangsszenario beispielhaft abbilden.



Abbildung 1: Frontansicht (links) und Rückansicht (rechts) des MFH mit ausgedehntem Kellerbrand

Um weiterführend aufzuzeigen und zu verdeutlichen, dass es sich bei den eingangs geschilderten Gegebenheiten keinesfalls um fiktive Annahmen oder Behauptungen handelt, können jüngste Vorkommnisse kurz erläutert werden. Im Hamburger Stadtteil Mümmelmannsberg kam es am 3. Oktober 2019 kurz vor 22 Uhr zu einem vergleichbaren Ereignis in einem neugeschossigen Wohnhaus. Den ersteintreffenden Kräften schlugen bereits offene Flammen aus diversen Kellerfenstern entgegen. Die vertikale Rauchausbreitung entlang der Hausfassade aufgrund einer offenstehenden Verbindungstüre in den notwendigen Treppenraum war enorm. Für einen Raucheintrag in die Geschosswohnungen sorgten die Bewohner letztendlich selbst, da diese nachsahen, was im Treppenraum los war und die Wohnungstüren offenließen. Das Alarmstichwort wurde durch die ersteintreffende Führungskraft auf „Feuer 2 – Menschenleben in Gefahr“ erhöht. Als weiterführende Maßnahmen wurden sämtliche Wohnungen auf Rauchfreiheit, die Kohlenmonoxidkonzentration und das Wärmedämmverbundsystem (WDVS) der Fassade kontrolliert.¹

In der Neujahrsnacht von 2020 bei kühlen 4 °C Außentemperatur galt es in Oberhausen (NRW), ein entsprechendes Szenario mit 21 zu rettenden Personen abzuarbeiten. Erwähnenswert bei diesem Einsatz ist die Flutung des Kellerraumes mit Mittelschaum durch einen Lichtschacht und der beobachtete Kamineffekt nach dem Öffnen eines Treppenraumfensters und somit veränderten Ventilationsverhältnissen.² Dieser Effekt tritt zu meist bei ventilationsgesteuerten Bränden mit unterventilierten atmosphärischen Randbedingungen auf. Im weiteren Verlauf der Arbeit und der numerischen strömungsmechanischen Auseinandersetzung wird dieser Effekt einen fortlaufend hohen Stellenwert einnehmen und detailliert betrachtet werden müssen.

Ein letztes und sehr junges Einsatzgeschehen ereignete sich ebenfalls zu nachtschlafender Zeit am 15. September 2020 in der Hansestadt Bremen. Aus einem achtgeschossigen Wohn- und Geschäftsgebäude mit 60 Wohneinheiten (WE) wurden in Summe 54 Personen in Sicherheit gebracht. Aufgrund der äußerst fortgeschrittenen Brandentwicklung gestaltet sich die Brandbekämpfung sehr schwierig und zeitintensiv. Im weiteren Einsatzverlauf wurde das Einsatzstichwort „Massenanfall von Verletzten“ ausgelöst und zahlreiche Rettungsdienstkräfte zur Einsatzstelle entsandt, der Leitende Notarzt sichtete alle Hausbewohner.³

¹ Timmann/Unger 2020: 10f.

² Lange-Hegermann 2020: 501-505

³ Buchenau 2020: o.S.

Die Zielsetzung dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es anhand einer Brandsimulation – *Fire Dynamics Simulator (FDS)* – komplexe Gegebenheiten mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik – englisch *Computational Fluid Dynamics (CFD)* – aufzuzeigen, zu konkretisieren und abschließend belastende und plausibilitätsgeprüfte Aussagen treffen zu können. Reale Gebäudeabmessungen, Anzahl an Geschossen und innere Gliederungen werden möglichst realitätsnah modelliert, um im weiteren Verlauf anhand eines Bemessungsbrandszenarios die Diversität der Rauchgasströmungen zu analysieren. Der Rettungs- und Angriffsweg in einem MFH wird konkreten und funktionalen Anforderungen unterzogen und detailliert betrachtet. Ebenso wird die Personensicherheit in den jeweiligen Wohneinheiten (WE) hinter dichtschießenden Wohnungsabschlusstüren – anhand geltender Nachweiskriterien – eingehend untersucht. Ein Augenmerk wird zudem auf korrespondierende Zeiten des fortschreitenden Brandgeschehens, der damit verbundenen Rauchgasausbreitung und das Intervenieren der Feuerwehreinsatzkräfte gesetzt.

Im weiteren Verlauf dieser Masterarbeit werden konservative Annahmen, Vernachlässigungen und Anwendungsgrenzen festgelegt und aufgezeigt. Dieses Vorgehen ist bei einer solch komplexen Betrachtung und Simulation unumgänglich. Unter der Prämisse der maximalen Transparenz und der Nachvollziehbarkeit erfolgt stets eine Fehlerbetrachtung und eine Plausibilitätsprüfung erfolgen. Die Reproduzierbarkeit der resultierenden Daten und Ergebnisse ist somit stets gewährleistet.

In der Endphase der Masterarbeit soll für die Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg (LFS BW) – Kooperationspartner – neben den inhaltlichen Erkenntnissen ein direkter Mehrwert in Form von wissenschaftlichen Lehr- und Ausbildungsunterlagen generiert werden. Neben der direkten Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Gebäude- und Kellerbrandbekämpfung wird auch die ingenieurwissenschaftliche Herangehensweise an Problem- und Aufgabenstellungen des vorbeugenden Brandschutzes eine wesentliche Rolle spielen (siehe *Anlage 4*).

1.2 Gefahren an der Einsatzstelle

Diese thematische Heranführung bildet bereits eindrucksvoll ein wiederkehrendes Muster derart vergleichbarer Einsatzszenarien ab. Um einen finalen Gesamteindruck der Komplexität des Einsatzes zu erhalten, lohnt es sich bereits an dieser Stelle alle Gefahren mit Hilfe einer Gefahrenmatrix bestmöglich zu identifizieren, um im Folgenden bei der Modellierungs- und Simulationsbetrachtung der Brandsimulation keinerlei Schlussfolgerungen fälschlicherweise zu vernachlässigen oder gänzlich zu unterschlagen. In *Abbildung 2* wird die vollständige Gefahrenmatrix bezüglich des Betrachtungsszenarios schematisch aufgezeigt.

		Gefahrenmatrix								
Menschen, Tiere, Umwelt, Sachwerte, Mannschaft, Gerät ↓		Atemgifte	Angstreaktion	Ausbreitung	Atomare Strahlung	Chemische Stoffe	Erkrankung/Verletzung	Explosion	Elektrizität	Einsturz/Absturz
		A	A	A	A	C	E	E	E	E
1	Bewohner auf Balkon	●	●	●						●
2	Bewohner in WE mit Rauch (bewusstlos)	●		●			●			
3	Bewohner in WE ohne Rauch			●						
4	Geräume/Betroffene Bewohner		●							
5	Sachwerte			●						
	Mannschaft	●		●					●	


 Baden-Württemberg
 LANDESFEUERWEHRSCHULE

Abbildung 2: Gefahrenmatrix nach AAAACEEEE-Schema mit nebenstehender Aufgabenpriorisierung – Betrachtungsszenario Kellerbrand im MFH (LFS BW o.J.: o.S., durch den Autor angepasste Darstellung)

Mögliche Konstellationen der Bewohner im und außerhalb des Gefahrenbereiches, akut gefährdet und potenziell verletzt oder lediglich betroffen und bereits geräumt, wurden bereits geschildert. Die identifizierten Gefahren für diese Personen lassen wenig Spielraum und sind meist eindeutig zu benennen. Die Gefahr des Absturzes von Bewohnern begründet sich aus dem Fehlen einer weiteren Fluchtmöglichkeit. Person im direkten Einwirkungsbereich von massiver Rauchgas- und Brandbelastungen klettern über Brüstungen von Balkonen, aus Fenstern, auf Dachgauben oder Dachvorsprünge. Diese Personen versuchen sich ihrer primären Gefahr – den Atemgiften, durch die Bewohner vielmehr

wahrgenommen als Feuer und Rauch – zu entziehen und nehmen hierfür eine neue Gefahr – die Absturzgefahr – auf sich. In der akuten Erstphase des Einsatzgeschehens sekundär sind die identifizierten Gefahren für die Sachwerte und die Mannschaft. Keinesfalls sollten diese Gefahren vernachlässigt oder für nichtig erklärt werden, die eingesetzten Interventionskräfte bereiten sich bereits auf der Anfahrt auf einige Gefahren vor. Sie legen die vollständige Persönliche Schutzausrüstung (PSA) und umluftunabhängige Atemschutzgeräte an, um sich vor Atemgiften zu schützen. Die physischen und psychischen Belastungen der zur Brandbekämpfung eingesetzten Einsatzkräfte ist enorm. Extreme Brandtemperaturen, pulsierendes und unkontrolliertes Brandverhalten und Rauchgasdurchzündungen sind nur einige Herausforderungen der vorgehenden Einsatzkräfte. Da ein unterventilierter Kellerbrand oft einhergeht mit dichtem, lichtundurchdringbarem Brandrauch durch anfallende unverbrannte Pyrolysegase, ist mit einer sogenannten Nullsicht auf dem Anmarschweg zum Brandereignis zu rechnen. Diese Kombination aus maximal ungünstigen Gegebenheiten führt nicht selten zu überlasteten, völlig erschöpften und im schlechtesten Fall zu verletzten Einsatzkräften. Selten resultiert hieraus ein Atemschutznotfall. Abschließend zur einleitenden Betrachtung der Gefahrenmatrix ist die Gefahr des Einsturzes, der Elektrizität und der Explosion als Schädigung auf die Mannschaft zu konkretisieren. Die beiden erstgenannten Gefahren resultieren aus der hohen thermischen Beanspruchung durch Wärmestrahlung und Konvektion. Punktuelle Tragwerkschäden durch Betonabplatzungen aufgrund intensiver Brandbeaufschlagung sorgen zwar in der Regel nicht für einen Verlust der Gesamtgebäudestatik, wohl aber für eine massive Gefährdung der Einsatzkräfte. „Aufputz“ verlegte elektrische Installationen und weitere Hausanschlüsse, beispielsweise für die Gasversorgung, halten der thermischen Aufbereitung des Brandgeschehens nicht lange stand und sorgen so für eine zusätzliche Gefährdung. Zudem kann das Risiko durch weitere – meist explosionsgefährliche und brandfördernde – Gefahrstoffe in einzelnen Kellerverschlägen gravierend ansteigen. Beispiele hierfür sind kleinere Druckgasbehälter, größere Camping- und Flüssiggasflaschen, aber auch diverse Verdünnungsmittel sowie Öle, Fette und Farben.

Dieser umfassende Einstieg mit Nennung sämtlicher Gefahrenschwerpunkte wurde bewusst gewählt und dient der Vertiefung und Erörterung der Ausgangsbetrachtung aus Sicht des abwehrenden Brandschutzes und der Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Aus diesem geschilderten Szenario ergeben sich nun diverse, komplex verknüpfte Fragestellungen in Bezug auf die Personensicherheit in den Geschosswohnungen, das Selbst- und Fremdrettungsverhalten und die einsatztaktische Vorgehensweise der eintreffenden Rettungskräfte.

2 Ingenieurmethoden im Brandschutz

2.1 Anwendungsfeld

Die Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden und deren Nachweisführung hat in den vergangenen Jahren enormen Zuspruch erlangt und ist heutzutage der praktizierte Standard. Die Anwendbarkeit dieser ingenieurtechnischen Verfahren auf Basis wissenschaftlicher Grundsätze dient hierbei dem Entwurf und der Bemessung von baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen. Hierfür werden bestimmte Brandszenarien untersucht und durch die Quantifizierung des Risikos bemessen.⁴ Neben der argumentativen ingenieurmäßigen Brandschutzbemessung mit der Zielsetzung einer unmittelbaren Akzeptanzfindung wird der leistungsbezogenen Nachweisführung ein zunehmend gehobener Stellenwert in einem objektspezifischen Brandschutzkonzept zugeschrieben. Ein vollumfängliches Brandschutzkonzept für komplexe Bauten – außerhalb der geregelten Sonderbautatbestände und dem „klassischen“ Regelbau – beinhaltet zumeist einen iterativen Prozess, eine leistungsbezogene/schutzzielorientierte Nachweisführung. Es erfolgt eine ingenieurmäßige Auseinandersetzung mit den Schutzziele des Brandschutzes – § 14 nach Musterbauordnung (MBO) oder § 15 nach Landesbauordnung für Baden-Württemberg (LBO BW) – entsprechend der eingeführten und länderspezifischen Bauordnungen, Verordnungen und Richtlinien. Die Abweichung von präskriptiven Regelwerken und der Nichtumsetzung von materiellen Anforderungen des Baurechts führt vermehrt zu den Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Die Diversität in der Anwendbarkeit von Ingenieurmethoden ist groß und reicht von der Standsicherheit über die Personensicherheit bis hin zu wirksamen Brandbekämpfungsmaßnahmen.

Die folgende Auflistung nennt exemplarisch weitere Aspekte:

- Kompensation von Abweichungen,
- Begründung von Erleichterungen,
- abweichende Bemessung von Rauchschutzmaßnahmen,
- Forderung im Rahmen des Bauordnungsrechts ohne materielle Konkretisierung,
- brandschutztechnische Bewertung von unterirdischen Verkehrsanlagen (Eisenbahn- und Straßenbahn-Anlagen)
- spezielle Anwendungen: Simulation von Vegetationsbränden, Brandursachenermittlung und Brandschutzforschung.⁵

⁴ DIN 2016: 7

⁵ Osburg 2020: 7

Differenziert werden die Ingenieurmethoden abschließend in zwei Analyseformen und Vorgehensweisen. Unter der Festlegung der brandschutztechnischen Randbedingungen, der Nutzung des Gebäudes, repräsentativer Brandszenarien und weiterer Schutzziele versteht man die qualitative Analyse. Die zweckmäßige Zielsetzung grundsätzlicher Lösungsmöglichkeiten und die gemeinsame – aller am Bau Beteiligten – Verständigung und Einigung auf zuvor genannte Punkte muss herbeigeführt werden.⁶ Mit der Erstellung einer quantitativen Analyse werden verschiedene Teilprobleme auf Basis der qualitativen Analyse untersucht. Die Verantwortung liegt hierbei beim Brandschutzingenieur. Angemessene Nachweise bezüglich des Entrauchungskonzeptes, des Entfluchtungskonzeptes, der Personensicherheit und des Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen und Tragwerken können so realisiert werden.⁷

Die Grundlage für die Brandschutzingenieurmethoden liefert seit Jahren der „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), herausgegeben von Jochen Zehfuß. Mit der vierten überarbeiteten und ergänzten Auflage, welche im März 2020 erschien, werden Anwendungshilfen für Tätigkeitsfelder geliefert und Vorgehensweisen detailliert geschildert. Es werden aber auch Anwendungsgrenzen hervorgehoben, welche es stets in der Umsetzungsphase zu beachten gilt. Dieser Leitfaden spiegelt die Projektbearbeitung und den realen Ablauf ingenieurtechnischer Verfahren wider.⁸ Unter Zuhilfenahme der sogenannten „Eurocodes“ erhält man einen Pool an Möglichkeiten, um eine Einbettung und Wichtung in einem objektspezifischen und leistungsorientierten Brandschutzkonzept zu realisieren.

2.2 Rauchgasberechnungen

Auf Grundlage von Rauchgasberechnungen lassen sich sowohl globale als auch lokale Aussagen treffen und Ergebnisse ableiten. Konvektionsströmungen, thermodynamische Prozesse sowie strömungsmechanische Zusammensetzung spielen eine wesentliche Rolle und machen das Themenfeld nicht weniger komplex.

⁶ Zehfuß 2020: 15

⁷ Zehfuß 2020: 17

⁸ Zehfuß 2020: 11

In erster Näherung können Handrechenverfahren angewendet werden, um lokal begrenzte Aussagen einer Nutzungseinheit (NE) zu erhalten. Erwähnenswerte Verfahren sind die Berechnung der Plumetemperaturen, die Berechnung des Ceiling-Jets zur Bestimmung des Auslösezeitpunktes eines Sprinklers oder die Überprüfung des Flashover-Kriteriums. Verhältnismäßig trivial gestaltet sich die Bemessung zur Überprüfung eines ventilationsgesteuerten- oder brandlastgesteuerten Brandes. Nach der Festlegung eines Bemessungsbrandszenarios mit bereits aufgeführt methodischen Möglichkeiten, können weiterführende Räumungsmodelle zur Bestimmung der Fluchtzeit während der Selbstrettungsphase und detaillierte Kalkulationen bezüglich der Personensicherheit betrachtet werden. Eine detaillierte und feine Gliederung der zu erhebenden Parameter bezüglich der Personensicherheit wird in dieser Arbeit einen hohen Stellenwert einnehmen. Hierunter zählen die lichttrübende Wirkung des Rauches, die optische Dichte oder die Expositionsdauer bis zur Handlungsunfähigkeit – *Fractional Effective Dose* (FED) –, die Erkennungsweiten und die Rauchausbeuten.⁹ Den Höhepunkt der anwendbaren Handrechenverfahren stellt das vereinfachte Naturbrandmodell nach DIN EN 1991-1-2/NA mit all seinen Komplexitäten dar.¹⁰

Als weiterführende Instanz kann die Anwendung von Brand- und Rauchgassimulationen aufgeführt werden. Die beiden Modelle und das Hauptanwendungsfeld bilden die Grundlage für das nötige Verständnis im weiterführenden Verlauf dieser Arbeit. Das Zonenmodell unterscheidet zwischen der Heißgas- oder Rauchgassicht (*Hot layer*) und der darunter liegenden Kaltgas- oder raucharmen Sicht (*Cold layer*).¹¹ Aufgrund der homogenen Bedingungen in den jeweiligen Schichtungen sind lediglich globale Aussagen und Ergebnisse ableitbar. Zudem ist das Anwendungsfeld auf einfache Geometrien und Strömungsverhältnisse ausgelegt. Beim Einsatz von Feldmodellen können hingegen lokale Effekte und Ergebnisse berücksichtigt werden. Mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik sind so detaillierte Aussagen bei aufwändigen Geometrien und komplexen Strömungsverhältnissen möglich. Die Turbulenzmodellierung unter Einhaltung sämtlicher Fundamental- und Erhaltungsgleichungen wird im weiteren Verlauf gesondert betrachtet.

⁹ Zehfuß 2020: 317

¹⁰ DIN 2015: o.S.

¹¹ Hurley 2016: 462

3 Bauordnungsrechtliche Gebäudeeinstufung

Bei dem Betrachtungsszenario handelt es sich um ein einfach aufgebautes Mehrfamilienhaus (MFH). Diese Gebäudeform ist im urbanen, innerstädtischen Bereich, aber auch in Vorstadtgebieten eine weit verbreitete Wohnform. Die Objekte sind freistehend oder im Verbund mit weiteren – zumeist baugleichen – Häusern anzutreffen. Die umfassende bauordnungsrechtliche Einordnung kann den eingeführten und geltenden Landesbauordnungen entnommen werden. Weiterführend dienen die Landesbauordnung für Baden-Württemberg¹² (LBO BW) und die Musterbauordnung¹³ (MBO) als Grundlage. Das Bauordnungsrecht sieht für derartige Bauten die Gebäudeklasse 3 (GK 3) oder die Gebäudeklasse 4 (GK 4) vor. Sowohl die MBO als auch die LBO BW sehen für die GK 3 lediglich Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m vor.¹⁴ Da man bei dieser Höhe von lediglich drei Vollgeschossen ausgeht und die Erkenntnisse dieser Gebäudehöhe bereits in der Betrachtung der GK 4 durch eine Zunahme der Geschossigkeit inkludiert sind, wird in dieser Arbeit ein Objekt der GK 4 betrachtet. Es handelt sich um Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m – Oberkante Fußboden (OK FFB) des höchsten Geschosses, in dem Aufenthaltsräume möglich sind, in der Regel des Dachgeschosses – und Nutzungseinheiten (NE) mit jeweils nicht mehr als 400 m².¹⁵ Ein Sonderbautatbestand nach § 2 Abs. 4 der MBO ist zumeist bei derartigen Regelbauten nicht gegeben.¹⁶ Eine weiterführende bauordnungsrechtliche Bewertung und Zuordnung nach länderspezifisch eingeführten Verordnungen und Richtlinien ist demnach nicht nötig. Die Ausführung der Rettungswegführung aus den NE unterscheidet sich lediglich durch die gewählte Ausformulierung, nicht aber inhaltlich von § 15 der LBO BW zu § 33 der MBO.^{17,18} Grundsätzlich sind NE, welche nicht ebenerdig liegen, über einen notwendigen TR als ersten Rettungsweg zu entfluchten. Der zweite Rettungsweg kann baulich ebenfalls als notwendiger Treppenraum ausgelegt sein oder über Rettungsgeräte der Feuerwehr – tragbare Rettungsgeräte oder Hubrettungsfahrzeuge – realisiert werden. Dieser zweite Rettungsweg kann lediglich durch einen Sicherheitstrepfenraum (STR) kompensiert werden. Bei Bauten mit mehr als 60 m Höhe müssen hingegen alle vertikalen Rettungswege als STR ausgebildet sein.¹⁹

¹² LBO BW 2010: o.S.

¹³ MBO 2002: o.S.

¹⁴ LBO BW 2010: 7

¹⁵ MBO 2002: 6

¹⁶ MBO 2002: 6f.

¹⁷ LBO BW 2010: 11

¹⁸ MBO 2002: 28

¹⁹ MHHR 2008: 4

Die Definition eines Kellergeschosses ist nach MBO (§ 2 Abs. 6) und LBO BW (§ 2 Abs. 5) identisch geregelt und formuliert. Demnach zählen sämtliche Geschosse mit einer Deckenoberkante im Mittel von weniger als 1,4 m über der Geländeoberfläche als Kellergeschoss. In der Allgemeinen Ausführungsverordnung des Wirtschaftsministeriums zur Landesbauordnung²⁰ (LBOAVO) und der MBO wird je Kellergeschoss noch mindestens eine Öffnung ins Freie gefordert, über welche die Rauchableitung gewährleistet sein muss. Abschließend ist noch die einheitliche Rettungsweglänge von jeder Stelle eines Aufenthaltsraumes sowie eines Kellergeschosses reglementiert. Die Entfernung bis zu einem notwendigen TR oder ins Freie darf höchstens 35 m betragen.^{21,22} Die bauordnungsrechtlichen Öffnungsanforderungen sehen vor, dass zwischen dem Brandgeschehen und den einzelnen zu betrachtenden WE zwei Öffnungsverschlüsse, welche in den notwendigen TR münden, liegen müssen. Die Wohnungsabschlüsse müssen mindestens dichtschießend ausgeführt sein. Bei der Kellerabschlussöffnung hingegen muss es sich mindestens um eine feuerhemmende, rauchdichte und selbstschließende Türe (T 30 RS) handeln.²³

Weitere Bauteilanforderungen der GK 4 sind nachfolgend in tabellarischer Form in *Tabelle 1* aufgelistet:

Tabelle 1: Bauteilanforderungen für die GK 4 nach MBO (MBO 2002: 20-28)

Bauteile	Anforderung
Tragende und aussteifende Bauteile	hochfeuerhemmend, F 60 AB, R 60
Geschossdecken	hochfeuerhemmend, F 60 AB, REI 60
Brandwände	feuerbeständig, F 90 A-M, (R)EIM 90
Trennwände	hochfeuerhemmend, F 60 AB, EI 90
Treppenraumwände	hochfeuerhemmend, F 60 A-M, (R)EIM 90

²⁰ LBOAVO 2010: o.S.

²¹ MBO 2002: 30

²² LBOAVO 2010: 10

²³ LBOAVO 2010: 11

4 Brand- und Rauchgassimulation mit FDS

4.1 Erklärung und Haftungsausschluss

Die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Brand- und Rauchgassimulationen stellen ein Bemessungsbrandszenario unter idealisierten Rahmenbedingungen dar. Im Hinblick auf die Umsetzbarkeit mussten Annahmen und Erleichterungen getroffen werden. Diese werden permanent auf Plausibilität überprüft und stets kritisch hinterfragt und bewertet. Derartige Brandszenarien unter den gegebenen Laborbedingungen werden im Realbrandgeschehen kaum anzutreffen sein. Als ableitbar und äußerst gewinnbringend stellen sich jedoch die komplexen Zusammenhänge zwischen Strömungsregimen, Temperaturverläufen und Stickoxidanteilen dar. Durch geringen Transferaufwand kann also ein reales Einsatzszenario abgebildet werden.

In diesem Zusammenhang weist der Autor auf den Haftungsausschluss bezüglich der in dieser Arbeit gewonnenen Simulationsergebnisse und deren Interpretation durch Dritte hin. Es wird keine Garantie und Verantwortung für deren weitere Verwendung übernommen. Dies schließt die Angemessenheit der Weiterverwendung und die Schlussfolgerung aus Ergebnissen mit ein. Der Autor beruft sich zudem auf den Haftungsausschluss (Disclaimer) im *FDS User's Guide* (FDS UG) berufen.²⁴

Bei dem verwendeten Softwarepaket handelt es sich um FDS 6.7.5 und SMV 6.7.15.

²⁴ McGratten et al. 2020a: 13

4.2 Grundlagen der Brandsimulation

Die grundlegende Vorgehensweise einer Brandsimulation basiert auf einer wissenschaftlichen Betrachtung eines zu untersuchenden Objektes. Dieses wird in verhältnismäßiger Analogie zum Originalobjekt gesetzt und tiefgehender untersucht und bewertet. Eine Durchführung von Realbrand- und Rauchgasuntersuchungen am Originalobjekt ist meist zu diesem Zeitpunkt des Baufortschrittes keine Option mehr. Etwaige Realversuche am Objekt stellen sich meist als zu aufwendig und kostenintensiv dar und scheiden letztendlich unter der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen aus. Kleine Rauchgasuntersuchungen oder Versuchsnachbauten im verkleinerten Maßstab sind dagegen die gängige Praxis und dienen nicht selten als Validierungsmöglichkeit für Brandsimulationen. Unter der Einhaltung von Fundamental- und Erhaltungsgleichungen kann die Nach- und Abbildung der Realität modelliert und simuliert werden. Bestehende Naturgesetze, die Hauptsätze der Thermodynamik und komplexe Strömungsregime haben stets Bestand und es gilt, diese korrekt anzuwenden und zu deuten. Modellspezifische Näherungen, Vereinfachungen und Annahmen sind hierbei unausweichlich.²⁵

Mit dem im Laufe dieser Arbeit simulierten Modell sollen neue Informationen über das Originalobjekt MFH eingeholt werden können. Es werden komplexe Zusammenhänge aufgedeckt und erläutert. Hierunter zählen exemplarisch die zeitliche Entwicklung bedeutender Brandparameter und der Wärmefreisetzungsrates. Zudem sollen weitere Eigenschaften und Hypothesen am Originalobjekt überprüft und aufgezeigt werden. Die Ermittlung derartiger Daten wäre an einem bewohnten Bestandsgebäude nicht realisierbar.

²⁵ Zehfuß 2020: 93

4.3 Modellauswahl und Erhaltungsgleichungen

Bei *Fire Dynamics Simulator* (FDS) handelt es sich um ein Werkzeug zur ingenieurmäßigen, leistungsbezogenen und schutzzielorientierten Nachweisführung. Dieses Feldmodell basiert auf der numerischen Strömungsmechanik, es handelt sich um ein *Computational Fluid Dynamics* (CFD)–Modell. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den brandinduzierten Strömungen, wie dem Rauch- und Wärmetransport. FDS wurde am *National Institute of Standards and Technology* (NIST) entwickelt und im Jahr 2000 erstmalig veröffentlicht. Seitdem entwickelt das NIST die Software fortlaufend weiter und sorgt für eine bedingungslose und kostenfreie Zugänglichkeit. Diverse weitere Vorzüge von Feldmodellen wurden bereits in Kapitel 2.2 *Rauchgasberechnungen* erläutert.

Die Fundamental- und Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik – Masse, Impuls und Energie – und die Stoffkomponenten dienen als Grundlage der Feldmodellentwicklung. Hierbei löst die Numerik die bestehende Komplexität der Brandsimulation auf. Explizit bedeutet dies die Diskretisierung bzw. Zerlegung des Netzes in eine hinreichende Anzahl kleinerer Gitterzellen. Dieses numerische Verfahren basiert auf den partiellen Differenzialgleichungen und sorgt für eine endliche Menge an zu berechnenden Punkten. Wechselbeziehungen werden nicht in unendlich beliebiger Anordnung berechnet, sondern lediglich zwischen ausgewählten Punkten innerhalb der Gitterzellen.²⁶ Moderne CFD-Programme lösen die nachfolgenden fünf Erhaltungsgleichungen, um die Strömung von Gasen oder Fluiden zu bestimmen.²⁷

- Massenerhaltung
- Impulserhaltung in x-Richtung
- Impulserhaltung in y-Richtung
- Impulserhaltung in z-Richtung
- Energieerhaltung

Die Diskretisierung erfolgt hierbei unter Zuhilfenahme der Finite-Volumen-Methode – englisch *Finite Volume Method* – (FVM). Die fundamentalen Erhaltungsgleichungen werden anhand der Integralform unter Berücksichtigung zeitlicher Änderung der Strömungsgröße im Kontrollvolumen betrachtet. Diese Modifikation entspricht der Änderung der Flüsse durch die Kontrolloberfläche. Diese Form der Diskretisierung ist besonders für unstetige Verläufe, wie beispielsweise bei einem Verdichtungsstoß, geeignet.²⁸

²⁶ Wierse 2020: o.S.

²⁷ Lecheler 2011: 8

²⁸ Lecheler 2011: 8

Anhand der fünf aufgelisteten Erhaltungsgleichungsformen, welche in die vollständige Navier-Stokes-Gleichung (NSG) einfließen, kann eine Strömung vollständig mit den kleinsten Wirbeln und Turbulenzen beschrieben werden.²⁹

Die Massenerhaltungsgleichung wird in der Integralform für die FVM angegeben mit³⁰

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho * dV + \iint_S \rho * \vec{u} * dS = 0 \quad (1)$$

Für die Impulserhaltungsgleichung gilt fundamental das zweite Newtonsche Gesetz, Kraft gleich Masse mal Beschleunigung. Spezifiziert für höhere strömungsmechanische und thermodynamische Prozesse gilt folgende Erhaltungsgleichung³¹

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla * (\rho u u) = -\nabla p + f + \nabla * \tau \quad (2)$$

Für die Energieerhaltungsgleichung gilt der erste Hauptsatz der Thermodynamik³²

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Für turbulente Strömungen ist die Rechenzeit der vollständigen NSG extrem groß und von CFD-Programmen (noch) nicht leistbar. Um letztendlich zu akzeptablen Rechenzeiten zu gelangen, basieren heutige CFD-Modelle auf der Reynolds-gemittelten NSG, wobei kleinere Turbulenzen und Wirbel nicht gelöst, sondern modelliert werden.³³ Realisiert wird dies in FDS mit der Large Eddy Simulation (LES). Diese Grobstruktursimulation löst größere, energiegetragene Wirbel direkt unter Zuhilfenahme der NSG. Kleinere Wirbel werden modelliert und so vereinfacht und angenähert abgebildet. Diese Übergangslösung ist zwingenderweise mit dem Generieren von Ungenauigkeiten und Fehlern verbunden, die es mit Hilfe der Numerik zu bemessen und begrenzen gilt. An jedem Gitternetzpunkt können so die Ergebnisgrößen zu jedem beliebigen Zeitpunkt abgegriffen werden.

Bei der Wahl des Turbulenzmodells müssen stets der Aufwand und die Modellgüte ins Verhältnis zueinander gesetzt werden. Lediglich die detaillierte direkte numerische Simulation – englisch *Direct Numerical Simulation* (DNS) – liefert eine Zunahme an Genauigkeit, verbunden mit einem erhöhten Rechenaufwand im direkten Vergleich zur LES.³⁴

²⁹ Lecheler 2011: 17

³⁰ Lecheler 2011: 10

³¹ Hurley 2016: 1036

³² Hurley 2016: 64

³³ Lecheler 2011: 30

³⁴ Zehfuß 2020: 113

Als Visualisierungs- und Kontrolltool dient die zugehörige und ebenfalls vom NIST entwickelte Software *Smokeview* (SMV). Hiermit können neben den Rechengittern (*MESH*) und Raumgeometrien (*OBST*) auch zweidimensionale Auswertebenen (*SLCF*), Wandeigenschaften (*BNDF*) und animierte Flächen mit identischen Eigenschaften (*ISOF*) grafisch und nutzerfreundlich aufbereitet werden. Aus den sogenannten Einzelpunktauswertungen (*DEVC*) können diverse Auswertungsergebnisse generiert und tabellarisch abgebildet werden.³⁵ Diese Messsensoren lassen Rückschlüsse auf die Höhe der raucharmen Schicht, die Qualität der raucharmen Schicht und die thermischen Einwirkungen zu. Diese enorme Datenmenge wird automatisiert mit Beginn der Simulation in einer Excel-Datei angelegt. Das Input-File (mit der Endung *.fds*) wird mit der Benutzeroberfläche von *Notepad++* formatiert. Grundsätzlich ist jede Befehlszeile identisch aufgebaut und folgt einem wiederkehrenden Schema:

&Befehl Parameter/ Kommentar

³⁵ Wallasch/Stock 2008: 42-45

4.4 Die Netzkonfiguration

Zur Bestimmung und Umsetzung der geometrischen Gegebenheiten gilt es nun, die Netzwerkstruktur zu definieren. In diesen rechnerisch ermittelten Quader- und Zellenanordnungen herrschen homogene Bedingungen, welche es mittels Sensitivitätsstudie zu ermitteln gilt. Es wird mit einer relativ groben Maschenanordnung begonnen. Diese wird dann im weiteren Verlauf schrittweise verfeinert, bis keine nennenswerten Unterschiede in den sinngemäßen Übergabeparametern mehr festzustellen sind. Als der Grundsatz der Gittergenerierung gilt: Je feinmaschiger und höher die Gitterauflösung und Anzahl der Gitterzellen, desto genauer ist das Simulationsergebnis und desto länger ist die resultierende Rechenzeit.³⁶ Letztlich ist es ein Kompromissfindungsprozess zwischen der benötigten Genauigkeit von Ergebnissen, den geometrischen Randbedingungen und der Netzempfindlichkeitsstudie. Exemplarisch kann hier Bezug auf die mathematischen Abhängigkeiten eines Vielfachen der Gitterweite zu sämtlichen Bemaßungen von Objekten innerhalb der Simulation genommen werden. Unabhängig vom Stabilitätskriterium sollte es vermieden werden, Mesh-Grenzen dort zu setzen, wo kritische Aktionen wie Brandgeschehen und Brandausbreitung zu erwarten sind. Vermieden werden sollte folglich die Überlagerung von komplizierten Phänomenen mit Maschengrenzflächen. Der Informationsaustausch über Maschengrenzen hinweg ist qualitativ noch nicht so genau und hochwertig wie der Austausch von Zelle zu Zelle innerhalb eines Meshes.³⁷ Diesbezüglich muss ebenfalls eine Abwägung zwischen Schnittstellenproblematiken mit potenziellen Informationsverlusten – Multiple-Mesh – oder einer globalen Berechnungsgitter-Gestaltung getroffen werden. Letzteres überspannt großflächige Geometrien und sorgt so für einen enormen Berechnungstotraum. Mit der nachfolgenden *Abbildung 3* soll eine Multiple-Mesh Geometrie verdeutlicht dargestellt werden.

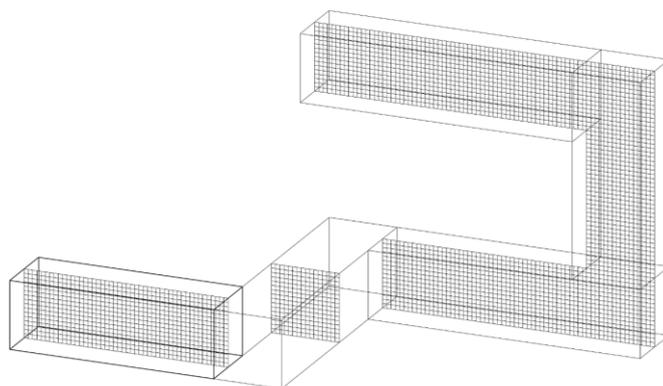


Abbildung 3: Multiple-Mesh Geometrie mit 5 Meshes (McGratten et al. 2020a: 39). Die schwarzen Linien repräsentieren die Mesh-Grenzen, nur die zentrale Ebene jedes Meshes ist grau schattiert.

³⁶ Osburg 2020: 21

³⁷ McGratten et al. 2020a: 40ff.

4.5 Bestimmung der Rechengitterweite

Die Konstellation zwischen der theoretischen Netzkonfiguration und den auftriebsbehafteten Konvektionsströmungen mündet in die anwendungsbezogene Umsetzbarkeit der Netzauflösung. Als Hilfsmittel kann der dimensionslose Ausdruck $D^*/\delta x$ für die Bestimmung der Kontrollvolumina verwendet werden. Bei δx handelt es sich um die nominale Kantenlänge einer quadratischen Gitterzelle. D^* hingegen ist der charakteristische Branddurchmesser in der Einheit Meter. Mit *Formel 4* kann D^* rechnerisch ermittelt werden.³⁸

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4)$$

Bei den im Nenner befindlichen Formelzeichen handelt es sich um Standardwerte, sowohl für die Simulationsbetrachtung als auch für ingenieurmäßige Handrechenverfahren. Es handelt sich hierbei um die Dichte $\rho_\infty = 1,2041 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und die spezifische Wärmekapazität $c_p = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ von Luftsauerstoff (trocken), welche zurückzuführen sind auf die Umgebungstemperatur von $T_\infty = 293,15 \text{ K} = 20 \text{ °C}$. Die Erdbeschleunigung wird mit $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ angenommen. Im Zähler mit dem Formelzeichen \dot{Q} steht die maximale Wärmefreisetzungsrates – englisch *Heat Release Rate* (HRR) – in der Einheit Kilowatt.

Die maximale Wärmefreisetzungsrates ist zwangsläufig vom zu betrachtenden Brandereignis abhängig. Es muss rechnerisch – zum Beispiel unter der Zuhilfenahme von Handrechenverfahren – das Brandverhalten untersucht werden, um zu prüfen, ob ein brandlast- oder ventilationsgesteuerter Brand vorliegt. Ein brandlastgesteuerter Brand ist in der Wärmefreisetzung durch die zur Verfügung stehenden brennenden Oberflächen der Brandlast begrenzt. Bei einem ventilationsgesteuerten Brand hingegen ist die zur Verfügung stehende Verbrennungsluft gemessen an den vorhandenen Brandstoffen nicht ausreichend. Es handelt sich folglich um unterschiedliche limitierende Faktoren der Wärmefreisetzung. Die Abbrandrate limitiert den brandlastgesteuerten Brand und der Luft- und Sauerstoffzustrom das ventilationsgesteuerte Brandgeschehen. Folglich ergeben sich abweichende Brandverlaufsphasen beim Auftragen der Wärmefreisetzungsrates über die Zeit. Bei einem ventilationsgesteuerten Brand ist allgemein von einer geringeren maximalen Wärmefreisetzungsrates als bei einem brandlastgesteuerten Brand auszugehen.³⁹

³⁸ McGratten et al. 2020a: 13

³⁹ Zehfuß 2020: 62ff.

Eingangs wurden bereits ausführlich etwaige Ventilationsverhältnisse in einem Keller erläutert. Anzutreffen in einem geschlossenen Kellerraum wäre zweifelsfrei ein stark unterventilierter Brand. Folgerichtig wäre das gesamte Brandgeschehen ventilationsgesteuert. Für eine erste Betrachtung wird als Vereinfachung und Annahme dem Brand im Kellergeschoss ein brandlastgesteuertes Verhalten unterstellt. Dies hat mehrere Gründe, denn zum einen müssen vorhandene und bereits validierte Branddaten zur Bestimmung der Gitterweite verwendet werden, zum anderen steht dem ausgedehnten Kellerbrand im Betrachtungsszenario neben dem Keller- und Brandraumvolumen auch das gesamte Treppenraumvolumen und eine weitere Zu- und Abluftöffnung als Lichtschacht zur Verfügung. Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Masterarbeit wird ein brandlastgesteuerter Brand im Keller als konservative Annahme gefördert. In Bezug auf die Gitternetzgenerierung wird die Hypothese des brandlastgesteuerten Brandes im weiteren Verlauf der Arbeit mittels Handrechenverfahren bezüglich eines ventilationsgesteuerten Brandgeschehens und der tatsächlichen maximalen Wärmefreisetzungsrate hinterfragt und geprüft. Die maximale Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} bei einem brandlastgesteuerten Verhalten ergibt sich aus *Formel 5* zu⁴⁰

$$\dot{Q} = \dot{q} * A_{Brand} \quad (5)$$

Für den Kellerbrand wird eine Brandfläche von $A_{Brand} = 4,2 \text{ m} \times 4,2 \text{ m} = 17,64 \text{ m}^2$ angenommen. Dies entspricht in etwa einem Fünftel der Kellergrundfläche von $83,52 \text{ m}^2$. Zu Ermittlung der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate \dot{q} wird sowohl der Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes⁴¹, als auch die DIN EN 1991-1-2-NA⁴² betrachtet (abgebildet in der *Tabelle 2*).

⁴⁰ DIN 2015: 22

⁴¹ Zehfuß 2020: o.S.

⁴² DIN 2015: o.S.

Tabelle 2: Charakteristische Brandparameter bei der Wohngebäudenutzung

Nutzung	\dot{q} MW/m ²	q MJ/m ²	t_α s	Literatur
Wohngebäude	0,25	-	300 mittel	DIN 2015: 22
Wohnraum	0,25 / 0,31	780 / 1085	300 mittel	Zehfuß 2020: 79
Wohnungskeller	-	900	-	Zehfuß 2020: 89

Auf die Deutung und Interpretation von weiteren Nutzungen – wie beispielsweise Bürogebäude, Hotelzimmer, Verkaufs- oder Versammlungsstätten – wurde bewusst verzichtet. Eine verifizierte und auch validierte Datenlage bezüglich eines derartigen Kellerbrandszenarios ist in wissenschaftlichen und normativen Dokumenten^{43,44,45} lediglich mäßig vorhanden. Eine weiterführende Bewertung von grauer Literatur schied auf Grund der fehlenden Möglichkeit einer Plausibilitätsprüfung aus. Die getroffenen Annahmen ergeben sich aus den rechnerisch gemittelten Daten der *Tabelle 2*.

- $\dot{q} = 0,28 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$
- $q = 932,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$
- $t_\alpha = 300 \text{ s}$

Mit der bestimmten spezifischen Wärmefreisetzung $\dot{q} = 0,28 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$ und Brandfläche $A_{\text{Brand}} = 17,64 \text{ m}^2$ kann nun unter Zuhilfenahme der *Formel 5* die maximale brandlastgesteuerte Wärmefreisetzungsrate ermittelt werden:

$$\dot{Q} = 0,28 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} * 17,64 \text{ m}^2 = 4,939 \text{ MW} = 4939 \text{ kW}$$

Die bei einem ventilationsgesteuerten Brand entstehende maximale Wärmefreisetzungsrate würde unterhalb dieses rechnerisch ermittelten Wertes liegen. Eine detailliertere Erklärung erfolgt in Kapitel 6.3 *Festlegung der Brandverlaufphasen* und in *Anlage 2: Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände nach DIN EN 1991-1-2/NA – Anhang AA und BB*.

⁴³ DIN 2015: o.S.

⁴⁴ DIN 2016: o.S.

⁴⁵ Zehfuß 2020: o.S.

Da hiermit nun alle relevanten Kenngrößen für die *Formel 4* bekannt sind, kann der charakteristische Branddurchmesser D^* bestimmt werden:

$$D^* = \left(\frac{4939 \text{ kW}}{1,2041 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 293,15 \text{ K} * \sqrt{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} \right)^{\frac{2}{5}} = 1,816 \text{ m}$$

Als Beurteilungsgrundlage für den dimensionslosen Ausdruck $D^*/\delta x$ kann der *FDS – Technical Reference Guide Volume 3: Validation* aufgeführt werden.⁴⁶ Auf Seite 132 befindet sich eine Auslistung bezüglich der durchgeführten Testserie mit entsprechenden $D^*/\delta x$ – Kenngrößen. Generiert aus diesen Daten kann folgende Unterteilung aufgestellt werden:⁴⁷

$$\text{grob: } D^*/\delta x = 4$$

$$\text{mäßig: } D^*/\delta x = 10$$

$$\text{fein: } D^*/\delta x = 16$$

Auf dieser Grundlage kann nun der charakteristische Branddurchmesser D^* eingesetzt werden und die Formel bezüglich der Auflösung grob, mäßig und fein umgestellt werden. Das Ergebnis liefert die potenzielle nominale Kantenlänge einer quadratischen Gitterzelle:

$$\text{grob: } \delta x = \frac{D^*}{4} = \frac{1,816 \text{ m}}{4} = 0,454 \text{ m} = 45,4 \text{ cm}$$

$$\text{mäßig: } \delta x = \frac{D^*}{10} = \frac{1,816 \text{ m}}{10} = 0,1816 \text{ m} = 18,16 \text{ cm}$$

$$\text{fein: } \delta x = \frac{D^*}{16} = \frac{1,816 \text{ m}}{16} = 0,1135 \text{ m} = 11,35 \text{ cm}$$

Die detaillierteste und kleinteiligste Auflösung in der Brand- und Rauchgassimulation erfordert der TR mit seinen Stufengeometrien. Gewählt wurde hierfür ein Steigungsmaß von 0,15 m und ein Auftrittsmaß von 0,30 m. Diese Werte sind an reale Treppengeometrien bestmöglich angenähert. Eine durchschnittliche Schrittlänge liegt bei etwa 630 mm.⁴⁸ Bei der Bemessung des Steigungsverhältnisses sollte sich vorrangig an der definierten Schrittlänge und der Bequemlichkeitsregel für Treppen- und Stufengeometrien orientiert werden. Diese gibt ein Steigungsmaß von 170 mm = 0,17 m und ein Auftrittsmaß von 290 mm = 0,29 m vor.⁴⁹

⁴⁶ McGratten et al. 2020b: 132

⁴⁷ Osburg 2020: 22f.

⁴⁸ Stahr/Schulz 2015: 542

⁴⁹ Stahr/Schulz 2015: 544

Da es im Bereich des TR gilt die turbulenten Strömungsregime optimal aufzulösen, wird der dimensionslose Ausdruck $D^*/\delta x$ mit einer nominalen Kantenlänge von $\delta x = 0,15$ m untersucht:

$$\frac{D^*}{\delta x} = \frac{1,816 \text{ m}}{0,15 \text{ m}} = 12,10\bar{6} \rightarrow \text{mäßig bis fein}$$

Vergrößert man die nominale Kantenlänge auf $\delta x = 0,3$ m oder auf $\delta x = 0,5$ m, hätte dies lediglich einen mäßigen bis groben dimensionslosen Ausdruck zur Folge. Im Hinblick auf die Stufengeometrien im TR wäre dies nur wenig praktikabel. Verkleinert man die nominale Kantenlänge auf $\delta x = 0,05$ m – als ganzzahliger Teilungsfaktor von $0,15$ m, so erhält man einen dimensionslosen Ausdruck $D^*/\delta x$ von $36,32$. Dies wäre als übermäßig feines Rechengitter einzustufen.

Es bleibt folglich bei einer nominalen Kantenlänge einer quadratischen Gitterzelle von $\delta x = 0,15$ m = 15 cm.

Da es sich bei der Simulationsbetrachtung um den Nachweis von kritischen Werten bezüglich definierter Kriterien der Personensicherheit handelt, ist ein mäßiges bis feines Rechengitter durchaus als zweckmäßig und ausreichend zu bezeichnen.

Die getroffene und begründete Annahme bezüglich eines brandlastgesteuerten Brandes anstelle eines ventilationsgesteuerten Brandes kann nun rückwirkend direkt verifiziert werden. Ein ventilationsgesteuerter Brand hätte eine geringere maximale Wärmefreisetzungsrates und somit einen kleineren charakteristischen Branddurchmesser zur Folge. Da sich D^* wiederum im Zähler von $D^*/\delta x$ befindet, folgt eine geringe dimensionslose Kennzahl bei gleicher nominaler Kantenlänge von $\delta x = 0,15$ m. Die dimensionslose Kennzahl hätte sich folglich geringfügig von fein nach mäßig verschoben, wäre aber weiterhin in diesem Bereich zu verordnen gewesen. Weiterführende Rechnungen bezüglich Gitternetzgenerierung unter der Prämisse des ventilationsgesteuerten Brandgeschehens und der tatsächlichen maximalen Wärmefreisetzungsrates können der *Anlage 2* entnommen werden.

Mit der grafisch aufbereiteten Gitterweitendiskussion in *Abbildung 4* (Folgeside) wird diese Thematik vorerst abgeschlossen. In Kapitel *8.2 Mesh-Anordnung* wird szenariospezifisch die Mesh-Gestaltung aufgegriffen und detaillierter konkretisiert.

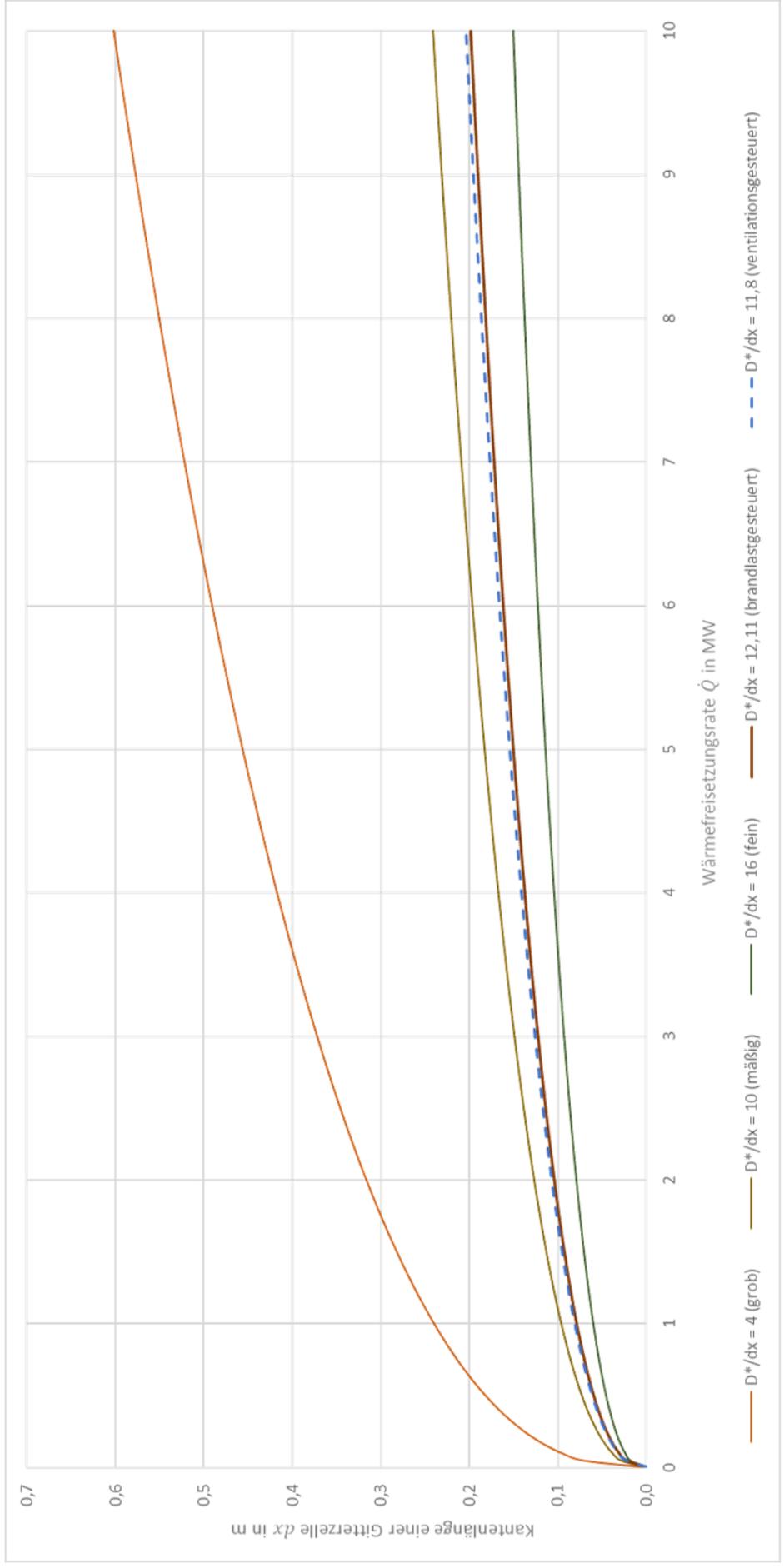


Abbildung 4: Einordnung der Rechengitterweiten. Die x-Achse zeigt die Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} in MW und die y-Achse zeigt die Kantenlänge einer Gitterzelle dx in m. Die fünf Kurven repräsentieren verschiedene Werte des dimensionslosen Ausdrucks $D^*/\delta x$. Ein höherer Wert führt dabei zu einem flacheren Verlauf der Kurve.

5 Schutzzielbestimmung

5.1 Definition Schutzziele

Mit der Einhaltung und Definition der präskriptiven Nachweisführung – Anwendung materieller Anforderungen des Baurechtes – wird im Regelbau ohne etwaigen Sonderbautatbestand das öffentlich-rechtliche Schutzziel zumeist vollumfänglich abgedeckt. Auch mit der leistungsbezogenen/schutzzielorientierten Nachweisführung unter Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz kann diese Einhaltung nachgewiesen werden. Verankert werden müssen die Nachweisführungen – Erreichen von bauordnungsrechtlichen Schutzzielen – in einem Brandschutznachweis und/oder in einem Brandschutzkonzept.⁵⁰

Die fundamentalen Schutzziele liefert der § 14 Brandschutz der MBO, aufbauend hierauf konkretisieren einzelne Länder diesen Paragraphen unterschiedlich und deutlich tiefgehender. In der LBO BW umfasst der § 15 Brandschutz neun Absätze. Unter anderem wird der zweite Rettungsweg, die Verpflichtung zur Montage von Rauchwarnmeldern und die Haltung von Tieren konkretisiert. Grundsätzlich müssen bauliche Anlagen so beschaffen und instandgehalten sein, dass

- der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt wird und
- bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie
- wirksame Löscharbeiten möglich sind.⁵¹

Der Brandschutz dient also primär dem Schutz von Menschenleben und bildet mit den passiven Maßnahmen des baulichen Brandschutzes, ergänzt durch abwehrenden Brandschutz, also der Leistungsfähigkeit der öffentlichen Feuerwehren, eine Einheit.⁵²

Im Umkehrschluss bedeutet dies für die erforderliche Sicherheit, dass Abweichungen und Änderungen bezüglich der üblichen Brandschutzmaßnahmen zwangsläufig auf die Brand- und Personensicherheit durchschlagen werden und oftmals erst nach Jahren statistisch überhaupt beleg- und auswertbar sind. Mit den anschließenden Unterkapiteln wird die schutzzielorientierte Brandschutzmessung unter Zuhilfenahme von funktionalen Anforderungen und quantitativen Leistungskriterien tiefgehend erläutert.

⁵⁰ Kampmeier 2019a: 2

⁵¹ MBO 2002: 14

⁵² VdS 2000: 8

5.2 Schutzinteressen und Schutzziele

Im bereits erwähnten Bauordnungsrecht – MBO, LBO BW und LBOAVO – findet man keinerlei Quantifizierung von konkreten Schutzziele. Zeitliche Ansätze bezüglich der Selbst- und Fremdretrungsphase bei der Räumung eines Gebäudes bleiben ebenso undurchsichtig wie die toxische- und thermische Einwirkung von Rauch und Feuer auf die Personensicherheit. Angaben bezüglich des Restrisikos für Personen in lebensbedrohlichen Brandeinsatzlagen und ihrer detaillierten Verletzungs- und Überlebenschwarscheinlichkeiten werden nicht gemacht. Durch modifizierte Vorschriften kann das Sicherheitsniveau nicht mehr zufriedenstellend quantifiziert werden.⁵³

Die schutzzielorientierte Brandschutzbemessung generiert einen notwendigen Aspekt für die Auslegung dieser Masterarbeit, nämlich die Bewertung der Leistungsfähigkeit des abwehrenden Brandschutzes zur Ermöglicung wirksamer Löschrmaßnahmen. Unterschiedliche Schutzziele ergeben sich hingegen aus den öffentlich-rechtlichen und privatrechtlichen Schutzinteressen, zu diesen zählen:

- Standsicherheit, auch im Brandfall,
- Vorbeugung gegen Brandentstehung und Brand- und Rauchausbreitung
- Ermöglicung der Rettung von Menschen und Tieren,
- Ermöglicung von wirksamen Löscharbeiten,
- Denkmalschutz, Erhaltung von Kulturdenkmalen,
- Umweltschutz,
- Begrenzung des Sachschadens,
- Vermeidung von Betriebsunterbrechungen.⁵⁴

⁵³ VdS 2000: 8

⁵⁴ DIN 2016: 15

5.3 Funktionale Anforderungen

Während das Schutzziel die Frage beinhaltet, warum etwas erreicht werden soll, beschreibt die funktionale Anforderung – als qualitativer Nachweis – was (technisch) erreicht werden soll. Es wird somit die erforderliche Leistungsfähigkeit einer baulichen Anlage über eine definierte Zeitspanne beschrieben. Exemplarisch können folgenden funktionale Anforderungen aufgelistet werden:

- Nutzbarkeit der Rettungswege für die Dauer der Flucht,
- Nutzbarkeit der Rettungswege für die Dauer der Räumung,
- Nutzbarkeit der Rettungswege für die Einsatzkräfte für die Rettung hilfsbedürftiger Personen,
- Nutzbarkeit der Rettungswege für die Einsatzkräfte für die Dauer der Brandbekämpfung,
- Bewahrung architektonischer Werte und Erhaltung bauzeitlicher Substanz von Kulturdenkmalen.⁵⁵

5.4 Leistungskriterien

Mit der Definition der Leistungskriterien ist der letzte Baustein für eine schutzzielorientierte Betrachtung des Ausgangsszenarios gegeben. Die Kriterien dienen als Grundlage der quantitativen Spezifizierung einer funktionalen Anforderung. Dieser quantitative Schutzzielnachweis gibt zudem an, unter welchen Voraussetzungen die funktionale Anforderung als eingehalten gilt. Anhand dieser Leistungskriterien werden die Simulationsergebnisse erfasst, bewertet und gedeutet.

Bei den gebräuchlichen Leistungs- und Nachweiskriterien der Personensicherheit unterscheidet man drei Kategorien:

- Höhe der raucharmen Schicht,
- Qualität der raucharmen Schicht,
 - Optische Dichte pro Weglänge bzw. die Erkennungsweite,
 - Auswirkungen toxischer Gase,
- Thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion.⁵⁶

⁵⁵ DIN 2016: 15

⁵⁶ Zehfuß 2020: 312

Mit der Höhe der raucharmen Schicht als konservatives und früh anschlagendes Kriterium für die Personensicherheit hat man zugleich ein anschauliches und triviales Kriterium. Je nach Stärke der Stratifizierung, der Raumhöhe und der erforderlichen Sicherheitszuschläge sind so typische Schichthöhen zur Selbstrettung von mindestens 2,5 m nachzuweisen.⁵⁷ Vereinfacht dargestellt handelt es sich um den Abstand in Metern von der Fußbodenoberkante bis zum Beginn der Rauchgasschicht, welche sich aufgrund der Heißgasschichtung von der Decke beginnend ausbildet. Eine diesbezügliche Nachweisführung in direktem Simulationsbezug gestaltet sich äußerst schwierig und ist nur wenig erkenntnisbringend. Grundsätzlich ist die Höhe der raucharmen Schicht im Keller- und Brandraum eher irrelevant, da hier frühzeitig mit einer enormen Rauchausbreitung zu rechnen ist. Zudem handelt es sich hierbei nicht um einen Aufenthalts- oder Schlafbereich für Bewohner des Hauses. Im TR wird die Höhe der raucharmen Schicht gänzlich vernachlässigt, denn hier handelt es sich um eine vertikale Raumanordnung mit turbulenter Rauchausbreitungsverhalten aufgrund der Geometrie der Treppenstufen. Da CFD-Modelle die Parameter des Schichtungsverlaufs grundsätzlich berücksichtigen und diese abgerufen werden können, wird die Höhe der raucharmen Schicht hinter den dichtschießenden Wohnungsabschlüssen – in den WE unter Variation der Leckrate – nochmals gesondert betrachtet und bewertet werden müssen. Die Plausibilität der so gewonnenen Daten wird kritisch beurteilt werden müssen. Ergänzend zu den bereits aufgeführten Randbedingungen werden die Interventionskräfte Maßnahmen zur Ab- und Zuluftöffnung durch Fenster- und Türöffnungen ergreifen. Dieses einsatztaktische Vorgehen sorgt darüber hinaus für eine Steigerung des turbulenten Verhaltens der Strömungsregime.

Die Qualität der raucharmen Schicht, definiert durch die optische Dichte pro Weglänge bzw. die Erkennungsweiten, beschreibt die lichttrübende Eigenschaft des Brandrauches. Eine Nachweisführung über die Qualität, insbesondere in Fällen mit geringer Stratifizierung, bei Rauchverdünnungen und bei sehr konservativen Brandszenarien, ist erforderlich. Neben physikalischen Aspekten gehen auch lichttechnische und chemische Zusammenhänge in die Bewertung der Qualität der raucharmen Schicht mit ein. Hierbei kann das Kriterium der Erkennungsweiten noch vor der Höhe der raucharmen Schicht anschlagen.⁵⁸ Die optische Dichte D_L wird bei der Bewertung der Personensicherheit im notwendigen TR auf den Treppenpodesten und hinter den dichtschießenden Wohnungsabschlüssen ein zu ermittelndes Kriterium sein. Die vier folgenden Aussagen geben einen verifizierten Rahmen für die weitere Auswertung vor:

⁵⁷ Zehfuß 2020: 312

⁵⁸ Zehfuß 2020: 312

- Eine optische Dichte von $D_L = 0,2 \text{ m}^{-1}$ entspricht einer Erkennungsweite von 10 bis 20 m.
- Bei einer optischen Dichte von $D_L < 0,1 \text{ m}^{-1}$ sind in der Regel die Werte für Toxizität, Reizgase und die Erkennungsweiten unbedenklich.
- Eine optische Dichte von $D_L < 0,1 \text{ m}^{-1}$ kann somit als quantitatives Kriterium für den Nachweis einer raucharmen Schicht in den Rettungswegen angenommen werden.⁵⁹
- Eine optische Dichte pro Weglänge von $D_L = 0,5 \text{ m}^{-1}$ bedeutet, dass die Sichtweite noch 2 m beträgt.⁶⁰

Erkennungsweiten – Formelzeichen S in der Einheit Meter – zwischen dem Beobachter und den vorhandenen Fluchtwegzeichen werden, da diese aufgrund bauordnungsrechtlicher Vorgaben für die GK 4 – ohne Sonderbautatbestand – nicht vorhanden sind, vernachlässigt und in dieser wissenschaftlichen Ausführung nicht thematisiert.

Ein weiteres Subkriterium der Qualität der raucharmen Schicht sind die Auswirkungen von toxischen Gasen auf das Fluchtverhalten von Personen. Grundsätzlich muss vorweggenommen werden, dass die Nachweiskriterien der Toxizität nicht konservativ sind. Der einfache Austausch von konservativen Kriterien, wie die Höhe der raucharmen Schicht durch ein Toxizitätskriterium, muss begründet sein und darf nur bei sehr konservativen Szenarien erfolgen. Anderenfalls würde es zur Minderung des Sicherheitsniveaus führen.⁶¹ Als Nachweismethode zur Risikoquantifizierung – unter der Anwendung eines Feldmodells – ist dieses schwankende Kriterium sehr gut geeignet. Die Wirkung von toxischen Gasen auf das Fluchtverhalten von Personen ist von der Expositionszeit und der Dosis abhängig. Eine Beeinträchtigung der Handlungsfähigkeit und eine gesundheitsgefährdende Wirkung kann plötzlich eintreten. Resultierend hieraus dürfen Grenzgaskonzentrationen für typische Verbrennungsprodukte wie Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Cyanwasserstoff (HCN) nicht überschritten werden. Im Rahmen der weiteren wissenschaftlichen Arbeit wurde aufgrund von begrenzten Rechenkapazitäten und Berechnungszeiten Kohlenstoffmonoxid (CO) als zu untersuchendes toxisches Gas festgelegt.

Die thermischen Einwirkungen und Folgen aus der Wärmestrahlung und Konvektion sind gerade im Flammennahbereich und in der Nähe von sich ausprägenden Heißgasschichten zu analysieren. Die thermische Schädigung durch Heißgase hängt dabei maßgeblich

⁵⁹ Zehfuß 2020: 470

⁶⁰ Kampmeier 2019b: 4

⁶¹ Zehfuß 2020: 312

von der Luftfeuchtigkeit und der Expositionszeit ab. Man differenziert drei Mechanismen mit unterschiedlichen Erträglichkeitsschwellen und Folgen für den menschlichen Körper. Mit dem Anstieg der Körpertemperatur geht der thermische Schock einher. Hautverbrennungen hingegen werden maßgeblich durch den Wärmestrom auf die Hautoberfläche beeinflusst. Hierzu findet man in der Literatur einen Grenzwert von 200 °C (trockene Luft) bei einem Zeitansatz von 3-4 Minuten.⁶² Den dritten Mechanismus stellt die Verbrennung des Atemtraktes dar – Temperaturen von > 180 °C können zu einem einsetzenden Inhalationshitzeschock führen.⁶³ Diese Kriterien gilt es gesondert im Eingangsbereich des MFH und im Abgangsbereich des Kellers zu betrachten. Hier kann der Kamineffekt im TR neben dem Rauchgastransport für eine massive Wärmestrahlung- und Konvektionsverschleppung sorgen.

Entscheidend bei den beiden letztgenannten Kriterien ist die Expositionszeit. Anzusetzen ist hier ein überproportionales Wachstum bezüglich der Schadwirkung (Dosis) auf den Menschen.

⁶² Zehfuß 2020: 321

⁶³ Zehfuß 2020: 322

5.5 Quantifizierung

Bei definierten Brandszenarien und den zu prüfenden Hypothesen ist eine Quantifizierung von Schutzziele über die funktionalen Anforderungen und die zugehörigen Leistungskriterien realisierbar. Bei zu bewertenden Brandfolgen bietet sich die detaillierte Quantifizierung von Personenschäden oder die abgeschätzte Höhe des Sachschadens an.⁶⁴ Neben den Rauchausbeuten und Rauchpotenzialen der primären Verbrennungsprodukte wird auch der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrates (Brandverlaufskurve) untersucht. Mit *Tabelle 3* soll ein Gesamteindruck der definierten und zu untersuchenden Schutzziele vermittelt werden.

Tabelle 3: Schutzzieldefinition des Betrachtungsszenarios

Schutzziel	Funktionale Anforderung und qualitativer Nachweis	Leistungskriterium für einen quantitativen Nachweis ⁶⁵
Personensicherheit <ul style="list-style-type: none"> - Schutz von Leben und Gesundheit - Rettung von Menschen und Tieren ermöglichen 	Sicherheit für die Rettungswegbenutzbarkeit über den notwendigen Treppenraum (1. Rettungsweg) - Selbstrettungsphase Sicherheit der Personen hinter dichtschießenden Wohnungsabschlussöffnungen Sicherheit der Einsatzkräfte und Personen für die Rettungswegbenutzbarkeit über den notwendigen Treppenraum (1. Rettungsweg) - Fremdrettungsphase	Optische Dichte von $D_L < 0,2 \text{ m}^{-1}$ Gaskonzentration von $c_{CO} < 500 \text{ ppm}$ Gastemperatur von $T < 50 \text{ °C}$ <i>Jeweils für kurze Aufenthaltsdauern von < 5 min</i>

Mit dem Einsetzen eines mobilen Rauchverschlusses, der zielgerichteten taktischen Ventilation mittels Überdruckbelüftungsgerät und dem Schaffen von Zu- und Abluftöffnungen durch die Interventionskräfte können weitere sekundäre Schutzziele positiv beeinflusst werden. Eine Quantifizierung der Leistungskriterien der zwei in der Tabelle nicht genannten Schutzziele – die Ausbreitung von Feuer und Rauch begrenzen und wirksame Löscharbeiten ermöglichen – ist aufgrund von fehlenden Referenzdaten nur begrenzt möglich.

⁶⁴ DIN 2016: 48

⁶⁵ Zehfuß 2020: 325

5.6 Sicherheitsbeiwerte

Um das Kapitel der Schutzzieldefinition final abschließen zu können, ist eine Erörterung der Sicherheitsbeiwerte unumgänglich. Unausweichlich werden bei der numerischen Lösung in Feldmodellen Ungenauigkeiten generiert. Diese gilt es entsprechend nachzuweisen und zu integrieren. Dazu werden oftmals prozentuale Aufschläge auf die Leistungskriterien angerechnet. Formal sind für den Personenschutz entsprechend hohe Sicherheitsbeiwerte festgelegt. Dies liegt unter anderem an individuell variierenden Verträglichkeiten einzelner Personengruppen. Die Leistungskriterien können folglich auf der Basis des Teilsicherheitskonzeptes als Teilsicherheitsbeiwerte definiert werden. Dies ermöglicht quantitative Aussagen einzelner Parameter bezüglich des Sicherheitsbeitrages und Berücksichtigung von vorhandenen Unschärfen.

Das Kriterium der optischen Dichte von $D_L < 0,2 \text{ m}^{-1}$ wird ohne weitere Sicherheitsbeiwerte angesetzt (vgl. Kapitel 5.4 *Leistungskriterien*). Es kann hier der größere Wert angesetzt werden, wenn der betroffene Bereich übersichtlich strukturiert ist und die Personen mit den Gegebenheiten vertraut sind.⁶⁶ Ein weitere Unschärfe dieses Kriteriums stellt der Abgriff der gemessenen Simulationsdaten dar. Für eine Person im akuten Gefahrenbereich muss die optische Dichte differenziert auf verschiedene Raumhöhen betrachtet werden. Exemplarisch folgt somit bei einem Auswertepunkt der optischen Dichte in 2,50 m Höhe und einer gemittelten Körpergröße von 1,80 m ein Sicherheitsbeiwert von 28 %.

Das Kriterium der Gaskonzentration von $c_{CO} < 500 \text{ ppm}$ weist zwei Formen der Unschärfe auf. Zum einen ist in der anfänglichen Selbstrettungsphase mit einem schnellstmöglichen Queren des notwendigen Treppenraumes zu rechnen, d.h. mit einem Zeitanatz der Aufenthaltsdauer von deutlich unter 5 min, teilweise nur einigen Sekunden. Des Weiteren bedienen sich Interventionskräfte in der Fremdrettungsphase sogenannten umgebungsluftabhängigen Brandfluchthauben, um Personen durch einen leicht bis mäßig verrauchten TR möglichst sicher zu geleiten. Diese Filtergeräte weisen Mindesthaltezeiten für die Gaskonzentration c_{CO} in ppm auf und können herstellerspezifisch abgefragt werden. Zum anderen existieren Grenzwerte für die Gaskonzentration von Kohlenstoffmonoxid c_{CO} von $< 700 \text{ ppm}$, dies entspräche einem Sicherheitsbeiwert von ungefähr 29 % im Vergleich zu den angenommenen 500 ppm.⁶⁷

⁶⁶ Zehfuß 2020: 325

⁶⁷ VdS 2000: 9

Das Bemessungsbrandszenario wird im nachfolgenden Kapitel als konservative Annahme beschrieben, um die potenzielle Rauch- und Rußausbeute gemäß dem Nachweis der optischen Dichte bestmöglich in Korrelation zu setzen.

Eine Argumentationsführung hinsichtlich des vernachlässigten Schwelbrandes in der Brandentstehungsphase der Brandsimulation muss entkräftet werden. Eine Brandfrüherkennung in dieser Phase durch Bewohner des Hauses ist zu nachtschlafender Zeit und bei minimalen Rauchaussbeuten eher unwahrscheinlich. Hierdurch könnte lediglich ein minimaler Sicherheitsbeiwert abgeleitet werden.

Mit diesem Ansatz der Sicherheitsbeiwerte kann nun ein ausreichender Kompromiss etwaiger Unschärfen unterstellt werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden weitere Plausibilitätskontrollen mittels Handrechenverfahren folgen müssen, um stets dem Leistungskriterium adäquat zu schlussfolgern.

6 Bemessungsbrandszenario

6.1 Das Brandszenario

Bei einem Bemessungsbrandszenario handelt es sich um ein definiertes Brandszenario, welches es brandschutztechnisch zu untersuchen gilt. Diese qualitative Beschreibung eines Ereignisses berücksichtigt zeitlich abhängige Brandverlaufphasen und Schlüsselergebnisse. Mit einer Szenariokonkretisierung ist es nun möglich den „Lastfall Brand“ für die jeweilige Fragestellung anhand des Bemessungsbrandszenarios besser zu charakterisieren.⁶⁸ Es erfolgt dadurch eine Reduzierung der potenziellen Brandszenarien auf wenige maßgebende Brandszenarien („*worst credible*“-Szenario).

In diesem Zusammenhang soll auf das korrespondierende Brandverhalten in der Brandentwicklungsphase von einem „klassischen“ Wohnungsbrand und einem Kellerbrand hingewiesen werden. Ein Brandereignis beginnt grundsätzlich brandlastgesteuert. Über den zeitlichen Verlauf und mit flächenmäßiger Ausdehnung des Brandes kann es sich zu einem ventilationsgesteuerten Brandereignis entwickeln. Die Hypothese einer Vergleichbarkeit der Entwicklungsphase unter identischen und minimalen Ventilationsöffnungsverhältnissen ist somit gegeben. Die eingangs erörterte Unterscheidung der Brandlastdichten in Wohneinheiten und in Kellerbereichen ist für die stationäre Brandphase entscheidend. Die weiteren Besonderheiten eines Schadfeuers in Kellerräumen sind neben der potenziell höheren Brandlastdichte auch der auftretende Hitze- und Rauchgasstau aufgrund fehlender Abluftöffnungsflächen.

Im Folgenden werden nun die Eingangsdaten des maßgebenden Brandszenarios beschrieben und festgelegt.

Da es sich bei dem Bemessungsbrandszenario um einen ausgedehnten Kellerbrand handelt, befindet sich der Brandentstehungsort im ersten Untergeschoss des MFH. Die Grundfläche des Raumes beträgt 83,52 m². Auf dieser Grundfläche kommt es zu einem Brand von mehreren offenen Kellerverschlägen aus Holz. Angenommen wird eine Brandfläche von $A_{Brand} = 4,2 \text{ m} \times 4,2 \text{ m} = 17,64 \text{ m}^2$, dies entspricht nahezu einem Fünftel der Kellergrundfläche. Die Brandfläche befindet sich außermittig an der Außenwandbegrenzung. Benachbarte Kellerbereiche wie ein Hauswirtschafts- oder Technikraum, ein Fahrradabstellraum oder der Zugang zu einer Tiefgarage werden vernachlässigt.

Bei der Brandlast in Wohnungskellern kann grundsätzlich von einer Mischbrandlast ausgegangen werden. Was sich detailliert hinter den teils abgeklebten Kellerverschlägen der

⁶⁸ DIN 2016: 20

Eigentümer und Mieter befindet, ist reine Spekulation und unterliegt auch keinen weiteren Regularien durch den Vermieter und die Hausverwaltung. Die Annahme einer fundamental höheren Brandlastdichte als in WE wird zwar berücksichtigt, aber nicht gänzlich unterstellt. In sämtlichen Untergeschossbereichen findet man überwiegend sogenannte „Aufputz-Elektroinstallationen“. Diese können durch einen trivialen Kurzschluss ein derartiges Brandereignis unbemerkt und schleichend auslösen. Weitere potenzielle Arten der Brandentstehung wären beispielsweise der technische Defekt von Waschmaschinen oder Trockengeräten, aber auch ein mutwillig herbeigeführtes Schadfeuer durch Brandstiftung oder Fahrlässigkeit wäre denkbar.

Der Brandraum verfügt über zwei Ventilationsöffnungen, einen Lichtschacht mit einer maximalen Öffnungsfläche von 0,7 m² und die Kellerabschlussöffnung mit 2 m². Die im offenen Zustand arretierte Türe gibt dem Bemessungsbrand das gesamte Treppenraumvolumen frei. Eine Variation der Öffnungsfläche der Kellerabschlusstüre wird nicht berücksichtigt, eine Variation der Öffnungsfläche des Lichtschachtes – geöffnet, gekippt und verschlossen – hingegen schon. Beide Öffnungsflächen werden mit dem Agieren der Interventionskräfte und der taktischen Ventilation an Bedeutung gewinnen und erneut betrachtet werden müssen.

Da anlagentechnische Brandschutzeinrichtungen nicht vorhanden sind (siehe Kapitel 3 *Bauordnungsrechtliche Gebäudeeinordnung*), ist kein entsprechender Einfluss zu berücksichtigen. Eine frühzeitige Unterbindung des Brandverlaufes, beispielsweise durch Sprinklerung, ist nicht gewährleistet – es handelt sich um einen ungestörten Brandverlauf.

Im Allgemeinen ist die Berücksichtigung von Brandbekämpfungsmaßnahmen der Feuerwehr mit der zuständigen Brandschutzdienststelle abzugleichen. Pauschale Aussagen bezüglich des Zeitpunktes von Brandbekämpfungsmaßnahmen sind nicht mit einer zufriedenstellenden Zuverlässigkeit zu treffen. Mit der Brandsimulationen sollen einsatztaktische Grundsätze wie die taktische Ventilation mittels Überdruckbelüftungsgerät, das Setzen eines mobilen Rauchverschlusses und das Schaffen von Quer- und Abluftöffnungsmöglichkeiten analysiert werden.

Das Abschätzen des zu erwartenden Brandschadens bedarf einer Bewertung des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen. Dieses Schadensausmaß in Verbindung mit der Auftretenswahrscheinlichkeit wird nicht detaillierter analysiert. Es ist davon auszugehen, dass eine aufwendige und zeitintensive Brandschadensanierung im Kellerbereich und eine Teilsanierung des TR nötig sein werden.

6.2 Der Bemessungsbrand

Ein Bemessungsbrand charakterisiert grundsätzlich die quantitative Beschreibung der definierten Brandeigenschaften innerhalb eines Bemessungsbrandszenarios. Es handelt sich um eine idealisierte Darstellung entscheidender Brandeigenschaften wie der Wärmefreisetzungsrate, der Rauchausbeuten oder der Freisetzung von toxischen Gasen. Das Bemessungsbrandszenario wird folglich für die Nutzung der Rettungswege durch die Gebäudenutzer, für die Fremdrettung durch die Feuerwehr und für die potenzielle Brandbekämpfung/Interventionsmaßnahmen durch die Feuerwehr ausgelegt. Im Zusammenhang mit einer Brandsimulation dienen Bemessungsbrände als Quellterm zur Bestimmung der weiteren Ausbreitung von Brandprodukten.

Die Ermittlung der zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate ist für die weitere Betrachtung essenziell. Diese kann auf Basis verschiedenster Methoden generiert werden, unter anderem durch Experimente, Berechnungen, Vereinbarungen auf Grundlage von Schadensauswertungen und normative Vorgaben und technische Regelwerke. Letzteres entspricht der gängigen Regel bei numerischen Brandsimulationen. Es werden Kennwerte nach vereinfachten theoretischen Ansätzen gewählt und diese durch Gegenrechnungen verifiziert. Erste Annahmen wurden bereits bei der Gitterweitendiskussion erörtert. Der Vollständigkeit halber werden sie im Folgenden nochmals aufgeführt:

- Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate $\dot{q} = 0,28 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}$
- Mittlere Brandbelastung, Brandlastdichte $q = 932,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$
- Charakteristische Brandentwicklungszeit $t_{\alpha} = 300 \text{ s}$

Auf dieser Grundlage können nun weiterführende Modellierungseingaben ermittelt werden. Als ein Standardansatz gilt das t^2 -Modell zur Beschreibung der Brandausbreitungsphase. Hierüber können verschiedene Brandentwicklungen klassifiziert werden. Dieser Ansatz kann in das geometrische Modell überführt werden und definiert somit die zeitliche Entwicklung der Brandfläche in Abhängigkeit der Zeit. Der Ansatz einer kreisförmigen 360° Brandausbreitung vom Mittelpunkt der aufgespannten Brandfläche bietet einige Vorzüge. Im direkten Vergleich hierzu kann die Wärmefreisetzungsrate über t_{α} auch mit einem quadratischen Wachstum bis zum Erreichen des Maximums dargestellt werden. Dies hätte einen bereits in der Brandentstehungsphase vollflächigen Brand mit entsprechenden Rauch- und Rußausbeuten zur Folge. Diese Ungenauigkeit kann mit dem quadratischen Wachstum unter Einhaltung der identischen Brandverlaufskurve entkräftet werden. Es erfolgt ein realistischerer Brandverlauf unter der Berücksichtigung des lokalen Ausbrandes.

Im Folgenden wird nun die radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit (spread rate) v_{aus} mit Hilfe der *Formel 6* ermittelt:⁶⁹

$$v_{aus} = \sqrt{\frac{1000 \text{ kW}}{t_{\alpha}^2 * \dot{q} * \pi}} = \sqrt{\frac{1000 \text{ kW}}{300 \text{ s}^2 * 280 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} * \pi}} = 0,0036 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (6)$$

Setzt man diese radiale Ausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} nun in Korrelation mit der aufgespannten quadratischen Brandfläche A_{Brand} und berücksichtigt hierbei das kreisförmige Ausbreitungsmodell A_{Kreis} , kann man eine Plausibilitätskontrolle der Brandfläche durchführen. Unter Zuhilfenahme der *Formel 7* für die kreisförmige Brandausbreitung A_{Kreis} können nun für verschiedene Zeiten t_n die potenziellen Flächen ermittelt werden:⁷⁰

$$A_{Kreis} = \pi * v_{aus}^2 * t_n^2 = \pi * \left(0,0036 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 * t_n^2 \quad (7)$$

Diese rein rechnerisch ermittelten Daten (dargestellt in *Tabelle 4*) gilt es im weiteren Verlauf mit erfolgter Brandsimulation unter Berücksichtigung der Brandentdeckungszeit und der Alarmierungs- und Eintreffzeit der Interventionskräfte zu deuten.

Tabelle 4: Geometrisches Brandausbreitungsmodell – kreisförmige Brandfläche A_{Kreis} und die zugehörige Branddauer t_n bestimmt nach *Formel 7*

t_n in s [min]	A_{Kreis} in m^2
300 [5]	3,66
600 [10]	14,66
900 [15]	32,98
1200 [20]	58,63
1500 [25]	91,61
1800 [30]	131,92

Durch eine Rückrechnung der quadratischen Brandfläche von $A_{Brand} = 17,64 \text{ m}^2$ erhält man einen Zeitansatz von $t_n = 658 \text{ s} = 10,97 \text{ min}$ für den Übergang der Brandentwicklungsphase in die Stationäre Phase (vgl. *Abbildung 5*). Hier ist äußerste Vorsicht bei der korrekten Interpretation geboten, denn der Brandausbruch des Bemessungsbrandes unterschlägt die Schwelbrandphase.

⁶⁹ Zehfuß 2020: 61

⁷⁰ Hosser 2013: 56

6.3 Festlegung der Brandverlaufphasen

Der Bemessungsbrand kann in seinen Grundzügen in drei Phasen unterteilt werden. Die erste Phase charakterisiert die Brandentwicklungszeit mit einem t^2 -Anstieg bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate \dot{Q}_{max} . Bei der sich anschließenden zweiten Phase handelt es sich um die Vollbrandphase – stationäre Phase – welche mit konstanter Wärmefreisetzungsrate verläuft. Diese Phase endet, sobald 70 % der zur Verfügung stehenden Brandlast verbrannt ist. Die finale Bemessungsbrandphase ist die abklingende Brandphase. Diese linear abfallende Phase endet mit der Verbrennung von 100 % der vorhanden Brandlast. Mit der *Abbildung 5* soll der charakteristische Brandverlauf des Bemessungsbrandszenarios verdeutlicht werden.

Sämtliche Eingangsparameter wie \dot{q} , q , t_α , A_{Brand} und $\dot{Q} = \dot{Q}_{max}$ sind bereits durch das Treffen von Annahmen oder die rechnerische Ermittlung bekannt. Die nachfolgenden *Formeln 8 bis 15* sind der DIN EN 1991-1-2-NA entnommen.⁷¹

Mit der *Formel 8* kann die Zeit t_1 bis zum Erreichen der stationären Vollbrandphase ermittelt werden.

$$t_1 = t_\alpha * \sqrt{\dot{Q}_{max}} = 300 \text{ s} * \sqrt{4,939 \text{ MW}} = 666,71 \text{ s} = 11,11 \text{ min} \quad (8)$$

Für die rechnerische Ermittlung der Zeit t_2 bedarf es einer Bestimmung der einzelnen Brandlasten Q_{01} , Q_{02} und Q_{12} von Entwicklungs- und Vollbrandphase. Die Brandlast Q_{02} bis zum Erreichen der abklingenden Brandphase und somit 70 % der Gesamtbrandlast kann mit *Formel 9* bestimmt werden.

$$Q_{02} = 0,7 * q * A_{Brand} = 0,7 * 932,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} * 17,64 \text{ m}^2 = 11514,51 \text{ MJ} \quad (9)$$

Mit der *Formel 10* wird nun die Brandlast von Beginn der Entwicklungsphase bis zum Start der Vollbrandphase ermittelt.

$$\begin{aligned} Q_{01} &= \int \dot{Q}(t) dt = \left(\frac{1}{t_\alpha}\right)^2 \int t^2 dt = \frac{1}{3} * \left(\frac{1}{t_\alpha}\right)^2 * t_1^3 \\ &= \frac{1}{3} * \left(\frac{1}{300 \text{ s}}\right)^2 * (666,71 \text{ s})^3 = 1097,61 \text{ MJ} \end{aligned} \quad (10)$$

⁷¹ DIN 2015: 12

Aus der Differenz der Brandlasten von Q_{02} und Q_{01} kann die Brandlast für die Vollbrandphase Q_{12} rechnerisch mit der *Formel 11* ermittelt werden.

$$Q_{12} = Q_{02} - Q_{01} = 11514,51 \text{ MJ} - 1097,61 \text{ MJ} = 10416,90 \text{ MJ} \quad (11)$$

Mit Hilfe der Brandlast von Q_{12} kann nun die Zeit t_2 mit der *Formel 12* ermittelt werden.

$$t_2 = \frac{Q_{12}}{\dot{Q}_{max}} + t_1 = \frac{10416,90 \text{ MJ}}{4,939 \text{ MW}} + 666,71 \text{ s} = 2775,82 \text{ s} = 46,26 \text{ min} \quad (12)$$

Nun gilt es abschließend die Dauer aller Brandphasen t_3 bis zum Erlöschen des Brandes – und somit keiner nachweisbaren Wärmefreisetzung mehr – zu bestimmen. Am Zeitpunkt t_3 sind 100 % der Brandlast verbrannt. Vergleichbar zur Bestimmung von Q_{02} muss die Brandlast Q_{23} ermittelt werden. Dies geschieht mit *Formel 13*.

$$Q_{23} = 0,3 * q * A_{Brand} = 0,3 * 932,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} * 17,64 \text{ m}^2 = 4934,79 \text{ MJ} \quad (13)$$

Mit Q_{23} kann nun die Zeit t_3 (*Formel 14*) und folglich auch Q_{03} (*Formel 15*) bestimmt werden.

$$t_3 = t_2 + \frac{2 * Q_{23}}{\dot{Q}_{max}} = 2775,82 \text{ s} + \frac{2 * 4934,79 \text{ MJ}}{4,939 \text{ MW}} = 4774,12 \text{ s} = 79,57 \text{ min} \quad (14)$$

$$Q_{03} = Q_{23} + Q_{02} = 4934,79 \text{ MJ} + 11514,51 \text{ MJ} = 16449,30 \text{ MJ} \quad (15)$$

Der charakteristische Bemessungsbrand, also ein brandlastgesteuerter und vollentwickelter Brand mit seinen korrespondierenden Zeiten, kann nun beschrieben werden. Bei diesem Brandverlauf handelt es sich um einen theoretischen – aber potenziell möglichen – Verlauf, welcher eine Vielzahl an tendenziellen Brandverläufen miteinschließen soll. Es ist folglich eine konservative Annahme, welche resultierende Brandgefahren und Ausbeuten hinreichend sicher erfassen soll. Durch die Brandsimulation können entsprechende Ergebnisse auf ihre Plausibilität hin überprüft werden und eine Anpassung an realistische Werte erfolgen. Grundsätzlich beginnen alle Brände als brandlastgesteuerter Brand. Eine Verschiebung der Ventilationsbedingungen hin zum ventilationskontrollierten Brand ist mit dem Zuwachs an Sauerstoffbedarf und der Brandfläche zu begründen.

Die Berücksichtigung des potenziellen *Flashover*-Kriteriums – schlagartiger Wechsel von Brandverlaufphase in Vollbrandphase – und des ventilationsgesteuerten Brandgeschehens ist in der *Abbildung 5* mit gestrichelten Linien (hellblau) dargestellt und dient lediglich der Verdeutlichung. Eine rechnerische Ermittlung ist in der *Anlage 2* zu finden.

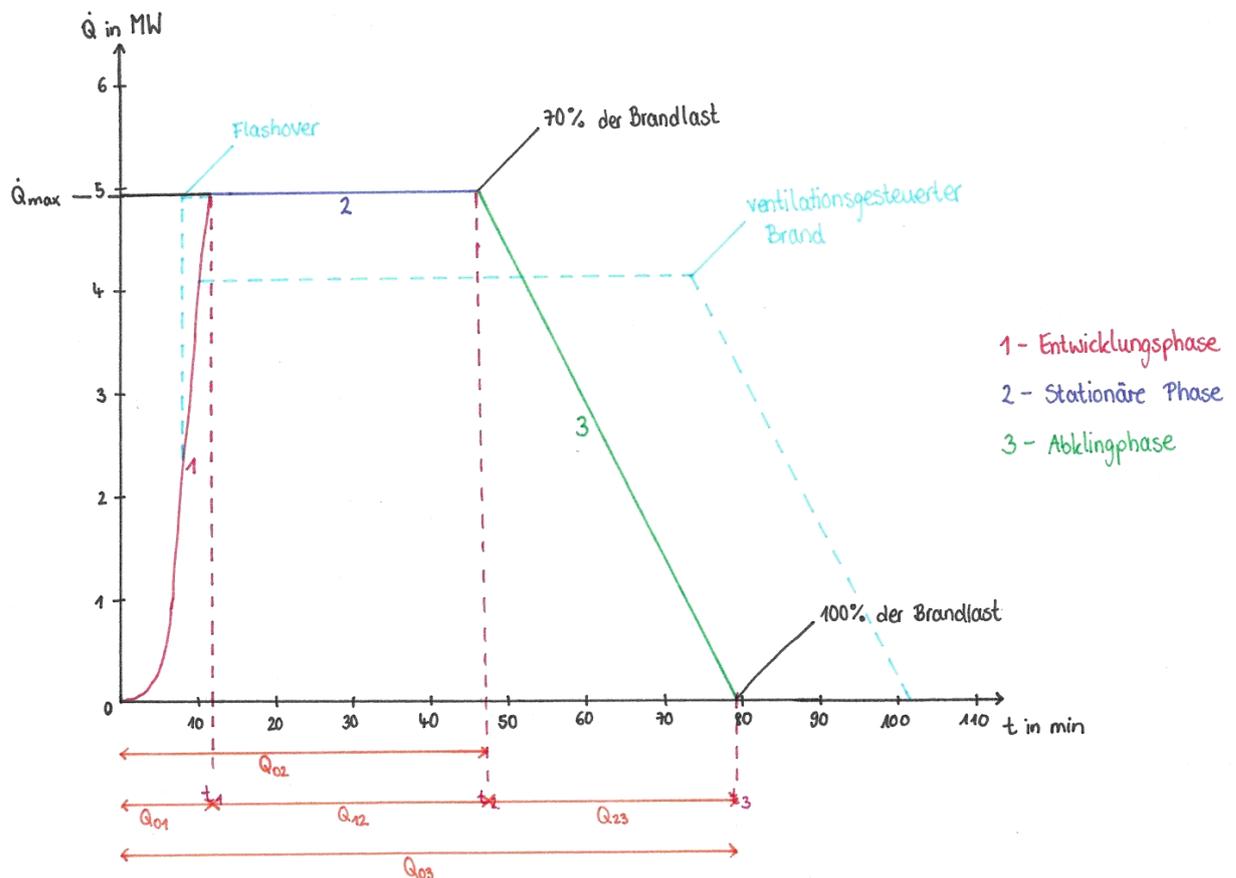


Abbildung 5: Charakteristischer Brandverlauf des brandlastgesteuerten Bemessungsbrandes (Zehfuß 2020: 302, durch den Autor erstellte und angepasste Darstellung)

6.4 Das Pyrolysemodell

Das primäre Ziel der Modellierung ist die Untersuchung der Ausbreitung von Rauchgasen und deren Ausbeuten. Die sekundäre Zielsetzung ist es den Temperaturverlauf des Brandes zu verifizieren und ggf. den Kamineffekt im TR zu quantifizieren. Unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten und Berechnungszeiten einer derart komplexen Brandsimulation wurde das einfache Pyrolysemodell ausgewählt. Dies lässt sich detaillierter über die Modellierung der zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate darstellen. Beim gewählten Brandausbreitungsmodell wird ein Brand auf einer quadratischen Oberfläche mit einer mittigen Brandentstehung angenommen. Die Brandausbreitung findet radial statt und berücksichtigt realitätsnah die Modellierung der t^2 -Kurve. Zudem hängt die Wahl des Pyrolysemodells von der Verfügbarkeit der Material-eigenschaften ab. Das einfache Pyrolysemodell wird durch nachfolgende Eingabeparameter definiert:

- Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate $\dot{q} = 280 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ (HRRPUA) – SURF-Eingabe
- Brandfläche $A_{\text{Brand}} = 17,64 \text{ m}^2$ – VENT-Eingabe
- Radiale Brandausbreitungsgeschwindigkeit (*spread rate*) $v_{\text{aus}} = 0,0036 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – VENT-Eingabe
- Rauchausbeuten von Ruß $Y_{\text{Ruß}}$ (*soot yield*) und CO Y_{CO} (*co yield*) in $Y_i = m_i/m_{\text{BST}}$ [g_i/g_{BSt}] – REAC-Eingabe

Mit Blick auf die festgelegten Leistungskriterien des Bemessungsbrandszenarios müssen nun Ausbeuten für die Modellierung festgelegt werden. Bei sogenannten Mischbrandlasten – wie sie im Kellerbereich durchaus zu erwarten sind – darf dafür aus einzelnen Stoffgruppen ein Mittelwert gebildet werden.⁷² Bei einem einfachen Pyrolysemodell ist lediglich die Eingabe von einer REAC-Zeile vorgesehen und somit die Festlegung eines Brandstoffes mit zusätzlichen anteilmäßigen Ausbeuten. Als konservativerer Brandstoff im Kellerbereich wurde Polyethylen (PE) als vielfältiger Vertreter der Kunststoff gewählt (REAC_1). Für die Ausbeuten wird dieser Brandstoff anteilmäßig mit der Stoffgruppe Zellulose – als Vertreter für sämtliche Holzbestandteile – und Polystyrol (PS) verrechnet. Durch den pragmatischen und quantifizierten Ansatz der massenanteiligen Deutung der Ausbeuten kann der Gesamtbrandstoff repräsentativ interpoliert werden. Um die Plausibilität der resultierenden Auswertungsergebnisse von CO und der optischen Dichte zu überprüfen, wird zusätzlich eine noch konservativere REAC-Eingabe (REAC_2) festgelegt. Diese

⁷² Zehfuß 2020: 323

Verifikation des Gesamtsystems in der Simulation sichert einen Realitätsbezug und prüft die Annahmen auf ihre Plausibilität.

Mit der folgenden *Tabelle 5* werden die Annahmen und anteilmäßige Deutung der Ausbeuten bezüglich der beiden *REAC-Eingaben* konkretisiert. Die Werte der verschiedenen Stoffgruppen wurden dem vfdb-Leitfaden entnommen.⁷³

Tabelle 5: Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten der REAC-Eingaben

Eingabe	Ventilations- bedingung	Stoff	Summenformel	Anteil	$Y_{Ru\beta}$ g/g _{BSt}	Y_{CO} g/g _{BSt}
REAC_1	ventilations- gesteuert	Zellulose	C ₆ H ₁₀ O ₅	50 %	0,028	0,145
		Polyethylen	C ₂ H ₄	25 %	0,098	0,459
		Polystyrol	C ₈ H ₈	25 %	0,331	0,137
		Mischbrandlast				0,121
REAC_2	ventilations- gesteuert	Zellulose	C ₆ H ₁₀ O ₅	50 %	0,028	0,145
		Halogenierte Kunststoffe		50 %	0,237	0,500
					0,1325	0,3225

⁷³ Zehfuß 2020: 329

7 Einsatztaktische Herangehensweise

7.1 Gesamteinsatztaktische Ergänzung

Auf Grundlage der modellierten Brand- und Rauchgassimulation und der detaillierten Beschreibung des Ausgangsszenarios im Kapitel 1 *Einleitung* entsteht folglich ein zu bewertendes Lage- und Gesamtbild, welches es einsatztaktisch einzuordnen gilt. Die äußerst dynamische Einsatzsituation zeigt sich nochmals mit einem Rückblick auf die Gefahrenmatrix (*Abbildung 2*). Initial alarmierte Interventionskräfte stehen vor einer Vielzahl von Aufgaben, welche es nach Priorisierung der ersteintreffenden Führungskraft abzuarbeiten gilt. Die auf Grundlage erster Erkundungs- und Befragungsergebnisse aufgestellte Gefahrenmatrix kann sich jederzeit ändern. Der Ablaufplan des Führungsvorgangs (siehe *Anlage 1*) und somit die Deutung und Wichtung der Gefahren bedarf einer ständigen kritischen Betrachtung aller Führungskräfte am Ereignisort. Hierbei spielen diverse Einflussfaktoren wie die weitere Befragung von Bewohnern, der Erkenntniszuwachs der Rundum- und Innenansicht, fundamentale Veränderung des Brand- und Rauchgasverhaltes und erste Rückmeldungen von eingesetzten Kräften eine entscheidende Rolle. Eine Nachjustierung und/oder Anpassung der Gefahrenmatrix ist also geradezu geboten. Exemplarisch können hierfür weitere Bewohner des MFH aufgeführt werden, welche sich schlafend in ihren Wohnungen befinden. Für diese Personengruppe wurde folgerichtig die Gefahr der weiteren Ausbreitung mit einer sekundären Priorisierung gedeutet. Durch ein fahrlässiges und irrationales Verhalten können sich erwachte Bewohner durch Öffnen der Wohnungsabschlusstüren einer zusätzlichen und unter Umständen unentdeckten massiven Gefährdung aussetzen.

Als Gedankenanstoß kann ein Brandereignis auf zwei Akteure reduziert werden. Dieser minimalistische Ansatz verdeutlicht die zeitliche Korrespondenz von Vorkommnissen und dem Agieren der Einsatzkräfte. Personen im Gefahrenbereich – Menschenrettung – können bildlich auf eine Seite gestellt werden. Das Brandgeschehen – Brandbekämpfung – auf die gegenüberliegende Seite. Als erstes und gleichzeitig einfachstes Mittel besteht die Option eine Abschirmung zwischen den Akteuren zu errichten. Eine vollumfängliche Abschirmung scheidet bei einem MFH aus und bezieht sich vielmehr auf ausgedehnte Industrieobjekte mit diversen Brandabschnitten und Kranken- und Pflegeeinrichtungen mit horizontaler Verschiebung von gefährdeten Personen in benachbarte Rauch- und Brandabschnitte. Es bleibt somit die Ausgangslage der zwei Akteure weitestgehend ungestört bestehen. Korrekt schlussgefolgert kann nun festgestellt werden, dass die Menschenrettung vor der Brandbekämpfung steht. Die Realität und die Einsatzpraxis lehren jedoch

häufig etwas anderes. Beispielsweise kann der Grundsatz des Eigenschutzes der eingesetzten Kräfte aufgeführt werden. Ein Trupp, der zur Menschenrettung im Gebäude eingesetzt ist, wird nie am Feuer vorbei gehen. Es besteht folglich ein Widerspruch, denn der Trupp muss zwangsläufig nun zur Brandbekämpfung übergehen, um seinen Rückweg zu sichern. Exemplarisch kann alternativ der Ansatz verfolgt werden, den ersten Trupp mit dem ersten Rohr zur Brandbekämpfung zu entsenden. Dieser erste Trupp zur Brandbekämpfung stellt auch einen Widerspruch zum Grundsatz, dass Menschenrettung vor Brandbekämpfung geht, dar. Mit Blick auf die Gefahrenmatrix kann dieser Widerspruch jedoch entkräftet werden. Dieser Trupp sorgt durch die Brandbekämpfung und das Setzen eines mobilen Rauchverschlusses für eine schnelle und effektive Reduzierung der beiden primären Gefahren für die Bewohner, die Ausbreitung und die Atemgifte. Es obliegt folglich der Führungskraft zu entscheiden, welcher Ansatz gewählt wird, um zielführend die Aufgaben abzuarbeiten.

Trotz der dargestellten Diversität und Komplexität dieses Schadereignisses lassen sich einheitliche und strukturierte Einsatzgrundsätze für die Interventionskräfte unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit ableiten.

7.2 Leistungsfähigkeit der Feuerwehr

Mit den Hinweisen zur Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in Baden-Württemberg existieren weitere strategische und taktische Vorgaben für die Bemessungswerte der Feuerwehr im Land. Der Inhalt ist vergleichbar mit dem sogenannten AGBF-Schutzziel, welches weit- aus populärer in der Fläche zur Anwendung und Umsetzung – vor allem im hauptamtli- chen Bereich – gebracht wird. Die bestehende Feuerwehrstruktur und zukünftige Kon- zepte können so auf den Prüfstand gestellt bzw. ausgerichtet werden. Definiert wird auch ein Mindeststandard der Leistungsfähigkeit, wodurch ein flächendeckendes vergleichba- res Sicherheitsniveau gewährleistet werden kann. Mit Hilfe standardisierter Szenarien für den Brandeinsatz und die Technische Hilfeleistung können der erforderliche Kräftebedarf und die Ausstattungsmerkmale einer Feuerwehr charakterisiert werden.⁷⁴ Um dem Be- griff der Leistungsfähigkeit einer Feuerwehr umfänglich gerecht zu werden, müssen die nachfolgenden Bemessungswerte zugleich erfüllt sein:

- Eintreffzeit
- Einsatzkräfte
- Einsatzmittel

Innerhalb eines definierten Zeitraumes müssen die erforderlichen Einsatzkräfte und Ein- satzmittel zur Gefahrenabwehr einsatzbereit zur Verfügung stehen.⁷⁵ Festgelegte Errei- chungsgrade für die Eintreffzeiten und die Hilfsfristen sind nicht definiert.⁷⁶

Um den Kräfte- und Mittelansatz der Interventionskräfte im Betrachtungsszenario des ausgedehnten Kellerbrandes in einem MFH ausreichend beschreiben zu können, ist ein Querverweis auf den sogenannten „Standardbrand“ notwendig. Dieses Standardszenario charakterisiert ein alltägliches Einsatzgeschehen mit hinreichender Auftretenswahr- scheinlichkeit. Die Ausgangslagen der beiden Schadereignisse – Betrachtungsszenario der Brandsimulation und Standardbrand – sind durchaus vergleichbar und ermöglichen ge- genseitige Rückschlüsse. Die Ausgangssituation beim Einsatzszenario des Standardbran- des ist ein Wohnungsbrand in einem Obergeschoss eines Wohnhauses mit bis zu drei Obergeschossen. Zudem ist der erste bauliche Rettungsweg – Treppenraum – verraucht und Bewohner sind in den Obergeschossen unmittelbar gefährdet.⁷⁷

⁷⁴ LFV/IM 2008: 4

⁷⁵ LFV/IM 2008: 4

⁷⁶ LFV/IM 2008: o.S.

⁷⁷ LFV/IM 2008: 5

Der erste Bemessungswert, die Eintreffzeit, ergibt sich aus der Summe von Ausrücke- und Anmarschzeit. Folglich wird hierunter die Zeitspanne vom Abschluss der Alarmierung bis zum Eintreffen an der Einsatzstelle verstanden. Fälschlicherweise wird hierfür oftmals der Begriff der Hilfsfrist als Synonym für die Eintreffzeit verwendet. Eine Hilfsfrist berücksichtigt immer auch die Notrufabfrage und die Disposition der Leitstelle. Die Zeitspanne der Hilfsfrist ist demzufolge größer als die der Eintreffzeit und beinhaltet die Aufsummierung von Ausrücke- und Anmarschzeit sowie Gesprächs- und Dispositionszeit.

In der nachfolgenden *Abbildung 6* sind die korrespondierenden und einsatzrelevanten Zeiten des abwehrenden Brandschutzes dargestellt.

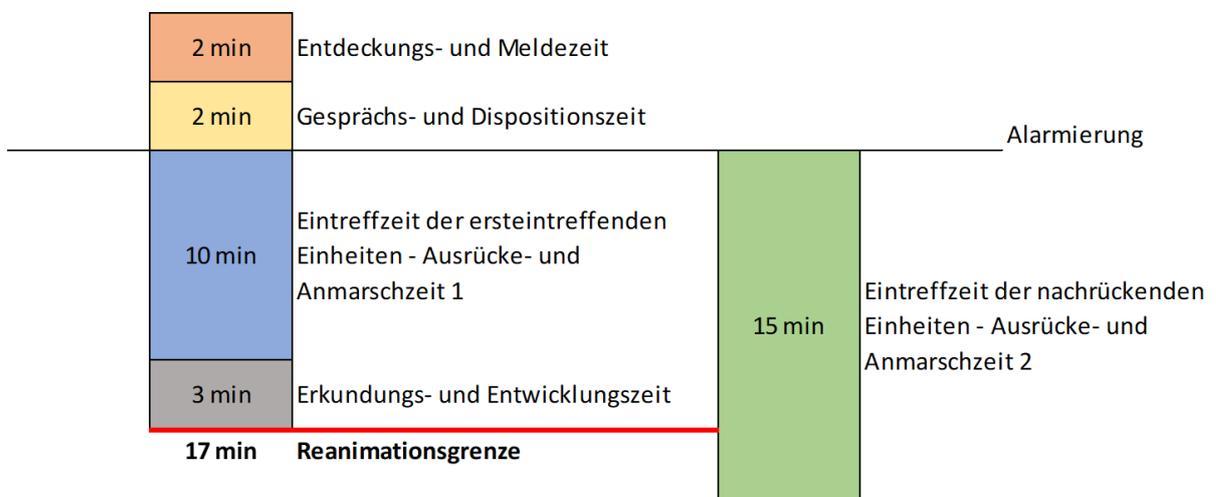


Abbildung 6: Einsatzrelevante Zeiten für den Standardwohnungsbrand in BW (LFV/IM 2008: 7, durch den Autor erstellte Darstellung)

Die Unterteilung der Ausrücke- und Anmarschzeiten und demzufolge der zwei Eintreffzeiten resultiert aus den ersteintreffenden Einheiten (1) und den nachrückenden Einheiten (2).

Durch einen Vergleich der resultierenden Hilfsfristen des AGBF-Schutzzieles und der Beschreibung zur Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in Baden-Württemberg kann folgendes festgestellt werden: Die Gesprächs- und Dispositionszeit ist mit eineinhalb Minuten (AGBF-Schutzziel) zu zwei Minuten (Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in BW) geringer.^{78,79} Die Ausrücke- und Anmarschzeit ist mit acht Minuten (AGBF-Schutzziel) zu zehn Minuten (Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in BW) ebenfalls geringer.^{80,81}

⁷⁸ AGBF 2015: 3

⁷⁹ LFV/IM 2008: 7

⁸⁰ AGBF 2015: 3

⁸¹ LFV/IM 2008: 7

Diese zeitlichen Diskrepanzen schlagen zwangsläufig auf die beiden Eintreffzeiten und Hilfsfristen durch, welche sich nach dem AGBF-Schutzziel um jeweils zweieinhalb Minuten reduzieren.

Für die kombinierte Betrachtung aus Brandsimulation und dem einsatztaktischen Vorgehen der Feuerwehr kann folgende zeitliche Abhängigkeit festgestellt werden: Mit Tätigkeit der Interventionskräfte ist zwischen der Minute 14 und der Minute 17 (Erkundungs- und Entwicklungszeit) zu rechnen. Dieser aufsummierte Ansatz ergibt sich rechnerisch aus *Abbildung 6*. Resultierend hieraus ergibt sich des Weiteren eine ungestörte Brandentstehungs- und Entwicklungsphase im Übergang zur Vollbrandphase (vgl. *Abbildung 5*). Diese zeitlichen Korrespondenzen gilt es zu kennen und anzuwenden, um mit der Simulation eine realitätsnahe Kombination abzubilden.

Die Zielsetzung hinter den Eintreffzeiten und Hilfsfristen ist die Rettung von akut gefährdeten Personen aus dem Gefahrenbereich vor dem Erreichen der sogenannten Reanimationsgrenze. Auf der Basis von aktuellen Erkenntnissen zu medizinischen und rettungstechnischen Grundlagen im Feuerwehrwesen entstand so im Rahmen der O.R.B.I.T.-Studie die Reanimationsgrenze von 17 Minuten.⁸² Nach dieser Zeit sollten die Menschenrettung als zeitkritische Einsatzmaßnahme nach Beginn der Rauchgasintoxikation abgeschlossen und weiterführende Wiederbelebensmaßnahmen eingeleitet worden sein.⁸³ Dieser zeitliche Ansatz kann durch Addition der Einsatzphasen von Entdeckungs- und Meldezeit (2 min), Gesprächs- und Dispositionszeit (2 min), Ausrücke- und Anmarschzeit 1 (10 min) und der Erkundungs- und Entwicklungszeit (3 min) erreicht werden.

Auf die Mindestausstattung der ersteintreffenden und nachrückenden Einsatzmittel soll nicht im Detail eingegangen werden. Bei der initialen Alarmierung durch den Leitstellen-disponent wird anhand der vergleichbaren Lage- und Meldebilder mindestens ein Löschzug zugeordnet. Grundsätzlich soll den ersteintreffenden Einsatzkräften adäquates Material zur Verfügung stehen. Hierunter zählen vier umluftunabhängige Atemschutzgeräte, eine vierteilige Steckleiter, weiterführende feuerwehrtechnische Beladung für den Innenangriff und eine geringe Menge (mind. 500 Liter)⁸⁴ an Löschwasser. Auf das Rettungsmittel der dreiteiligen Schiebleiter als zweiter Rettungsweg muss spätestens mit dem Eintreffen der nachrückenden Kräfte – Eintreffzeit 2 – zurückgegriffen werden können. Bei Gebäuden, bei denen die Rettungshöhe der tragbaren Leitern der Feuerwehr nicht ausreichend ist, muss die Sicherstellung des zweiten Rettungsweges und folglich die

⁸² Kaiser 2010: 3

⁸³ LFV/IM 2008: 7

⁸⁴ LFV/IM 2008: 10

Menschenrettung über ein Hubrettungsfahrzeug der Feuerwehr erfolgen. Ein solches Hubrettungsfahrzeug muss im Rahmen der Menschenrettung nach der Eintreffzeit 1 zur Verfügung stehen.

Der Kräfteansatz und die Funktionsstärke unterscheiden sich zwischen dem AGBF-Schutzziel und den Hinweisen zur Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in Baden-Württemberg. Nach dem AGBF-Schutzziel besteht die Erstangriffseinheit aus zehn Funktionen (Hilfsfrist 1) und die Unterstützungs- bzw. Ergänzungskomponente aus weiteren sechs Funktionen (Hilfsfrist 2). Die Einsatzmaßnahmen in Baden-Württemberg hingegen werden in zwei Gruppen für den Brandeinsatz untergliedert. Die Löschgruppe 1 nach der Eintreffzeit 1 und die Löschgruppe 2 nach der Eintreffzeit 2.

Im Hinblick auf diese Arbeit ist es nicht relevant die Funktionsbesetzung der Einsatzfahrzeuge mit einer Gruppe (1/8) oder einer Staffel (1/5) weiterführend zu untersuchen. Die Anzahl der potenziell zur Verfügung stehenden Trupps unter umluftunabhängigem Atemschutz bleibt unverändert. Für die operativ-taktische Vorgehensweise wurden zwei vollbesetzte Hilfeleistungslöschfahrzeuge mit je einer Löschgruppe gewählt.

Mit der nachfolgenden Auflistung des Kräfte- und Mittelansatzes und der *Abbildung 7* wird die operativ-taktische Struktur für die weitere Erörterung des Kellerbrandszenarios festgelegt:

- **Ersteintreffende Einheiten (Eintreffzeit 1):**
 - Kommandowagen (KdoW) mit Zugführer
 - Hilfeleistungslöschgruppenfahrzeug 1 (HLF 1) mit Fahrzeugführer 1
 - Drehleiter mit Korb (DLK) mit Fahrzeugführer DLK
- **Nachrückende Einheit (Eintreffzeit 2):**
 - Hilfeleistungslöschgruppenfahrzeug 2 (HLF 2) mit Fahrzeugführer 2



Abbildung 7: Operativ-taktischer Kräfte- und Mittelansatz (LFS BW o.J.: o.S., durch den Autor angepasste Darstellung)

7.3 Führungsorganisation

Anhand des gewählten Kräfteansatzes für das Ausgangsszenario des ausgedehnten Kellerbrandes gilt es nun die Führungsorganisation im Hintergrund zu betrachten. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass ein derart dynamisches und komplexes Einsatzgeschehen nicht von einer Führungskraft allein geführt werden kann. In der Führungslehre spricht man daher von einer sogenannten „Zwei bis Fünf Regel“ ($2 \leq x \leq 5$). Mit dieser Regel sollen die minimalen und maximalen Unterstellungsverhältnisse und somit die direkten Ansprechpartner einer Führungskraft im Einsatzgeschehen reglementiert werden. Die untere Schranke mit ≥ 2 beschränkt das kleinstmögliche Unterstellungsverhältnis und sorgt dafür, dass beispielsweise ein Zugführer nicht nur eine Gruppe im Einsatz leitet, sondern mindestens zwei. In seltenen Fällen wäre der Gruppenführer überflüssig und es könnte eine Führungsstufe eingespart werden. Bei solchen Konstellationen mit direkter Eins-zu-eins-Unterstellung treten Informationsverluste auf. Die obere Schranke von ≤ 5 hat einen psychosozialen Hintergrund und begründet sich aus der Leistungsgrenze des Kurzzeitgedächtnisses – Millersche Zahl von 7 ± 2 Informationseinheiten⁸⁵ – in extremen Stresssituationen.

Anhand des in *Abbildung 7* aufgezeigten Kräfteansatzes ergibt sich ein „klassisches“ Unterstellungsverhältnis der zwei Löschruppen mit ihren beiden Gruppen-/Fahrzeugführern und dem Fahrzeugführer des Hubrettungsfahrzeuges zum eingesetzten Zugführer. Für den Einsatz des Hubrettungsfahrzeuges samt seinem Führer ergeben sich grundsätzlich zwei unterschiedliche Optionen: Dieses Fahrzeug kann als selbstständige Einheit in Truppstärke zum Einsatz kommen oder beispielweise dem Fahrzeugführer 1 gänzlich unterstellt werden. Etwaige Konstellationen zur Einbindung des Hubrettungsfahrzeuges in die Führungsorganisation und die Abwägung von Vor- und Nachteilen werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

Der Zugführer fungiert in dieser Zusammensetzung auch als Einsatzleiter und ist folglich taktischer Führer der gesamten Einheit. Als rückwärtige Führungseinrichtung steht ihm die Leitstelle zur Verfügung. Ihm zur Seite gestellt ist ein Führungstrupp unter anderem mit einem Führungsassistenten (FüAss), welcher die Lagedokumentation und Kommunikation mit der Leitstelle übernehmen kann. Kategorisiert werden kann der Gesamteinsatz in die Führungsstufe B „Führen mit örtlichen Führungseinheiten“.⁸⁶

⁸⁵ Glaser 2019: 54

⁸⁶ FwDV 1999: 24

Um das weitere Agieren der Interventionskräfte und die Raumaufteilung der Einsatzstelle besser beurteilen zu können, ist es entscheidend zu wissen, dass ein Löschzug nicht weiter in Einsatzabschnitte (EA) untergliedert werden sollte. Der Löschzug sollte folglich lediglich einen EA bearbeiten, welcher vom Zugführer nach der Auftragstaktik weiter untergliedert werden kann.⁸⁷ Beispielsweise kann eine Gruppe zur Menschenrettung und eine weitere Gruppe zur Brandbekämpfung eingesetzt werden.

Mit der nachfolgenden *Abbildung 8* soll die Raumordnung und die Einsatzstellendynamik mit den ersteintreffenden und nachrückenden Einheiten verdeutlicht werden. Zu erkennen ist der gesamte Löschzug mit dem Hubrettungsfahrzeug vor dem Gebäude zur Menschenrettung und ergänzende Einheiten des Rettungsdienstes und der Polizei.



Abbildung 8: Raumordnung der Einsatzstelle bei einem Kellerbrandszenario

⁸⁷ LFS BW 2012: 9

7.4 Operativ-taktische Vorgehensweise

Um den Kreis zur Einleitung und der erstellten Gefahrenmatrix mit ihrer Priorisierung (*Abbildung 2*) zu schließen, wird im Folgenden das gesamte Betrachtungsszenario mit der Ausgangslage des ausgedehnten Kellerbrandes einsatztaktisch strukturiert aufgearbeitet.

Das übergeordnete Ziel des taktischen Führers ist es die richtigen Mittel zur richtigen Zeit am richtigen Ort nicht nur zur Verfügung zu haben, sondern diese direkt zum Einsatz bringen zu können. Dies setzt eine geordnete Denkweise und ein strukturiertes Handeln voraus. Erschwert wird dieses rationale Vorgehen von der hohen Eigendynamik der Einsatzlage und dem damit verbundenen Einsatzstress, dem Entscheidungsdruck und den Informationsdefiziten.⁸⁸

Der Ablaufplan des Führungsvorgangs, siehe hierzu *Anlage 1 auf Seite A-1*, untergliedert den komplexen Entscheidungsfindungsprozess des eingesetzten Zugführers. Der gesamte Einsatz wird so in einzelne Teilschritte unterteilt, welche sukzessive zu einer positiven Einsatzbewältigung beitragen.

Die Einsatzlage, welche Anlass zur Alarmierung mit dem Stichwort *„Kellerbrand im Mehrfamilienhaus“* gab, ist bereits hinreichend bekannt. Die alarmierten Einsatzkräfte treffen am Feuerwehrgerätehaus ein und legen ihre PSA vollständig an. Entsprechend der hinterlegten Alarm- und Ausrückeordnung (AAO) für ein derartiges Szenario werden die Einsatzfahrzeuge (vgl. *Abbildung 7*) besetzt. Mit dem Verlassen des Feuerwehrgerätehauses wird der Status 3 *„Einsatzauftrag übernommen / Anfahrt zum Einsatzort“* an die Leitstelle übermittelt. Auf Anfahrt befinden sich mit minimalem Zeitversatz nun der KdoW, das HLF 1 und die DLK. Diese Einheiten werden fast zeitgleich und ersteintreffend am Schadensort sein. Grundsätzlich besteht für eingesetzte Führungskräfte unabhängig von der Führungsfunktion, auf der Anfahrt die Option weitere und ergänzende Einsatzinformationen bei der Leitstelle abzufragen. Der Zugführer erhält hier folgende Rückmeldung über Funk:

„Bestätigter Feuerschein aus einem Kellerlichtschacht eines Mehrfamilienhauses. Der Treppenraum soll bereits stark verraucht und nicht mehr passierbar sein. Etliche Bewohner befinden sich vor dem Objekt, es gingen bereits mehrere Notrufe in der Leitstelle ein. Mehrere Bewohner werden noch vermisst. Eine Person befindet sich im zweiten OG hilfereuchend am geöffneten Fenster, aus der Wohnung soll bereits Rauch ausdringen.“

⁸⁸ LFS BW 2016a: 6

Mit dem Eintreffen des KdoW an der Einsatzstelle übermittelt der Zugführer den Status 4 „Ankunft am Einsatzort“ an die Leitstelle. Er bittet seinen Fahrer und FÜAss über die Einsatzstelle hinauszufahren und sich auf der Gegenfahrbahn in Sichtweite zum Brandobjekt zu positionieren. Der Zugführer entscheidet sich trotz der beengten Bebauung und des Innenhofes für eine standardgemäße Fahrzeugaufstellung. Das bedeutet, das erste HLF fährt eine Schlauchlänge über das Objekt hinaus. Der Fahrzeugführer entscheidet sich aufgrund des ersten äußeren Eindrucks vom Objekt und des ersichtlichen Angriffsweges für einen Einsatz mit Bereitstellung. Das zeitgleich eintreffende Hubrettungsfahrzeug positioniert sich ebenfalls im Innenhof direkt vor dem Objekt. Fahrzeugführer HLF 1 und Fahrzeugführer DLK begeben sich zum Zugführer. Der Zugführer erteilt folgende Erkundungsaufträge an die beiden Fahrzeugführer:

- Fahrzeugführer HLF 1: „*Frontal- und Innenansicht*“
- Fahrzeugführer DLK: „*Gesamtansicht und Anleiterbereitschaft prüfen*“

Der Zugführer begibt sich zur wartenden Personengruppe direkt vor dem Gebäude.

Durch die Befragung der Personen und die Lagefeststellung aus den Erkundungsaufträgen der beiden Fahrzeugführer ergibt sich folgendes Gesamtbild:

Frontal- und Innenansicht

Das Alarmstichwort und über Funk konkretisierte Einsatzbild können bestätigt werden. Es dringt dichter schwarzer Rauch mit Flammenbildung aus einem Kellerlichtschacht auf der linken Gebäudeseite. Aus dem obersten Treppenraumfenster dringt ebenfalls dichter schwarzer Rauch. Eine Person befindet sich gebäuderechtsseitig im zweiten Obergeschoss an einem geöffneten Fenster. Aus einem weiteren Fenster in dieser Wohnung dringt leichter Rauch. Eine Innenansicht war nur bedingt möglich, der gesamte Treppenraum ist massiv verraucht. Ersichtlich waren im Eingangsbereich sechs Klingelschilder.

Befragung

Bei seiner Befragung wird dem Zugführer bestätigt, dass sechs Parteien im Objekt wohnen. Vier Parteien konnten das Gebäude selbstständig vor dem Eintreffen der Feuerwehr bereits verlassen. Lediglich die Bewohner aus der Wohnung im 2. OG rechtsseitig und aus dem 1. OG linksseitig befinden sich nicht vor dem Objekt. Die Bewohner berichten weiter, dass in der Wohnung im 2. OG eine junge Familie mit drei Personen lebt und im 1. OG linksseitig eine alleinstehende ältere Dame wohnt. Die Bewohner bestätigen eine starke Rauchentwicklung aus dem Bereich des Kellers. Abschließend lässt sich der Zugführer sämtliche Zugangsschlüssel der anwesenden Bewohner aushändigen.

Rundumsicht und Anleiterbereitschaft

Mit der Rundumsicht werden zudem zwei Bewohner im rückwärtigen Bereich auf einem Balkon im 2. OG rechtsseitig (Frontalansicht) festgestellt. Zudem untermauert er die Dringlichkeit der Rettung. Die Personen sind einem starken Rauchaustritt aus der Wohnung ausgesetzt, eine Person befindet sich sitzend auf dem Balkongeländer. Eine Aufstellungsfläche für die Drehleiter gibt es gebäuderückseitig nicht, ihr Einsatz scheidet dort aus. Die Rettung der Personen ist lediglich über tragbare Leitern möglich.

Der Zugführer entschließt sich dazu, dass ihm die Lagefeststellung zur augenblicklichen Planung ausreicht.

Anhand der erkannten Gefahren erstellt der Zugführer gedanklich die Gefahrenmatrix (*Abbildung 2*) und strukturiert jene nach Dringlichkeit mit einer Priorisierungsreihenfolge.

Auf Grundlage der Gefahrenmatrix bestehen nun diverse Möglichkeiten zur Abwehr der Gefahren:

- Brandbekämpfung im Keller,
- Menschenrettung der Bewohner auf dem Balkon über tragbare Leiter,
- Die Bewohner verbleiben auf dem Balkon und werden betreut, bis der Brand gelöscht ist.
- Menschenrettung der Person am Fenster über Drehleiter oder tragbare Leiter,
- Die Person soll in der Wohnung verbleiben und in einen teilsicheren Bereich zurückziehen.
- Sämtliche Personen werden mit Fluchthauben über den Treppenraum in Sicherheit gebracht.
- Die Menschenrettung der vermissten Person im 1. OG und die Kontrolle des TR.

Anschließend stellt sich der Zugführer selbst die Frage nach weiteren Gefahren, welche in der Planung berücksichtigt werden müssen. Es handelt sich um einen ausgedehnten Kellerbrand mit akut gefährdeten und vermissten Bewohnern in den Obergeschossen. Für den Zugführer muss sichergestellt sein, dass keine Kräfte am Feuer vorbei gehen. Dies hätte eine fehlende oder nicht hinreichende Rückwegsicherung zur Folge und ist nicht vertretbar. Des Weiteren kann der Zugführer bei der Lageeinweisung und Befehlsgebung nachfolgende Gefahrenhinweise an seine Fahrzeugführer weitergeben.

Für die eingesetzten Interventionskräfte ist mit einer enormen thermischen Aufbereitung des Treppenraumes und des Kellerabganges zu rechnen – dem sogenannte Kamineffekt. Die räumliche Struktur des Untergeschosses ist als unübersichtlich und verwinkelt anzunehmen. Die Rückwegsicherung, die Einsatzzeiten der umluftunabhängigen Atemschutzgeräte und die physische und psychische Belastungsgrenze der Einsatzkräfte ist permanent zu kontrollieren. Ein weiteres hohes Gefahrenpotenzial in Kellerbereichen sind die bereits erwähnten „Aufputz“ verlegten elektrischen Installationen und etwaige kleinere Gefahrstoffgebinde in den einzelnen Kellerverschlägen.

Im Folgenden setzt der Zugführer die Optionen zur Gefahrenabwehr in das Verhältnis zueinander. Er strukturiert die Gefahren gedanklich und setzt sie in Verbindung zu den zur Verfügung stehenden Ressourcen. Nachdem er die Optionen abschließend nach ihren Vor- und Nachteilen beurteilt hat, folgt der Entschluss abhängig von den zur Verfügung stehender Einsatzressource.

Mit der folgenden Lageeinweisung und Befehlsgebung legt der Zugführer den Fahrzeugführern seine einsatzrelevanten Absichten, die Einsatzaufträge und potenzielle Nachforderungen offen.

Lageeinweisung

„Brand im Keller eines Mehrfamilienhauses mit sechs Wohneinheiten. Vier Wohneinheiten nach Rücksprache mit den Bewohnern bereits geräumt. Flammenschein bereits am Kellerabgang ersichtlich, der Treppenraum ist massiv verraucht. Auf der Gebäudevorderseite befindet sich eine Person am geöffneten Fenster im 2. OG, aus einem weiteren Wohnungsfenster dringt bereits Rauch. Auf der Gebäuderückseite befinden sich zwei weitere Bewohner derselben Wohnung auf dem Balkon. Diese sind ebenfalls von Atemgiften und zusätzlich von einer Absturzgefahr bedroht. Eine alleinstehende ältere Bewohnerin wird als letzte Wohnpartei noch vermisst. Diese Wohnung befindet sich gebäuelinksseitig im ersten Obergeschoss.“

Der Zugführer weist die Fahrzeugführer noch auf die bereits geschilderten Gefahrenpotenziale des Einsatzszenarios hin. Diese mögen als Gefahrenhinweise an die Einsatzkräfte weitergegeben werden.

Einsatzbefehl

Es werden folgende Befehle an die beiden Fahrzeugführer nach der Auftragstaktik verteilt:

Fahrzeugführer HLF 1

„Brandbekämpfung im Keller, Menschenrettung im 1. OG linksseitig und Menschenrettung am Balkon rückseitig – Sicherheitstrupp auflösen, wird vom HLF 2 gestellt, vor!“

Fahrzeugführer DLK

„Anleiterbereitschaft an der Gebäudevorderseite herstellen, Menschenrettung der Person im zweiten Obergeschoss und anschließend die Wohnung im ersten Obergeschoss linksseitig auf Raucheintrag kontrollieren, vor.“

Diskutiert und stets kritisch betrachtet werden muss die Entscheidung zur Auflösung des Sicherheitstrupps. Dieser Trupp dient dem in Bereiche mit potenziell tödlichen Umgebungsbedingungen vorgehenden Angriffstrupp als taktische Reserve für Atemschutznotfälle. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die vermisste Person sich im Treppenraum oder noch in ihrer Wohnung mit potenziellem Raucheintrag befindet, ist hier die Priorisierung 2 gemäß der Gefahrenmatrix (vgl. *Abbildung 2*) anzusetzen. Den ersten Trupp direkt zur Menschenrettung ins Obergeschoss zu entsenden, widerspricht dem Einsatzgrundsatz „Nie am Feuer vorbei“. Durch eine Ausbreitung des Brandszenarios im Keller und TR hat dieser Trupp keine bestehende Rückwegsicherung mehr. Die Auflösung des Sicherheitstrupps, um ihn gleichzeitig mit dem ersten Trupp in verrauchten Gebäudebereichen einzusetzen, ist folglich stets eine Einzelfallentscheidung. Unter den Prämissen der Menschenrettung, der fehlenden Alternativoptionen und des vertretbaren Risikos, ist diese Entscheidung hier legitim.

Der Zugführer gibt nach erfolgter Befehlsvergabe und den eingeleiteten Maßnahmen, eine erste Rückmeldung mit potenziellen Nachforderungen über Funk an die Leitstelle zu geben. Er übermittelt der Leitstelle das bestätigte Lagebild und greift weitere Inhalte der Lageeinweisung an seine Fahrzeugführer mit auf. Zudem schildert er die eingeleiteten Erstmaßnahmen an der Einsatzstelle. Der Hinweis, dass der bestehende Sicherheitstrupp aufgelöst wurde und dass sich zwei Trupps im Innenangriff befinden, muss ebenfalls übermittelt werden.

Die Nachforderung weiterer Einsatzmittel am Ende der Rückmeldung fällt ausführlich aus. Der Zugführer entscheidet sich aufgrund der kapazitiven Auslastung der Interventionskräfte, einen weiteren Löschzug als taktische Reserve nachzufordern. Zudem fordert er einen übergeordneten Führungsdienst an. Zur Einsatzstelle werden neben der Polizei auch noch umfangreiches rettungsdienstliches und medizinisches Personal alarmiert. Aufsummiert fordert er für jede akut gefährdete oder vermisste Person im Gefahrenbereich mit einer potenziellen Rauchgasintoxikation einen Rettungswagen an, in Summe vier Stück. Zudem lässt er zwei Notarzteinsatzfahrzeuge und eine Schnelleinsatzgruppe (SEG) Betreuung für die betroffenen Bewohner vor dem Objekt nachfordern.

Nach Beendigung des Funkgesprächs mit der Leitstelle trifft als nachrückende Einheit das HLF 2 an der Einsatzstelle ein. Der Zugführer begibt sich zum Fahrzeugführer 2, gibt ihm eine Lageeinweisung und schildert alle bereits eingeleiteten Maßnahmen. Zudem erfolgt auch hier der Hinweis, dass es momentan keinen Sicherheitstrupp an der Einsatzstelle gibt. Der Zugführer erteilt nachfolgenden Befehl:

Fahrzeugführer HLF 2

„Sicherheitstrupp für beide Gruppen stellen, Kontrolle Treppenraum und Abluftöffnungen schaffen, Überdruckbelüftung vorbereiten, vor!“

Der Zugführer sondiert die ersten Einsatzmaßnahmen und kann möglicherweise weitere Gefahren feststellen. Folglich müsste der Ablaufplan erneut durchlaufen werden. Sollten weitere Gefahren ausgeschlossen werden können und die bestehenden Gefahren beseitigt worden sein, stehen nachfolgende und abschließende Maßnahmen an. Exemplarisch fällt hierunter die Kontrolle sämtlicher WE im Objekt auf etwaigen Rauch- und Schadstoffeintrag. Sollte hier nach der optischen Kontrolle keine Feststellung bezüglich einer Gesundheitsbedenklichkeit bestehen, können die Bewohner in ihre Wohnungen zurückkehren. Mit der Beseitigung aller Gefahren endet der Einsatz für den abwehrenden Brandschutz. Die Einsatzstelle kann abschließend der Polizei zur weiteren Brandursachenermittlung, der Hausverwaltung und den Wohnungseigentümern übergeben werden. Das Einsatzende für die Feuerwehr wird letztlich mit einer Lagemeldung an die Leitstelle übermittelt.

7.5 Grundlagen der Brandbekämpfung und der taktischen Ventilation

Das taktische Vorgehen des Angriffstrupps zur Brandbekämpfung im Kellergeschoss und das Setzen eines Mobilen Rauchverschlusses im Bereich des Kellerabschlusses hat eine primäre Priorität. Durch den teilweisen Verschluss der Öffnungsfläche erfolgt im Keller-raum eine Schichtung der Brand- und Rauchgase. Der weitere Rauch- und Schadstoffübertritt in den TR kann so weitestgehend unterbunden bzw. minimiert werden. Mit vorangeschrittener Brandbekämpfung, der Kenntnis einer vorhandenen Abluftöffnungsfläche im Kellerbereich und weiteren Abluftöffnungsflächen im Treppenraum kann tendenziell mit einer maschinellen Belüftung des Objektes nach Information der im Gebäude befindlichen Trupps begonnen werden. Das Prinzip der Entrauchung ist hierbei die Rauchabfuhr durch Verdünnung in Kombination mit einer gerichteten Luftströmung. Der toxische Brandrauch und die thermisch aufbereiteten Brandgase werden gezielt mit nicht kontaminierter Luft vermischt und abgeführt.⁸⁹ Die maschinelle Belüftung dient als Unterstützung und Beschleunigung des natürlichen Lüftungsprozesses. Bei einem geringen relativen Überdruck bezogen auf die Umgebungsbedingungen wird im Objekt ein gerichteter Luftkanal erzeugt.⁹⁰ Dieser Luftkanal „spült“ förmlich die durchdrungenen Volumina aus. Toxische Verbrennungsprodukte und erhöhte Rauchgastemperaturen werden über die Abluftöffnungsflächen an die Umgebung abgegeben. Diese Maßnahme erfolgt stets zur Sicherung der Rettungswege (horizontal und vertikal), zur Erhöhung der Überlebenschance von vermissten Personen und zur Unterstützung und Erleichterung der Menschenrettung und Brandbekämpfung von Interventionskräften. Im Falle eines Kellerbrandes ist die zeitkritischste Maßnahme die Kontrolle des verrauchten Treppenraumes. Solange dieser nicht umfassend kontrolliert wurde und die Brandbekämpfung im Untergeschoss nicht erfolgreich eingeleitet wurde, darf keine maschinelle Überdruckbelüftung erfolgen.⁹¹

Durch gezielte Steuerung der einsatztaktischen Kombinationen aus taktischer Ventilation, dem Schaffen von Abluftöffnungsflächen, ersten Brandbekämpfungsmaßnahmen und dem Setzen des Rauchverschlusses kann so die Fremdrettung durch die Feuerwehr über den notwendigen Treppenraum zeitnah aufgenommen werden. Diese zeitlich korrespondierenden Abläufe werden in der weiteren Deutung der Simulationsergebnisse in Bezug auf den abwehrenden Brandschutz einen hohen Stellenwert einnehmen.

⁸⁹ VDMA 2017: 8

⁹⁰ LFS BW 2016b: 1

⁹¹ LFS BW 2016b: 23

8 Die Brand- und Rauchgassimulation

8.1 Randparameter

Im Folgenden werden sämtliche Randparameter bezüglich der Brandsimulation sowie die gewählten Modellierungsansätze offengelegt. Dies soll maximale Transparenz und besseres Verständnis der Simulation schaffen.

8.1.1 Simulationsdauer

Die benötigte Simulationsdauer richtet sich vorrangig nach den Gegebenheiten der Personensicherheit und dem Selbst- oder Fremdrettungsverhalten. Korrespondierende Zeiten hierzu werden sowohl im TR, als auch in den WE erhoben und ausgewertet. Hinzu kommt die Beobachtung der Bedeutsamkeit von Interventionsmaßnahmen der Einsatzkräfte. Diese Kombination macht es nötig einen Zeitansatz von 1800 s (= 30 min) für den Simulationsdurchlauf zu definieren. Dies begründet sich aus der Erkenntnis, dass mit ersten Brandbekämpfungs- und Menschenrettungsmaßnahmen zwischen Minute 14 und Minute 17 zu rechnen ist (siehe *Abbildung 6*). Dies gilt nur unter idealen Bedingungen der Alarmierungskette, wenn mit dem Brandausbruch die Entdeckungs- und Meldezeit zu laufen beginnt. Eine automatische Brandfrüherkennung muss nicht berücksichtigt werden, da eine solche nicht bauordnungsrechtlich vorgeschrieben ist. Da bereits eine Minute nach Brandausbruch dichter schwarzer Rauch aus dem gekippten Kellerlichtschacht dringt, kann mit einer hinreichenden Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass eine zweiminütige Entdeckungs- und Meldezeit als konservative Annahme realistisch ist. Ein zusätzlicher zeitlicher Puffer wird nicht berücksichtigt. Die Alarmierungskette der Einsatzkräfte und auch der Hausbewohner wird folglich durch einen aufmerksamen Nachbarn ausgelöst. Das Brandgeschehen im Kellerbereich und die Selbstrettungsphase der Bewohner laufen in den ersten 14 bis 17 Minuten ohne fremde Einflussnahme ab. Für die Bewertung der einsatztaktischen Herangehensweise bleibt ein Zeitansatz zwischen 13 und 16 Minuten. Dies wird als ausreichend bewertet. In diesem Zeitraum ist mit dem Agieren von mindestens zwei Trupps im Innenangriff zu rechnen. Die ergänzenden und abschließenden Maßnahmen der Einsatzkräfte mit einem Zeitansatz von > 30 min werden nicht betrachtet.

8.1.2 Simulationsablauf

Mit der Beschreibung der Simulationsdurchführung wird das Grundgerüst für sämtliche Berechnungs- und Auswertungsdurchläufe verankert. Die Mesh- und Raummodellierung bleibt über alle Simulationen unverändert. Dies gewährleistet die Übertragbarkeit und die Reproduzierbarkeit von Auswertungsergebnissen auf das Gesamtsystem.

Die Hauptvariation ergibt sich aus dem kritischsten Element, der Türleckagerate der wohnungsseitigen Abschlüsse. Hier wird sowohl eine wahrscheinliche (0,01 m²), als auch eine konservative Variante (0,02 m²) der dichtschießenden Abschlüsse zur Anwendung kommen, nachfolgend betitelt mit „LEAK_1“ und „LEAK_2“.

Hierunter gliedert sich die Variation der zwei Optionen der REAC-Eingabe, betitelt mit „REAC_1“ und „REAC_2“. Die anteilmäßigen Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten sind der *Tabelle 5* zu entnehmen. Die Entscheidung fiel auf eine realitätsnahe Ausbeute der Brandlasten in Wohnungskellern und eine konservative Variante. Überprüft wird so das modellierte Gesamtsystem auf eine anteilmäßige Erhöhung der Ausbeuten, auch in den WE.

Appliziert wird letztendlich noch die Einflussnahme der Feuerwehr gekennzeichnet mit dem Zusatz „FW“. Diese Variation der Aktivierungs- und Deaktivierungszeiten von Objekten kommt lediglich im Hinblick auf die realitätsnahen Ausbeuten (REAC_1) zur Anwendung. Dies hat den Hintergrund, dass die konservativen Ausbeuten (REAC_2) bereits durch einen Standarddurchlauf validiert werden können.

In Summe werden sechs Brand- und Rauchgassimulationen mit einer Betrachtungszeit von jeweils 1800 s berechnet und ausgewertet. In der nachfolgenden *Tabelle 6* sind die Konstellationen mit entsprechender Namensgebung aufgeführt.

Tabelle 6: Bezeichnungen der Brand- und Rauchgassimulationen

Simulationsnummer	LEAK	REAC	FW	Simulationstitel
S_1	LEAK_1	REAC_1	-	S_1_LEAK_1_REAC_1
S_2	LEAK_1	REAC_1	FW	S_2_LEAK_1_REAC_1_FW
S_3	LEAK_1	REAC_2	-	S_3_LEAK_1_REAC_2
S_4	LEAK_2	REAC_1	-	S_4_LEAK_2_REAC_1
S_5	LEAK_2	REAC_1	FW	S_5_LEAK_2_REAC_1_FW
S_6	LEAK_2	REAC_2	-	S_6_LEAK_2_REAC_2

8.1.3 Erleichterungen

Zur Konkretisierung der Modellierungsansätze müssen noch einige Annahmen und Erleichterungen hinzugefügt werden.

Das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen und Tragwerken wird nicht berücksichtigt. Dies würde den Modellierungs- und Rechenaufwand enorm erhöhen und ist für die weiterführende Deutung des Ausgangsszenarios nicht weiter von Relevanz. Die thermodynamische Betrachtung endet folglich an einer Mesh-Grenze oder einer Objektdefinition. Die hiermit einhergehenden Berechnungsungenauigkeiten werden akzeptiert.

Als Vereinfachung ist auch die räumliche Gegebenheit im Untergeschoss des MFH zu betrachten. Hier wird lediglich der offene Keller- und Lagerraum als Brandentstehungsort modelliert. Angrenzende Räumlichkeiten im Untergeschoss wie ein Hauswirtschaftsraum, ein Fahrrad- oder Müllraum und der Zugang zur Tiefgarage werden vernachlässigt. Die weiteren Abschlussöffnungen im Untergeschoss können als geschlossen angesehen werden.

Ebenfalls nur angedeutet und nicht vollständig ausgeführt werden die WE der Bewohner. Die gesamten Fenster- und Ventilationsöffnungen werden nicht detaillierter spezifiziert. Eine Variation dieser Öffnungsflächen scheidet aufgrund der enormen Rechen- und Auswertungszeiten aus. Es wurde eine Ausgangslage des Bemessungsbrandszenarios festgelegt.

Grundsätzlich ist in dieser Simulation von einem unterventilierten Brandgesehen auszugehen. Die modellierten Öffnungsflächen lassen hier nur wenig Spielraum zu. Der Bemessungsbrand kann aufgrund unzureichender Sauerstoffzufuhr zudem ein pulsierendes Brandverhalten aufweisen. Dies kann eine spontane Rauchgasdurchzündung und eine Flammen- und Verbrennungsverlagerung zur Folge haben. Dieses Verhalten wird in einem gewissen Rahmen geduldet und nicht durch weitere Zuluftöffnungsflächen beschönigt. Das Ausgangsszenario des ausgedehnten Kellerbrandes soll hier bewusst – unter Beachtung der Iterationsschritte zu Druck- und Geschwindigkeitsungenauigkeiten – aufrechterhalten werden.

8.2 Mesh-Anordnung

Beginnend mit der gewählten Mesh-Konfiguration soll die gesamte Brand- und Rauchsimulation erläutert und detailliert beschrieben werden. Die Grundlagen zu den Netzausrichtungen, der Netzwerkstruktur und der Bestimmung der Rechengitterweite wurden bereits ausführlich im theoretischen Teil dieser Arbeit behandelt (vgl. Kapitel 4.5 *Bestimmung der Rechengitterweite*).

Im Rahmen dieser Brandsimulation wurde ein Seitenverhältnis von 1:1 mit einer nominalen Kantenlänge von $\delta x = 0,15$ m definiert. Diese optimale Gitterstruktur wurde gewählt, um potenziellen Ungenauigkeiten vorzubeugen und um geradlinige Kontrollvolumina zu generieren. Die Entscheidung zwischen einem Multiplen-Mesh-System und einem globalen Berechnungsgitter ist auf ein Zwei-Mesh-System gefallen. Dies wird mit der nachfolgenden *Abbildung 9* dargestellt. Zu sehen sind die beiden identischen Rechengitter im Untergeschoss des MFH. Eine Kellerabschlusstüre zum TR ist nicht vorhanden. Die Annahme der Ausgangssituation sieht einen ungehinderten Eintrag der Brandexpositionen in den TR vor, weil der ungünstigste Fall - eine offenstehende Kellerabschlusstür - nachgebildet werden soll. Die Türlarge misst 1,05 m x 2,1 m und gibt eine Öffnungsfläche von $A_{\text{offen}} = 2,205$ m² frei.

- Mesh 1 (rechtsseitig): Treppenraum, Wohnbereich, Hauseingang und TR-Fenster
- Mesh 2 (linksseitig): Keller- und Brandraum und Kellerlichtschacht

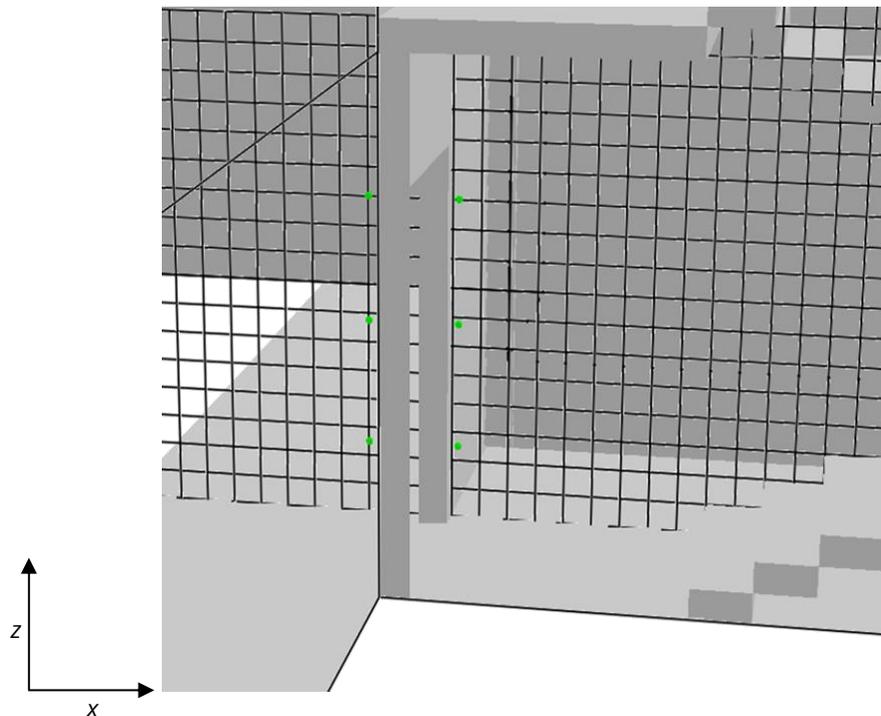


Abbildung 9: Mesh-Übergang im Untergeschoss des Mehrfamilienhauses. Die in der Abbildung dargestellten grünen Punkte zeigen die Position der Pre- und Post-Mesh-Devices

Unter Berücksichtigung der potenziellen Schnittstellenproblematiken an den Mesh-Grenzen und der korrekten Werteübergabe wurde auch für das zweite Mesh die identische nominale Kantenlänge und das quadratische Seitenverhältnis festgelegt. Diese ganzzahligen Verhältnisse mit identischen Teilungsfaktoren haben zur Folge, dass keine Gitterweitenverfeinerung stattfindet und somit eine Sensitivitätsstudie entfallen kann. Dieser unproblematische Aufbau ist die ideale Art der Ausrichtung von Mesh zu Mesh. Das Stabilitätskriterium wird folglich nicht verletzt. Dieses Zwei-Mesh-System liefert eine Optimierung bezüglich der Gitteranzahl und folglich eine effektivere und schnelle Rechenzeit mit geringerer Rechenkapazität. Im Gegensatz zu einem globalen Berechnungsgitter über allem entsteht so ein deutlich geringer Berechnungstotraum. Ein Nachteil eines Mehrmaschensystems ist die Schnittstellenproblematik und die Werteübermittlung von Mesh zu Mesh. Diese Netzübergabeparameter werden in der Brandsimulationen mit gezielten Devices – ebenfalls dargestellt in *Abbildung 9* – über den gesamten zeitlichen Simulationsverlauf verifiziert und auf deren Plausibilität hin überprüft.

Die nachfolgende *Tabelle 7* stellt die Netzwerkkonfiguration mit der zugehörigen Zellenanzahl in Abhängigkeit der nominalen Kantenlänge und der Volumina dar.

Tabelle 7: Netzwerkkonfiguration – Gitterweite, Volumina und Zellenanzahl

Mesh	Beschreibung	Gitterweite δx in m	Volumen in m^3	Zellenanzahl
1	stairwell, apartments and front door	0,15	485,352	143 808
2	area on fire - basement	0,15	235,008	69 632
			Summe	213 440

8.3 Raumanordnung

Als Orientierung für die Raum- und Bauteilgestaltung diente ein originaler Bauantrag von 2019 für zwei Mehrfamilienwohnhäuser in der näheren Umgebung von Frankfurt am Main. Bei der Umsetzung wurde stets auf eine Verhältnismäßigkeit zwischen den Raumgeometrien in FDS und dem realen Bauvorhaben geachtet. Aufgespannte Grundflächen, resultierende Volumina und Wohnungs- und Raumübergänge wurden bestmöglich unter Beachtung der Berechnungsgitterweite umgesetzt.

8.3.1 Keller- und Brandraum

Bei der Kellergrundfläche handelt es sich um eine $8,7 \text{ m} \times 9,6 \text{ m} = 83,52 \text{ m}^2$ große Fläche. Mit einer Kellerdeckenhöhe von $2,55 \text{ m}$ hat der Kellerbereich ein Volumen von $212,98 \text{ m}^3$. Im Untergeschoss befinden sich Kellerverschläge aus Holz. Diese Holzverschläge werden im Pyrolysemodell unter Beachtung der Ausbeuten mitbetrachtet. Es wird ein ausgedehnter Kellerbrand angenommen, folglich ist ein Fünftel der Gesamtkellerfläche als Brandfläche definiert, was einer Fläche von $4,2 \text{ m} \times 4,2 \text{ m} = 17,64 \text{ m}^2$ entspricht. Zudem ist die Brandfläche außermittig gelagert. Mit der nachfolgenden *Abbildung 10* wird der Keller- und Brandraumbereich und die Brandfläche (weiß) dargestellt.

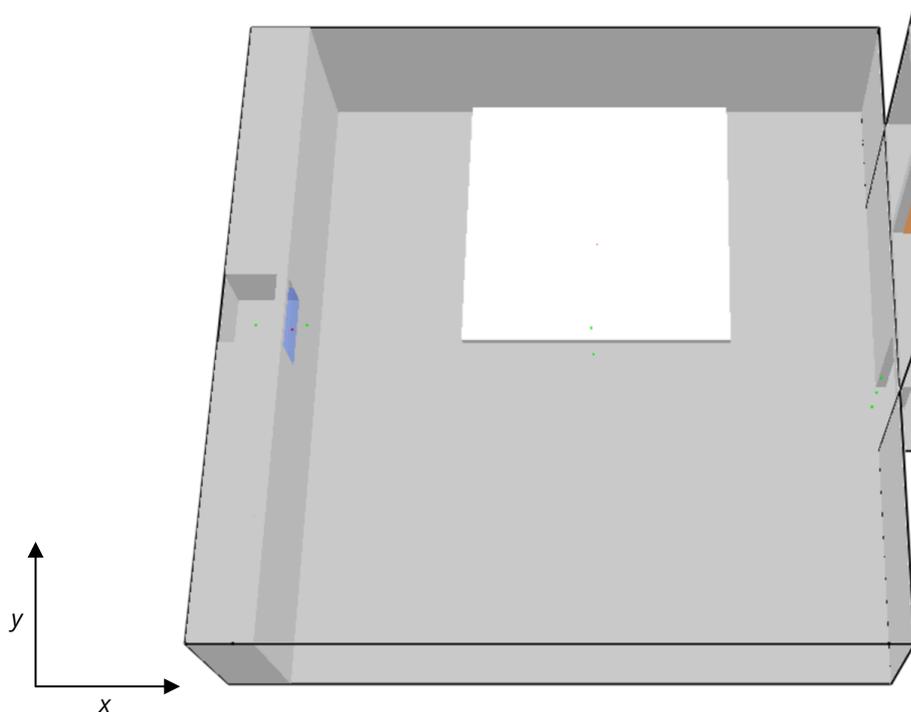


Abbildung 10: Keller- und Brandraum der FDS-Simulation in SMV

8.3.2 Treppenraum

Der notwendige TR des MFH (dargestellt in *Abbildung 11*) stellt das zentrale Element der Brandsimulation dar. Der erste Rettungsweg der Bewohner führt über die gegenläufige Podesttreppe mit einer Breite von 1,20 m. Auf einer Grundfläche von 12,96 m² erstreckt sich der TR mit einem absoluten Volumen von 208 m³ in die Höhe. Die OK FFB des Dachgeschosspodestes befindet sich auf einer Gesamthöhe von 13,5 m. Wird das Bezugsmaß des Untergeschosses und der Eingangsbereich – OK FFB Eingangsbereich = +/- 0,00 m – berücksichtigt, so liegt das Dachgeschoss auf einer Höhe von 12,15 m. Der TR hat eine enorme thermodynamische und strömungsmechanische Bedeutung in Bezug auf die thermische Aufbereitung (Kamineffekt) und die toxische Schadstoffexpansion. Für die zeitliche Entfluchtung der Bewohner in den Obergeschossen vor dem Eintreffen der Interventionskräfte – Selbstrettungsphase – wird die Datenerhebung entscheidend sein. Zudem dient der TR im weiteren Brandverlauf als Angriffsweg der Einsatzkräfte, sowohl für die Menschenrettung als auch für die Brandbekämpfung.

Als Orientierung für den TR diene die Lehrveranstaltung von Manuel Osburg „*Einführung in die Brandsimulation*“ an der Hochschule Magdeburg-Stendal.⁹²

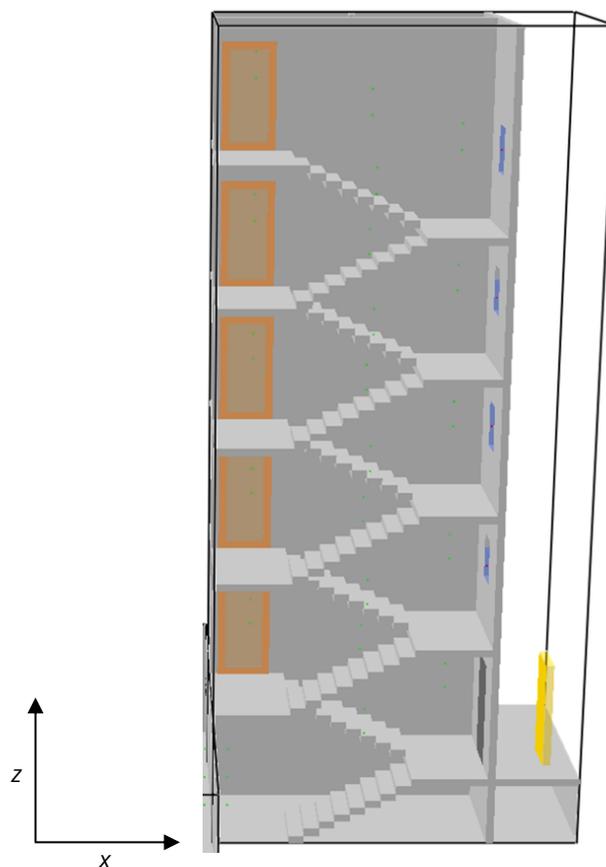


Abbildung 11: Treppenraum der FDS-Simulation in SMV

⁹² Osburg 2020: o.S.

8.3.3 Wohneinheiten

Der simulierte Wohnraum erstreckt sich über die Rückseite des TR, siehe hierzu *Abbildung 12*. Die dichtschießenden Wohnungsabschlüsse führen auf die einzelnen Geschosspodeste im TR. Aus rechenkapazitiven Gründen wird lediglich ein Wohnungsabgang je Geschoss berücksichtigt. In der Realität ist mit zwei oder mehr WE je Geschoss und mindestens einer ausgebauten Dachgeschosswohnung zu rechnen. Dies wird in der weiteren Simulations- und Ergebnisdeutung einen hohen Stellenwert einnehmen. Oberhalb der Erdgeschosswohnung (Hochparterre) liegen so über die gesamte Gebäudehöhe vier weitere Wohnungen. Die idealisierten WE haben eine Grundfläche von $1,65\text{ m} \times 5,4\text{ m} = 8,91\text{ m}^2$ und eine Raumhöhe von $2,55\text{ m}$. In Summe wird so ein Volumen je WE von $22,72\text{ m}^3$ aufgespannt. Diese WE entsprechen so keiner realen Nutzung durch Bewohner, es ist dort eigentlich mit Wohnflächen von 40 m^2 bis 80 m^2 zu rechnen. Da die Rauchausbreitung innerhalb der WE nicht von Relevanz ist, sondern lediglich der Raucheintrag in die WE, genügt eine unvollständige Ausbildung der WE.

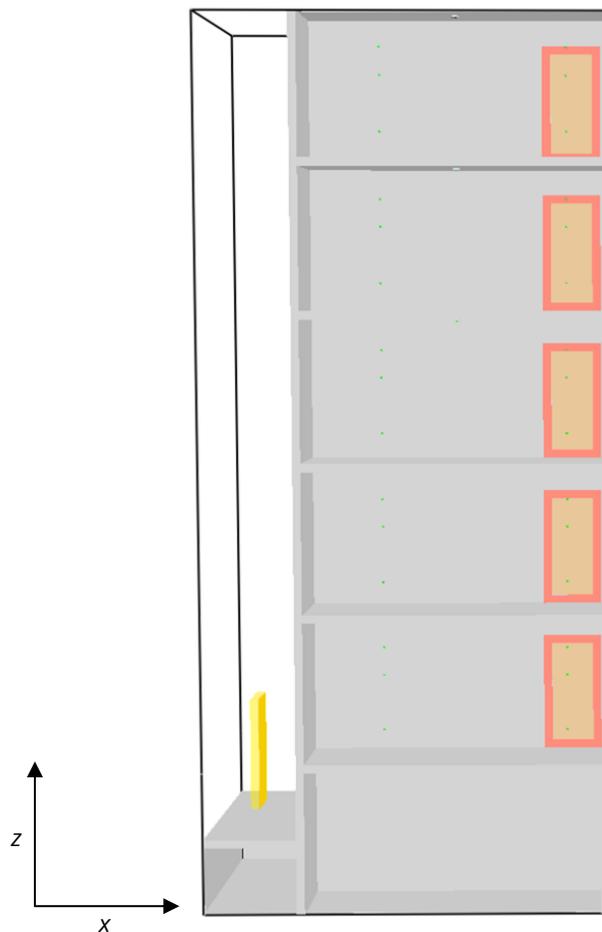


Abbildung 12: Wohneinheiten der FDS-Simulation in SMV

8.4 Objektanordnung

Anhand der beschriebenen Raumanordnung in der FDS-Brandsimulation muss nun detailliert auf die spezifische Objektanordnung eingegangen werden. Bisher wurden lediglich Raumgeometrien mit Hilfe von Wand- und Deckenobjekten und den Mesh-Begrenzungen erzeugt und aufgezeigt. Entgegen der Realität wird in dieser Brandsimulation auf eine thermodynamische Beteiligung einzelner Objekte und Bauteile verzichtet. Das Trag- und Verformungsverhalten und die objektspezifischen Materialeigenschaften werden aus Gründen der Zweckdienlichkeit vernachlässigt. Objekte und Mesh-Grenzen fungieren als Raum- und gleichzeitig als Systemabschluss. Eine weitere Besonderheit ergibt sich aus den Zu- und Abluftöffnungen im Berechnungsgebiet. Diese Öffnungen (*HOLE*) müssen stets über die Objektmaße hinaus in das weitere Rechengitter hineinragen, um die Entropie-Gegebenheiten nicht zu verfälschen.

8.4.1 Lichtschacht

Bei dem Kellerlichtschacht (*Abbildung 13*) handelt es sich um einen Durchbruch in mehrere Wandobjekte. Dieser Lichtschacht ist zu allen Seiten strömungs- und thermodynamisch durch Objekte und Mesh-Grenzen abgeschlossen. Der Realität entsprechend ist der Lichtschacht nach oben hin durch eine offene Mesh-Grenze definiert. Folglich findet hier ein Energie- und Stoffmassenstrom mit der Umgebung statt. Über diese Ventilationsöffnung wird das Brandgeschehen mit Sauerstoff versorgt. Gleichzeitig können thermische und toxische Rauchausbeuten abgeführt werden.

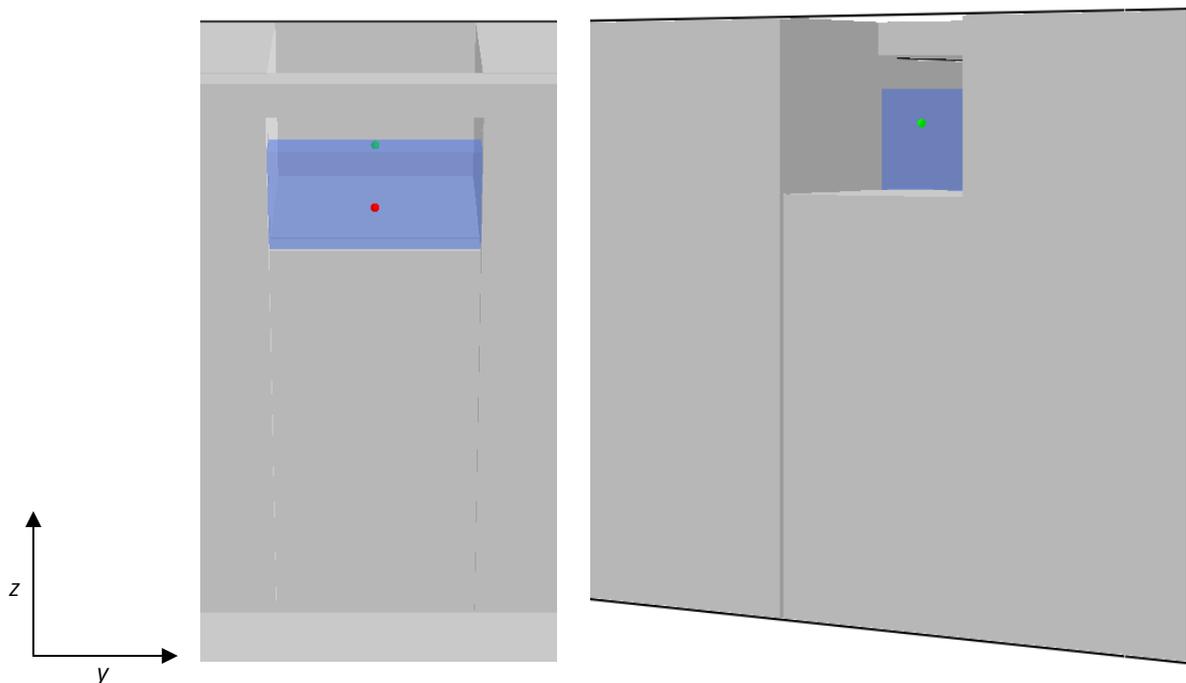


Abbildung 13: Kellerlichtschacht mit Verglasung der FDS-Simulation in SMV. Zu erkennen ist ein Luftspalt im oberen Fensterbereich, dieser simuliert das angekippte Lichtschachtfenster.

Diese Zu- und Abluftöffnungsfläche von $A_{\text{offen}} = 0,75 \text{ m} \times 1,05 \text{ m} = 0,7875 \text{ m}^2$ muss folglich realitätsnah reglementiert werden. Dies geschieht über die Modellierung einer Einfachverglasung mit einer Stärke von 3 mm. Diese primitive Form der Verglasung gibt in der Realität die gesamte Öffnungsfläche nach einer thermischen Beaufschlagung von 300 bis 360 °C frei.⁹³ Für das Platzen der Fensterscheibe wird in der Brandsimulation eine Temperatur von 300 °C angesetzt. Zudem kann das Fenster von Einheiten der Feuerwehr geöffnet werden. Deutlich zu erkennen in *Abbildung 13* ist der Luftspalt im oberen Fensterbereich. Dies simuliert ein gekipptes oder angelehntes Kellerfenster und gibt bereits zu Beginn eine Fläche von $A_{\text{Kipp}} = 0,315 \text{ m}^2$ frei. Neben einer realitätsnahen Spaltenbreite des Fensters kann so ein realitätsnaher Leckagepfad für die Druckentlastung ausgehend vom Brandereignis geschaffen werden. Bauliche und natürliche Leckagen hingegen sind nicht zu unterschlagen. Diese reichen von der Permeation durch Wände und Türen bis hin zu offenen Versorgungs- und Kabelschächten. Diese Leckagen müssen in FDS händisch eingefügt werden, da sämtliche Raumabschlüsse, Mesh-Grenzen und Objekte eine idealisierte Dichtigkeit von 100 % aufweisen. Dies ist von hoher Relevanz für eine erfolgreiche Simulationsberechnung ohne numerische und druckbelastete Instabilitätsfehler.

8.4.2 Stufengeometrien

Mit einem Steigungsmaß von 0,15 m und einem Auftrittmaß von 0,30 m sind die Stufen optimal an die nominale Kantenlänge einer Gitterzelle von $\delta x = 0,15 \text{ m}$ angepasst (siehe *Abbildung 14*). Reale Geometrien mit einer flachen Treppenunterseite können so nur angenähert abgebildet werden. Auf die korrekte Deutung von turbulenten Strömungsregimen im TR muss daher besonders Acht gegeben werden. Abgriffe einzelner Auswertepunkte direkt unterhalb der Treppenstufen wären folglich fehlerbehaftet.

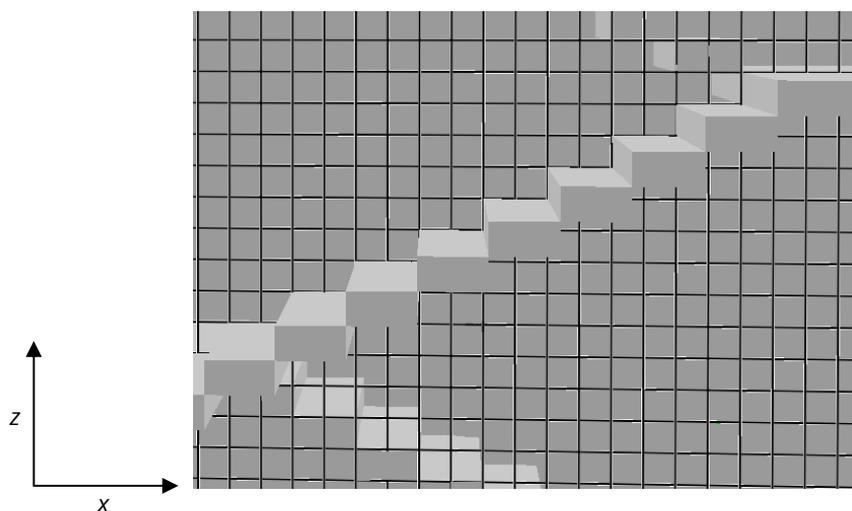


Abbildung 14: Stufengeometrie der FDS-Simulation in SMV

⁹³ Zehfuß 2020: 50

8.4.3 Treppenraumfenster

Im TR sind vier Fensteröffnungsflächen auf einer gemittelten Höhe der Abluftöffnungsflächen von 1,50 m angeordnet. Zu sehen ist dies in *Abbildung 15*. Diese Fenster geben eine jeweilige Öffnungsfläche von $A_{\text{offen}} = 0,6 \text{ m} \times 0,9 \text{ m} = 0,54 \text{ m}^2$ frei. Die Fenster münden in den Bereich vor dem Wohnobjekt. Dieser ist durch entsprechende offene Mesh-Grenzen definiert und ermöglicht einen Energie- und Massenaustausch über das Berechnungsgitter hinaus. Die aufsummierten Zu- und Abluftöffnungsflächen von $A_{\text{offen, gesamt}} = 2,16 \text{ m}^2$ müssen ebenfalls realitätsnah reglementiert werden. Für die Treppenraumverglasung wurde der Ansatz einer Doppelverglasung mit einer temperaturseitigen Zerstörung von 600 °C gewählt.⁹⁴ Mit einem Bersten der Scheiben aufgrund hoher Brandthermik ist folglich nicht zu rechnen. In Rücksprache mit der LFS BW werden für die weitere Simulationsbetrachtung korrespondierende Zeiten für das Handeln der Interventionskräfte im TR festgelegt. Hierunter fällt beispielsweise die Kontrolle des TR auf bewusste Personen und das Schaffen von Abluftöffnungsflächen für die natürliche und taktische Ventilation. Das Schaffen von Abluftöffnungsflächen wird realisiert durch das Entfernen der Fensterverglasung zu festgelegten Deaktivierungszeiten. Zu Beginn der Simulation befinden sich zwei dieser Fenster – Zwischenpodest EG zu 1. OG und 2. OG zu 3. OG – in einem gekippten Zustand. Zum einen dient dies dem Druckausgleich im Objekt, zum anderen ergibt sich ein Realitätsbezug. Durch die beiden gekippten Fenster wird in Summe eine Öffnungsfläche von $A_{\text{Kipp}} = 0,36 \text{ m}^2$ freigegeben.

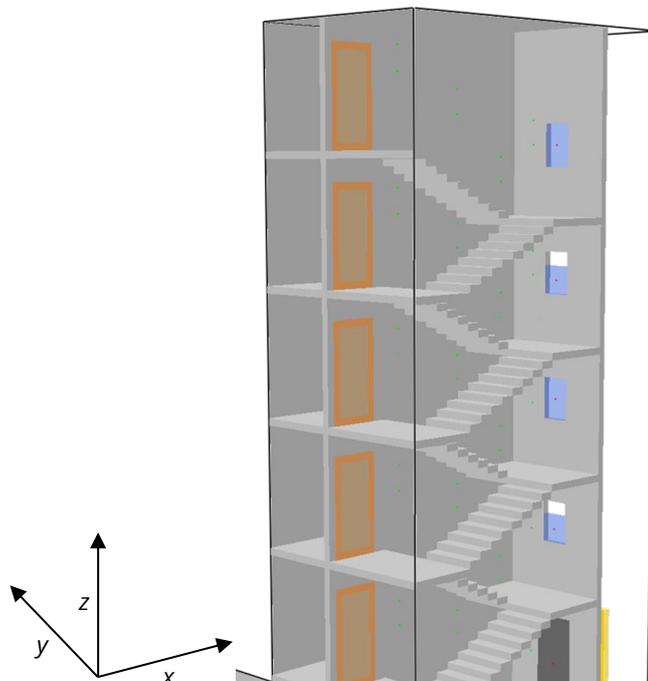


Abbildung 15: Treppenraumöffnungsflächen der FDS-Simulation in SMV

⁹⁴ Zehfuß 2020: 50

8.4.4 Gebäudeabschlussöffnung

Der ebenerdige Hauseingang mündet genau wie die TR-Fenster in den offenen Mesh-Bereich vor dem Objekt. Dieses Areal kann als Frontalansicht auf das Wohnobjekt bezeichnet werden und verfügt über die straßenseitige Anbindung. Der erste Rettungsweg (notwendiger Treppenraum) der Bewohner führt durch diesen Gebäudeabschluss vor das Objekt und folglich in den sicheren Bereich. Im geöffneten Zustand gibt die Türe eine Öffnungsfläche von $A_{\text{offen}} = 1,05 \text{ m} \times 2,1 \text{ m} = 2,205 \text{ m}^2$ frei. Eine Öffnung dieses Gebäudeabschlusses erfolgt durch die erkundenden Führungskräfte oder durch die ersten vorgehenden Trupps im Innenangriff. Die Zuwegung ist demzufolge auch der erste Angriffsweg für die Menschenrettung und Brandbekämpfung. Modelliert wurde die Eingangstüre mit der Materialbeschaffenheit von Aluminium und einer zusätzlichen Aktivierungszeit. Die Ermittlung dieser Zeit erfolgt in enger Rücksprache mit der LFS BW und soll einen realitätsnahen Praxisbezug beinhalten. Folgerichtig ist diese Zeit vor der Aktivierungszeit von Abluftöffnungsflächen über die Treppenraumfenster anzusetzen (siehe *Tabelle 10*).

8.4.5 Taktische Ventilation - Überdruckbelüftung

In verschiedenen Simulationsdurchläufen findet eine Gegenüberstellung der Brand- und Rauchgassimulation mit und ohne Maßnahmen der Feuerwehr statt. Ergänzend zu dem Schaffen von Abluftöffnungsflächen und dem Öffnen von Angriffszuwegungen, kann durch die Interventionskräfte eine taktische Ventilation vorgenommen werden. Die Aktivierungszeit dieser Maßnahme muss nach dem Öffnen der Gebäudeabschlussöffnung und dem Schaffen von Abluftöffnungsflächen über die Treppenraumfenster angesetzt werden. Eine detaillierte Schilderung der Aufgabenpriorisierung der Interventionskräfte im TR erfolgte in Kapitel 7.4 *Operativ-taktische Vorgehensweise* und Kapitel 7.5 *Grundlagen der Brandbekämpfung und der taktischen Ventilation*.

Modellierungsansatz

Für die Modellierung der maschinellen Überdruckbelüftung wurden die technischen Leistungsdaten des Akku-Hochleistungslüfters *BATFAN 2* der LEADER GmbH verwendet. Dieses mobile Gerät kann 20 min autark – ohne Netzanschluss – auf Höchstleistung arbeiten. Das Überdruckbelüftungsgerät erzeugt eine Luftleistung im Freien und bei Akkubetrieb von $25.700 \text{ m}^3/\text{h}$ ($= 7,14 \text{ m}^3/\text{s}$). Das Lüfterrad hat einen Durchmesser von 420 mm.⁹⁵ Die werkseitig vorhandene Einstellung des Neigungswinkels für eine optimale Abdeckung der gesamten Öffnungsfläche muss ebenfalls adäquat modelliert werden. Sämtliche

⁹⁵ Leader 2020: o.S.

Eingangsparameter der Überdruckbelüftung gilt es nun vereinfacht und idealisiert in der Brandsimulation umsetzen. Modelliert wurde die Überdruckbelüftung mit Hilfe von vier Simulationszeilen (siehe *Anlage 3* auf Seite A-11, Zeile 203-206). Zum einen wurde ein Hintergrundobjekt für die eigentliche Überdruckbelüftungsfläche umgesetzt. Dies ist notwendig, da die aufgezoogene VENT-Fläche nicht direkt auf der Mesh-Grenze liegen kann. Zum anderen ist die Aktivierungszeit der taktischen Ventilation über eine zeitlich individuelle und realitätsnahe Funktion verknüpft.

Um mit den zur Verfügung stehenden Herstellerangaben korrekte Eingabeparameter für die Simulation zu erhalten, mussten einige strömungsmechanische Zusammenhänge rechnerisch verifiziert werden. Zunächst wurde auf Basis des Durchmessers für das Lüfterrad ($d_{\text{Lüfter}} = 0,42 \text{ m}$) die resultierende Kreisfläche des Lüfters mit der *Formel 16* berechnet.

$$A_{\text{Kreis,Lüfter}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,42 \text{ m})^2}{4} = 0,1385 \text{ m}^2 \quad (16)$$

Unter Einhaltung des Kontinuitätsgesetzes für inkompressible Fluide gilt der Volumenstrom als Erhaltungsgröße. Bei Luft handelt es sich um ein kompressibles Fluid, welches bei einer Mach-Zahl $Ma < 0,3$ als inkompressibles Medium angesehen werden kann.⁹⁶ Dies gilt es abschließend mit einer rechnerischen Bestimmung der Mach-Zahl festzustellen. Zunächst wird nun die Strömungsgeschwindigkeit v_s mit dem bekannten Volumenstrom \dot{V} und der Kreisfläche des Lüfters $A_{\text{Kreis,Lüfter}}$ mit der *Formel 17* ermittelt.

$$v_s = \frac{\dot{V}}{A_{\text{Kreis,Lüfter}}} = \frac{7,14 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0,1385 \text{ m}^2} = 51,55 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (17)$$

Appliziert man den konstanten Volumenstrom \dot{V} auf die Öffnungsfläche des Gebäudeabschlusses von $A_{\text{offen}} = 2,205 \text{ m}^2$, so kann dies unter Einhaltung der Gesetzmäßigkeiten mit der *Formel 18* bestimmt werden.

$$v_{s,\text{neu}} = \frac{\dot{V}}{A_{\text{offen}}} = \frac{7,14 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{2,205 \text{ m}^2} = 3,24 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (18)$$

⁹⁶ Böswirth/Bschorer 2012: 190

Diese Ausströmungsgeschwindigkeit $v_{s,neu}$ der applizierten Überdruckbelüftungsfläche dient als Eingangsparameter für die Modellierung der taktischen Ventilation. Abstrahiert dargestellt, wird diese Belüftungsfläche als Rechteck in einem Meter Entfernung zum Gebäude und den exakten Abmessungen der Hauseingangsöffnungsfläche simuliert. Verluste der Strömungsgeschwindigkeit durch Lufttreibungs- und Luftwiderstandverluste werden folglich berücksichtigt.

Um rückwirkend die Annahme einer sehr kleinen Mach-Zahl von $Ma < 0,3$ zu verifizieren, wird diese abschließend mit der *Formel 19* berechnet.

$$Ma = \frac{v_s}{c} = \frac{\text{Strömungsgeschwindigkeit}}{\text{Schallgeschwindigkeit}} = \frac{51,55 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{343,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,15 \quad (19)$$

Mit der nachfolgenden Skizzierung (*Abbildung 16*) der gewählten Konstellation und den darauffolgenden *Abbildungen 17 und 18*, werden der Hauseingangsbereich und der Einsatz der taktischen Ventilation anschaulich dargestellt.

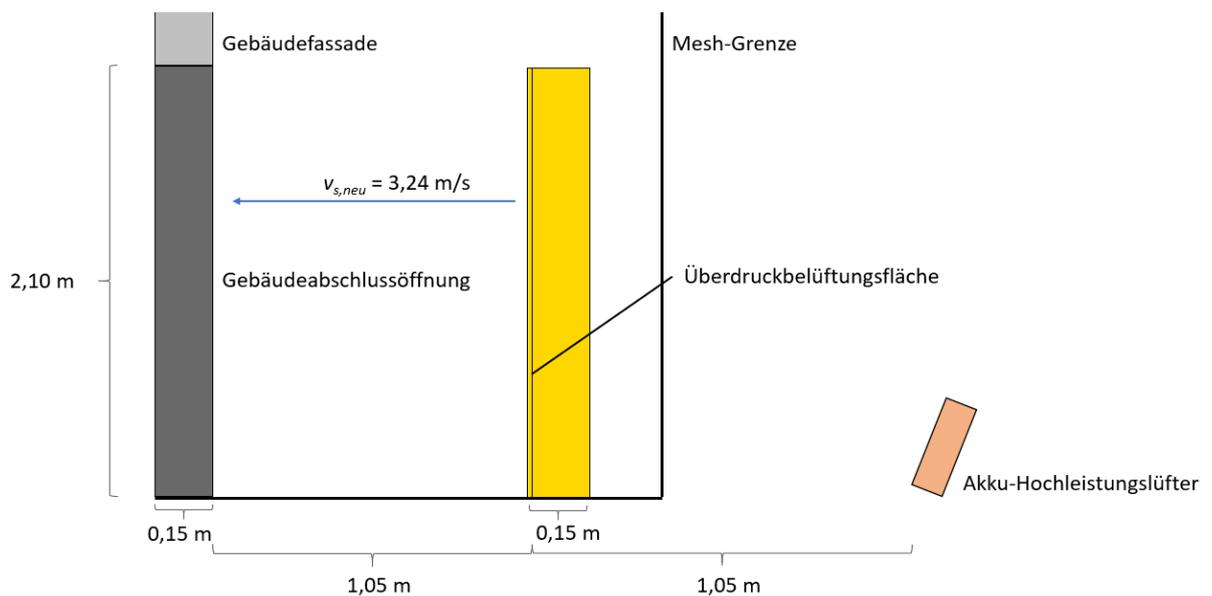


Abbildung 16: Modellierungsskizze der taktischen Ventilation

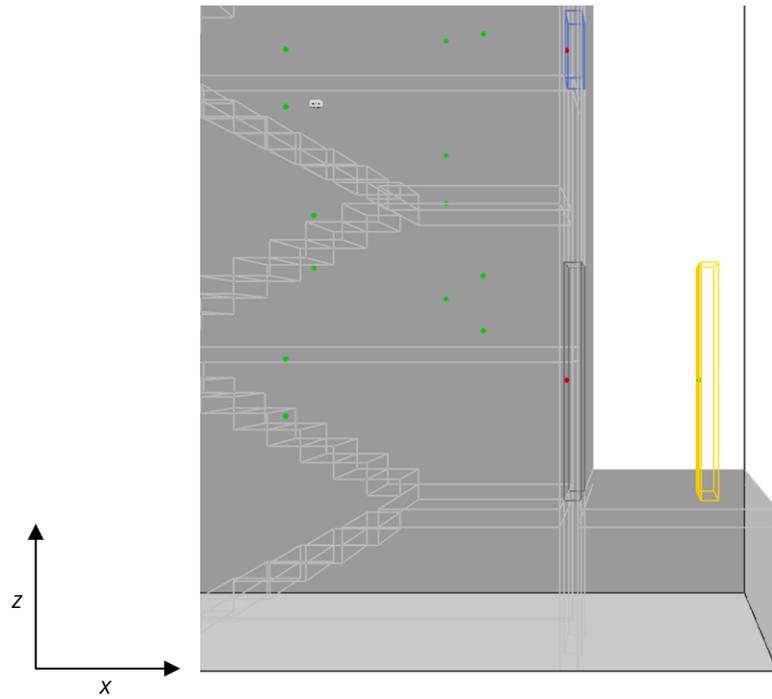


Abbildung 18: Seitenansicht Hauseingangsbereich der FDS-Simulation in SMV

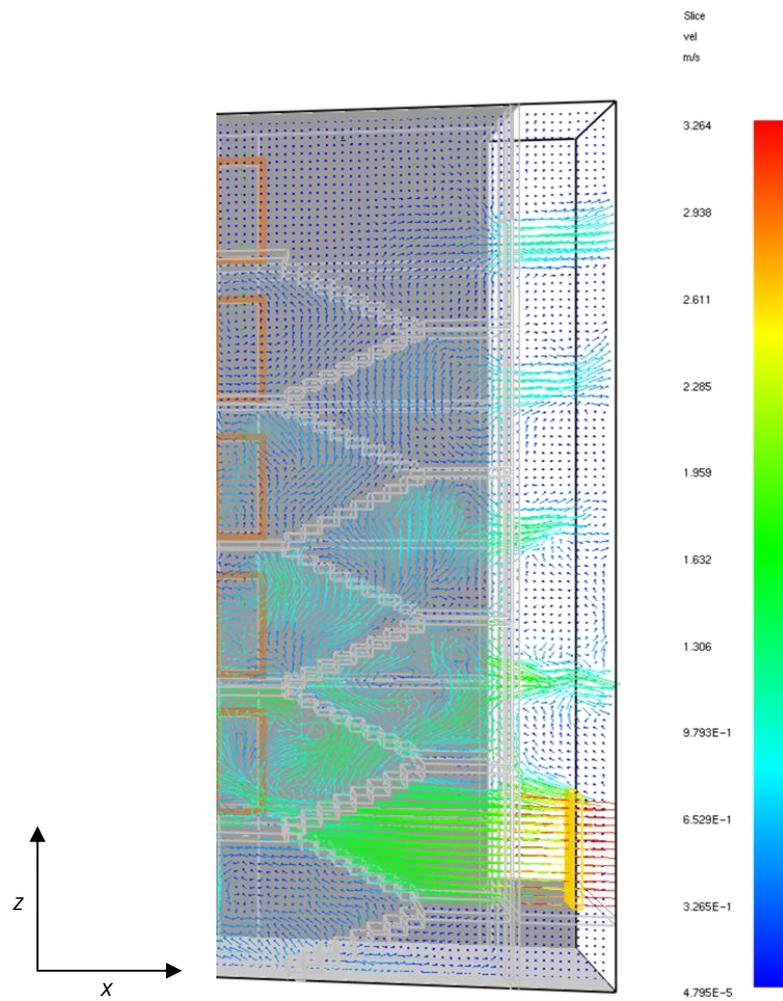


Abbildung 17: Einsatz der taktischen Ventilation der FDS-Simulation in SMV. Dargestellt wird die vektorielle Strömungsgeschwindigkeit in m/s ausgehend von der Überdruckbelüftung in den notwendigen Treppenraum.

8.4.6 Wohnungsabschlussöffnungen mit Leckage

Eine dichtschießende Türe unterliegt lediglich einer minimalen Reglementierung nach geltenden bauordnungsrechtlichen Anforderungen.⁹⁷ Als dementsprechend komplex und vielfältig muss der Versagensmechanismus angesehen werden. Dieser reicht von fehlenden und falsch montierten Dichtungselementen, über Alterungs- und Beschädigungerscheinungen bis hin zu enormen Spaltmaßen aufgrund von schwindenden Materialien wie Holz. Im Brandfall kommen weitere begünstigende Versagenseinwirkungen hinzu. Hierunter zählen die hydrostatischen und thermischen Beanspruchungen aufgrund des Brandgeschehens. Grundsätzlich ist dabei auch ein Dichtungsdurchbruch, also ein gänzlichliches Dichtungsversagen, möglich. Ein Dichtungsdurchbruch und der Feuerwiderstand bei direkt angrenzendem Brandszenario werden nicht berücksichtigt.

Normativ detailliert geregelt hingegen sind die Anforderungen von Rauchschutztüren (RS) in der DIN 18 095-1. Türen mit Rauchschutzeigenschaft nach dieser Norm sind selbstschließend und dafür ausgelegt, im eingebauten und geschlossenen Zustand den Durchtritt von Rauchgasen zu behindern.⁹⁸ Die Anforderungen reichen von einer definierten Leckrate, bis hin zu Herstellerverpflichtungen für die Abstimmung und Passgenauigkeit aller Türbestandteile. Für einflügelige Rauchschutztüren ist ein Volumenstrom von $\dot{V} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ bei einem Differenzdruck von 50 Pa und einer maximalen Umgebungstemperatur von 200 °C vorgeschrieben.⁹⁹ Luftvolumenströme durch Leckagen einer dichtschießenden Abschlussöffnung hingegen sind nicht normativ verankert. Diese wurden bisher lediglich experimentell ermittelt. Sie liegen zwischen 100 und 300 m^3/h bei identischem Differenzdruck.¹⁰⁰

Die Umschreibung „dichtschießend“ benennt folglich die geringste bautechnische Anforderung ohne bestandene Prüfung in einer Versuchsanordnung. Detailliert aufgelistet ist lediglich das Vorhandensein einer mindestens dreiseitig umlaufenden Dichtung.

⁹⁷ DIN 1988: 5

⁹⁸ DIN 1988: 1

⁹⁹ DIN 1988: 2

¹⁰⁰ Wilk/Osburg 2017: o.S.

In der DIN EN 12101-6 werden in der Tabelle A.3 die Luftleckraten und freien Durchtritts-
querschnittflächen konkretisiert. Unter Beachtung der Lecklufrate (Volumenstrom \dot{V})
und des Differenzdruckes kann für einflügelige Türen, welche sich in oder aus einem druck-
belüfteten Bereich öffnen, ein freier Durchtrittsquerschnitt von $0,01 \text{ m}^2$ und $0,02 \text{ m}^2$ er-
mittelt werden.¹⁰¹ Dieser flächenmäßige Durchtrittsquerschnitt ist auf die gesamte Türflä-
che bezogen. Im Betrachtungsszenario entspricht dies einer Wohnungsabschlussöff-
nungsfläche von $A_{\text{offen}} = 1,05 \text{ m} \times 2,1 \text{ m} = 2,205 \text{ m}^2$. Beide zahlenmäßige Ansätze der Tür-
leckageflächen werden mit Hilfe der Brand- und Rauchgassimulation simuliert. Der grö-
ßere Durchtrittsquerschnitt ist hier die konservative Variante.

Modellierungsansatz

Mit der Implementierung der Durchtrittsquerschnitte von dichtschießenden Türen in die
Treppenraumwand, galt es das entscheidende Brand- und Rauchgasverhalten in Bezug
auf die Personensicherheit adäquat umzusetzen. Für diese Modellierung gibt es die un-
terschiedlichsten Ansätze. Diese reichen von gesamtflächigen Durchtrittsquerschnitten
bis hin zu gerichteten Ventilationskanälen. Zur Anwendung kommt hier eine kombinierte
Herangehensweise der HVAC-Komponente mit lokalisierten Leckagen. Verbrennungspro-
dukte, thermische Differenzen und Druckunterschiede können hiermit über ein Kanalnetz
transportiert werden. Dieser Ansatz wird unter anderem bei exakt definierten Stellen ver-
wendet, wie einer aufgebrochenen Tür oder einem Riss. Über sogenannte Knoten ist die
Eingangsfläche mit der Ausgangsfläche verbunden und ermöglicht so eine Weiterleitung
in andere Segmente der Brandsimulation. Realisiert wurde eine HVAC-Zeile des Typs
„LEAK“ kombiniert mit zwei VENT-Eingaben. Dieses Schema wurde auf jeden Dichtungsbe-
reich appliziert. In Summe wurden so je Wohnungsabschluss vier Leckagepfade initiali-
siert. Die vier Kanalsegmente in den Türaußenbereichen wurden auf die nominale Gitter-
weite von $\delta x = 0,15 \text{ m}$ abgestimmt und die verbleibende Öffnungsfläche mit einem Objekt
aus Nadelholz verschlossen. Mit der nachfolgenden Skizzierung in *Abbildung 19* wird dies
verdeutlicht.

¹⁰¹ DIN 2005: 90

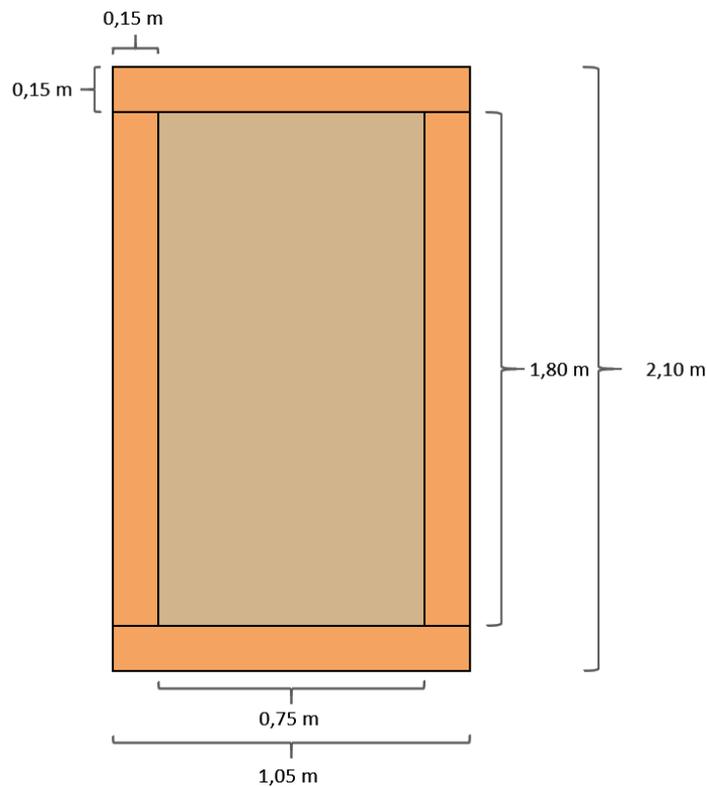


Abbildung 19: Modellierungsskizze eines dichtschießenden Wohnungsabschlusses. Dargestellt werden die vier umlaufenden Leckagebereiche in Orange.

Neben dem bedeutsamsten Parameter „AREA“ wurden zwei weitere HVAC-Komponenten verwendet. Die beiden Eigenschaften wurde nach Vorgaben im FDS UG auf die entsprechenden Standardwerte gesetzt.¹⁰² Hierunter zählt die Eingabe von vorwärts- und rückwärtsgerichteten dimensionslosen Verlustkoeffizienten (Wandreibungsverluste), betitelt mit „LOSS“, und die Leckage-Enthalpie.

Mit der Interpretation der Kanalquerschnittsflächen in m^2 bezüglich der definierten Luftleckraten werden die beiden LEAK-Eingaben der Kanalsegmente aufgezeigt, dargestellt in *Tabelle 8*. Mit den *Abbildungen 20* und *21* auf der Folgeseite soll zudem die Frontalansicht der Wohnungsabschlussöffnung und der Einsatz der Leckrate mittels SMV verdeutlicht werden.

Tabelle 8: Implementierung der LEAK-Kanalquerschnittsflächen

	LEAK_1	LEAK_2
Oben	$1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 1,05 \text{ m} = \underline{1,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 1,05 \text{ m} = \underline{2,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$
Rechts	$1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 2,10 \text{ m} = \underline{2,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 2,10 \text{ m} = \underline{4,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$
Links	$1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 2,10 \text{ m} = \underline{2,10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$	$2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 2,10 \text{ m} = \underline{4,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$
Unten	$4,52 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 1,05 \text{ m} = \underline{4,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$	$9,05 \cdot 10^{-3} \text{ m} \times 1,05 \text{ m} = \underline{9,50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}$
Summe	0,01 m^2	0,02 m^2

¹⁰² McGratten et al. 2020a: 125-135

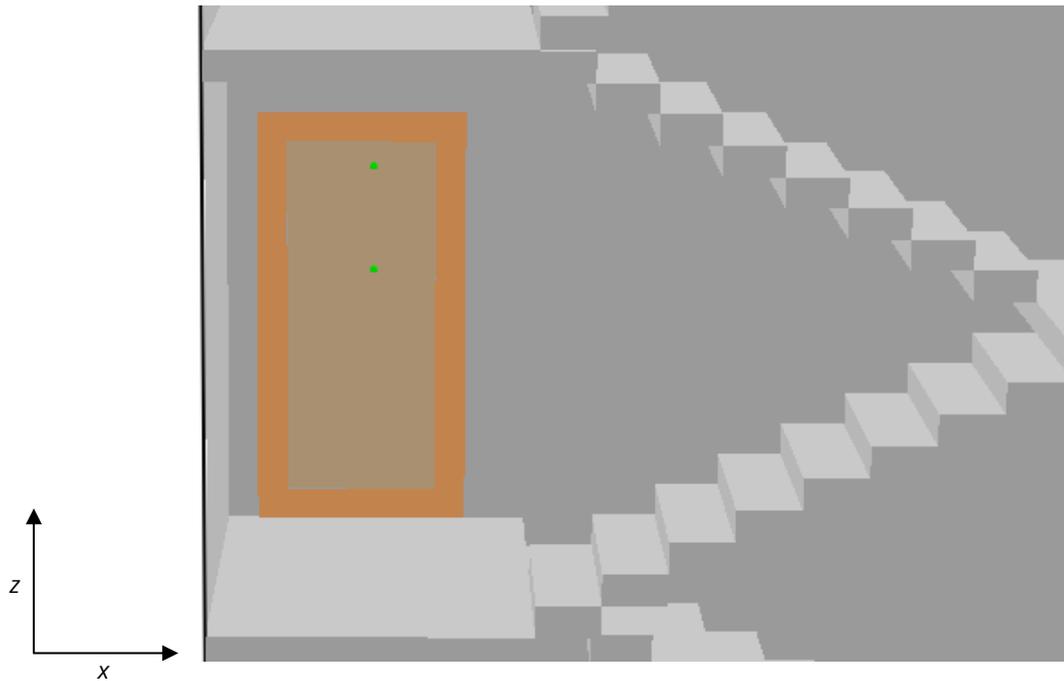


Abbildung 20: Frontalansicht Wohnungsabschlussöffnung der FDS-Simulation in SMV

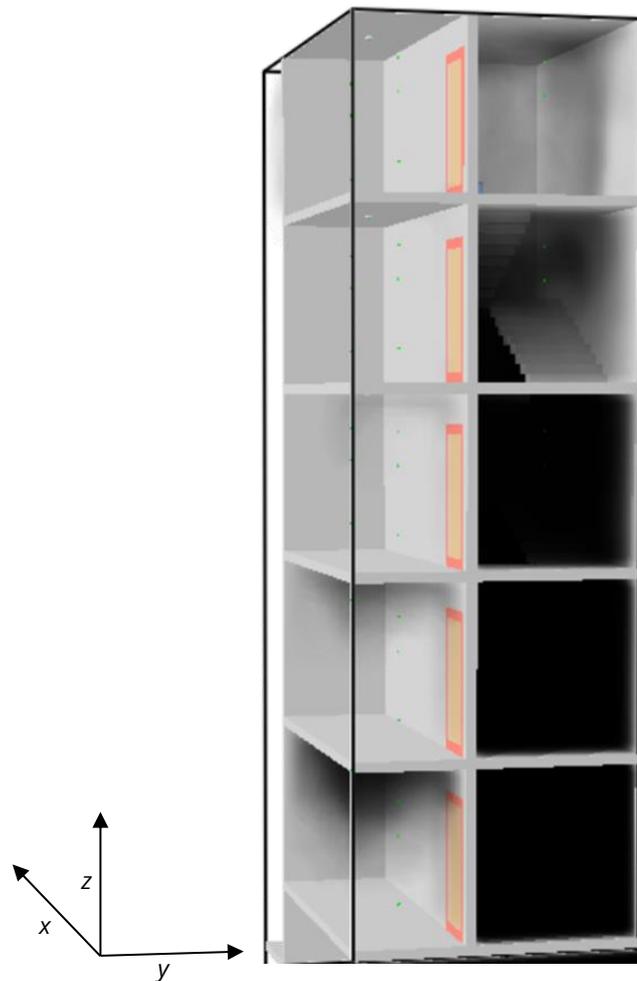


Abbildung 21: Einsatz der modellierten Türleckage der FDS-Simulation in SMV. Dargestellt ist der bereits stark verrauchte Treppenraum. In den ersten WE (links) ist bereits ein leichter optischer Raucheintrag erkennbar.

8.4.7 Mobiler Rauchverschluss

Eine weitere einsatztaktische Maßnahme der Interventionskräfte im Innenangriff ist das Setzen eines mobilen Rauchverschlusses. Die Relevanz eines solchen Teilverschlusses wurde bereits in Kapitel 7.5 *Grundlagen der Brandbekämpfung und der taktischen Ventilation* erläutert. Dieser soll möglichst schnell eine Abschnittstrennung zum notwendigen Treppenraum – erster Rettungsweg der Bewohner – schaffen und somit eine weitere Rauch- und Schadstoffausbreitung verhindern.

Initialisiert wurde der mobile Rauchverschluss über das Einsetzen eines zeitgesteuerten Objektes im Kellerabschlussbereich mit Grenze zum notwendigen Treppenraum. Dessen Aktivierungszeit ist nach dem Öffnen des Gebäudeabschlusses, jedoch vor dem Schaffen von Abluftöffnungsflächen im Treppenraum und vor der taktischen Ventilation anzusetzen. Zeitlich korrespondiert das Setzen des Rauchverschlusses mit den ersten Brandbekämpfungsmaßnahmen des Angriffstrupps im Innenangriff. Eine Deaktivierungszeit des Brandgeschehens ist ebenso vorgesehen. Als Vereinfachung wurde der Verschluss mit der Materialeigenschaft von Gips versehen, dies schien am geeignetsten. Für die weitere Auswertung wird dies aber nicht von entscheidender Bedeutung sein. Zudem ist das Objekt formstabil, d.h. es kann sich nicht in Folge von hydrodynamischen Luftbewegungen anheben oder verschieben. Verschlossen wird mit dem mobilen Rauchverschluss eine Öffnungsfläche von $A_{\text{Verschluss}} = 1,05 \text{ m} \times 1,05 \text{ m} = 1,10 \text{ m}^2$. Dies entspricht 50 % der initialen Abschlussöffnungsfläche, dargestellt in *Abbildung 22*.

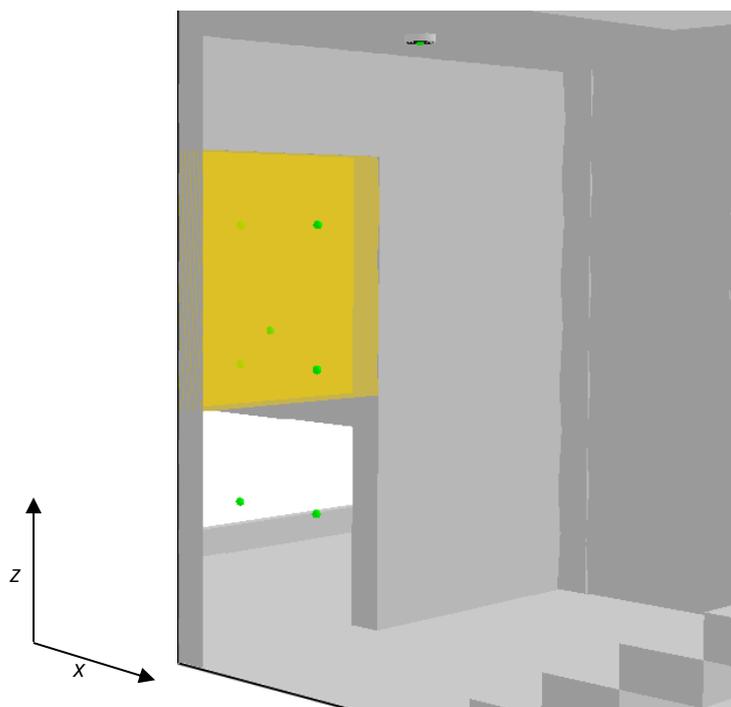


Abbildung 22: Ansicht des mobilen Rauchverschlusses der FDS-Simulation in SMV

8.5 Auswertungssteuerung

Die Auswertung der Brand- und Rauchgassimulation erfolgt entlang der bereits definierten schutzzielorientierten Leistungs- und Nachweiskriterien der Personensicherheit. Aufbauend auf die funktionalen Anforderungen konnten quantitative Nachweisooptionen von besonderer Relevanz festgelegt werden. Diese Leistungs- und Nachweiskriterien wie die optische Dichte, die Gaskonzentration von CO und die Gastemperatur gilt es nun für Personenaufenthaltsdauern von < 5 min zu verifizieren.

Neben klassischen Auswerte- und Steuerungspunkten (*DEV*C) wurden zudem zweidimensionale Auswerteflächen in XY, XZ oder YZ-Richtung (*SLCF*) aufgespannt. Die Visualisierungs- und Kontrolloptionen dieser (vektoriellen) Auswerteflächen sind hierbei beschränkt auf das Tool SMV. Ebenfalls lediglich zur Visualisierung dienen die animierten Flächen mit identischen Eigenschaften (*ISOF*). Diese charakterisieren wolkenbildend und einhüllend die Gastemperatur von > 180 °C, den Inhalationshitzeschockbereich für Personen. In eine CSV-Datei hingegen werden in Summe 210 Einzelpunktmessungsergebnisse – englisch *Single Point Output* – automatisch generiert. Diese Daten werden durch die Auswertepunkte (*DEV*C) über den gesamten Simulationslauf von 1800 s einmal pro Sekunde aufgezeichnet. Ebendiese können nun für eine quantitative Auswertung und detaillierte Analyse herangezogen werden.

Mit nachfolgender *Tabelle 9* soll ein Überblick über die Auswertungssteuerung bezüglich der Gaseigenschaften vermittelt werden.

Tabelle 9: Überblick der Auswertungssteuerung - Gaseigenschaften

	<i>SLCF</i>	<i>DEV</i> C	<i>ISOF</i>
TEMPERATURE [°C]	X	X	X
VELOCITY [m/s]	X	X	
OPTICAL DENSITY [m ⁻¹]	X	X	
VOLUME FRACTION - CARBON MONOXIDE [mol/mol]	X	X	
PRESSURE [Pa]	X	X	
VOLUME FRACTION - OXYGEN [mol/mol]		X	

Steuerung der optischen Rauchwarnmelder

In die bestehende Raumstruktur der Brandsimulation wurden zudem noch sechs optische Rauchwarnmelder in den Wohn- und Treppenraumbereich integriert. Durch ein akustisches Signal können so Bewohner frühzeitig auf einen Raucheintrag und ein Brandgeschehen in ihrer WE aufmerksam gemacht werden. Diese Rauchmelder sind mittlerweile verpflichtend in Deutschland. Die ordnungsgemäße Montage, Wartung und Instandhaltung muss durch den Eigentümer bzw. Vermieter gewährleistet werden. Der Mindestschutz dieser beläuft sich auf alle Räume, in denen sich schlafende Personen aufhalten, und die notwendigen Flure. Als Modellierungsansatz wurden standardisierte Detektorparameter verwendet. Das Heskestad-Modell dient dabei als Grundlage und gibt eine charakteristische Länge von 1,8 m und einen Auslöseschwellenwert von 3,24 %/m (entspricht einer Optischen Rauchdichte von $D_L = 0,0324 \text{ m}^{-1}$) vor.¹⁰³ Je WE wurde ein Rauchwarnmelder raummittig an der Decke installiert. Zusätzlich wurde - ohne dass es rechtlich vorgeschrieben wäre - ein Rauchwarnmelder im Untergeschoss des notwendigen Treppenraumes deckenseitig angebracht. Hiermit kann das Potenzial einer Brand- und Rauchgasfrüherkennung im Bereich sämtlicher Kellerzugänge validiert werden. Durch ein internes Hausalarmierungssystem – ohne Aufschaltung einer ständig besetzten Stelle – könnten so wertvolle Sekunden bezüglich der Selbstrettungsphase gewonnen werden. Diese Argumentationsführung soll objektiv bestätigt oder entkräftet werden.

Steuerungsmodellierung des abwehrenden Brandschutzes

Auf Basis der einsatzrelevanten Zeiten für den Standardwohnungsbrand (*Abbildung 6*) und den Hinweisen zur Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in Baden-Württemberg wurden in Rücksprache mit der LFS BW nachfolgende Aktivierungs- und Deaktivierungszeiten für den abwehrenden Brandschutz (*Tabelle 10*) festgelegt.

Tabelle 10: Aktivierungs- und Deaktivierungszeit der einsatztaktischen Interventionsmaßnahmen

	activation time s [min]	deactivation time s [min]
house entrance door	-	900 [15:00]
portable smoke blocker	960 [16:00]	-
fire	-	1140 [19:00]
light well	-	1170 [19:30]
window stairwell – 1. floor	-	1140 [19:00]
window stairwell – 2. floor	-	1170 [19:30]
window stairwell – 3. floor	-	1200 [20:00]
window stairwell – 4. floor	-	1230 [20:30]
pressure ventilation	1290 [21:30]	-

¹⁰³ McGratten et al. 2020a: 257

8.6 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die nachfolgenden Unterkapitel geben einen transparenten Überblick über die Auswertung und Interpretation der Simulationsergebnisse. An dieser Stelle muss darauf verwiesen werden, dass trotz umfangreicher Datenerhebung nicht jeder Aspekt ausgewertet und erörtert werden kann. Die Auswertung des primären Zieles der Personensicherheit während der Selbst- und Fremdrettungsphase hat oberste Priorität. Zudem wird den einsatztaktischen Maßnahmen der Feuerwehr eine zusätzliche Relevanz zugeordnet.

8.6.1 Übergabeparameter der Mesh-Schnittstelle

Im Folgenden werden die Übergabeparameter aller sechs Brand- und Rauchgassimulationen an der Mesh-Grenze zwischen Brandraum und Treppenraum betrachtet. Jede Simulation beinhaltet drei Wertepaarungen über die drei vertikalen Raumhöhen von 0,6 m, 1,2 m und 1,8 m verteilt. Zwischen diesen Paarungen (*pre* zu *post*) liegt eine horizontale Wegstrecke von 0,45 m. Da die Netzwerkkonfiguration über alle sechs Simulation und die gesamte Berechnungszeit konstant bleibt, wird auf eine detaillierte Betrachtung verzichtet.

Die Übergabeparameter sind über alle sechs Brand- und Rauchgassimulationen konsistent. Die prozentualen Abweichungen von *post* zu *pre* sind marginal und liegen in einem akzeptablen Rahmen. Die Schnittstellenproblematik mit potenziellen Informationsverlusten bei der Wertübermittlung von Mesh zu Mesh kann folgerichtig entkräftet werden.

Mit *Tabelle 11* soll ein exemplarischer Eindruck der Werteüberprüfung der Simulation *S_1_LEAK_1_REAC_1* entstehen. Ausgewertet wurden die Daten der Simulationszeit bei Sekunde 900 (= 15 min).

Tabelle 11: Übergabeparameter der Mesh-Schnittstelle. Dargestellt ist zudem die Höhe der Auswertung (links) und die prozentuale Abweichung der *pre*- und *post*-Daten. Aufgezeigt werden die Werte für die CO-Konzentration c_{CO} , die Gastemperatur T und die optische Dichte D_L . Zeit: 900 s [15 min] Simulation: *S_1_LEAK_1_REAC_1*

Höhe	c_{CO} in ppm			T in °C			D_L in m^{-1}		
	pre	post	Abw. in %	pre	post	Abw. in %	pre	post	Abw. in %
0,6 m	9111,33	9184,71	0,99	86	73	1,18	17,85	18,67	0,96
1,2 m	8984,86	9054,59	0,99	144	126	1,14	15,15	15,95	0,95
1,8 m	9181,41	9150,92	1,00	161	157	1,03	14,89	14,96	1,00

8.6.2 Optische Auswertung

Am Beispiel von Simulation S_1_LEAK_1_REAC_1 soll ein erster Gesamteindruck gewonnen werden. Die zeitliche Betrachtung beschränkt sich vorerst auf den Zeitraum von < 15 min, also ohne etwaige einsatztaktische Maßnahmen. Für den Brand- und Treppenraum wird eine optische Einordnung vorgenommen, die mit dem ersten Raucheintrag in die WE und dem Auslösen der Rauchwarnmelder endet. Siehe *Tabelle 12* für einen zusammengefassten Ereignisverlauf.

Tabelle 12: Simulationsübergreifende optische Auswertung mit SMV. Eine Unterscheidung der Leckagerate und der Reaktionsausbeuten fand nicht statt. Die Zeiten wurden auf zehn Sekundenschritte gerundet. Verwendete Simulation: S_1_LEAK_1_REAC_1

Simulationszeit in s [min]	Optische Auswertung mit SMV
0 [0:00]	Start der Simulation, Brandausbruch
60 [1:00]	Rauchaustritt aus Kellerlichtschacht (<i>light well</i>), Raucheintrag in TR mit Auslösung Rauchwarnmelder UG
120 [2:00]	Höhe der raucharmen Schicht im Keller- und Brandraum bei $\approx 1,20$ m
160 [2:40]	TR auf Höhe Hauseingang verraucht
170 [2:50]	Rauchaustritt aus 1. Treppenraumfenster (<i>window stairwell - 1. floor</i>), Höhe der raucharmen Schicht im Keller- und Brandraum bei $\approx 0,60$ m
190 [3:10]	TR auf Höhe Podest WE EG verraucht
220 [3:40]	TR auf Höhe Zwischenpodest EG/1. OG verraucht, deutlicher Rauchaustritt aus 1. Treppenraumfenster (<i>window stairwell - 1. floor</i>)
240 [4:00]	Raucheintrag in WE EG mit Auslösung Rauchwarnmelder
250 [4:10]	TR auf Höhe Podest WE 1. OG verraucht, Keller- und Brandraum ohne raucharme Schicht
260 [4:20]	TR auf Höhe Zwischenpodest 1. OG/2. OG verraucht
270 [4:30]	Rauchaustritt aus 3. Treppenraumfenster (<i>window stairwell - 3. floor</i>)
290 [4:50]	TR auf Höhe Podest WE 2. OG verraucht
300 [5:00]	Raucheintrag in WE 1. OG mit Auslösung Rauchwarnmelder
310 [5:10]	TR auf Höhe Zwischenpodest 2. OG/3. OG verraucht
370 [6:10]	TR auf Höhe Podest WE 3. OG verraucht, Raucheintrag in WE 2. OG mit Auslösung Rauchwarnmelder
410 [6:50]	TR auf Höhe Zwischenpodest 3. OG/4. OG und Podest WE 4. OG verraucht
460 [7:40]	Raucheintrag in WE 3. OG mit Auslösung Rauchwarnmelder
490 [8:10]	Raucheintrag in WE 4. OG/DG mit Auslösung Rauchwarnmelder
1800 [30:00]	Ende der Simulation

Kamineffekt im Treppenraum

Die thermische Aufbereitung des ersten Rettungsweges für die Bewohner während der Selbstrettungsphase ist von besonderer Relevanz. Eindrucksvoll kann mit Hilfe der nachfolgenden *Abbildung 23 und 24* der Kamineffekt im TR aufgezeigt werden. Zu sehen ist in der oberen *Abbildung 23* eine Darstellung mit *Isosurface*. Die lilafarbene Gaswolke hüllt den Inhaltshitzeschockbereich von $\geq 180\text{ °C}$ ein. Die untere *Abbildung 24* zeigt ein vertikales Schnittbild der Treppenraummitte mit einem *Slice File* zur Verdeutlichung der Temperaturverteilung. Beide Aufnahmen wurden zur Simulationszeit 532 s [8:52 min] erstellt.

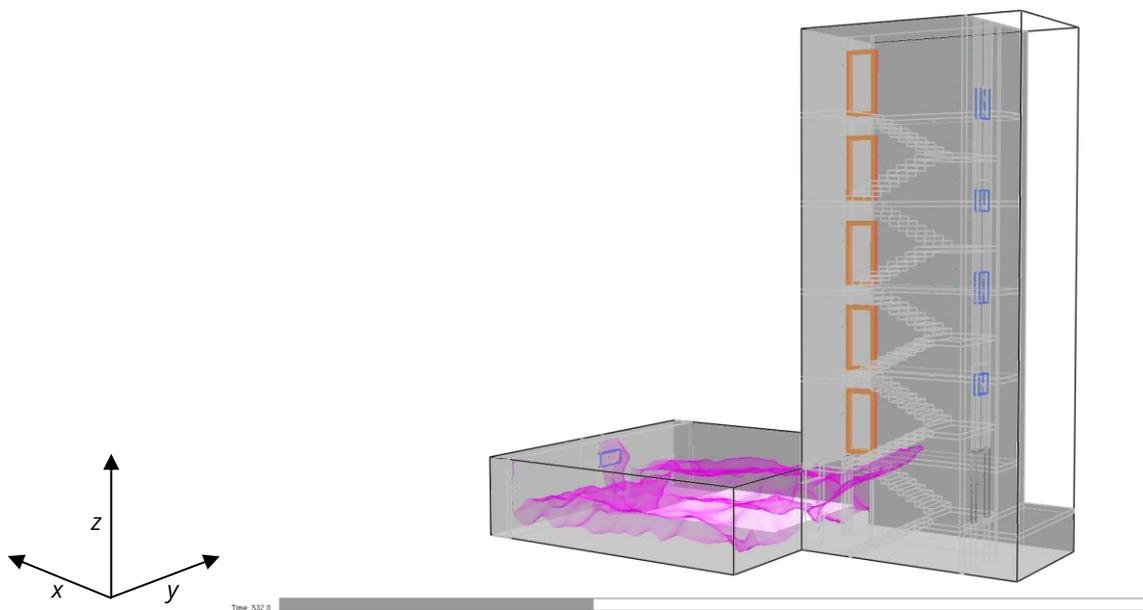


Abbildung 23: Isosurface von $\geq 180\text{ °C}$ der FDS-Simulation in SMV. Zu sehen ist die lilafarbene Gaswolke, welche bereits deutlich in den TR hineinzieht. Zeit: 532 s [8:52 min] Simulation: S_1_LEAK_1_REAC_1

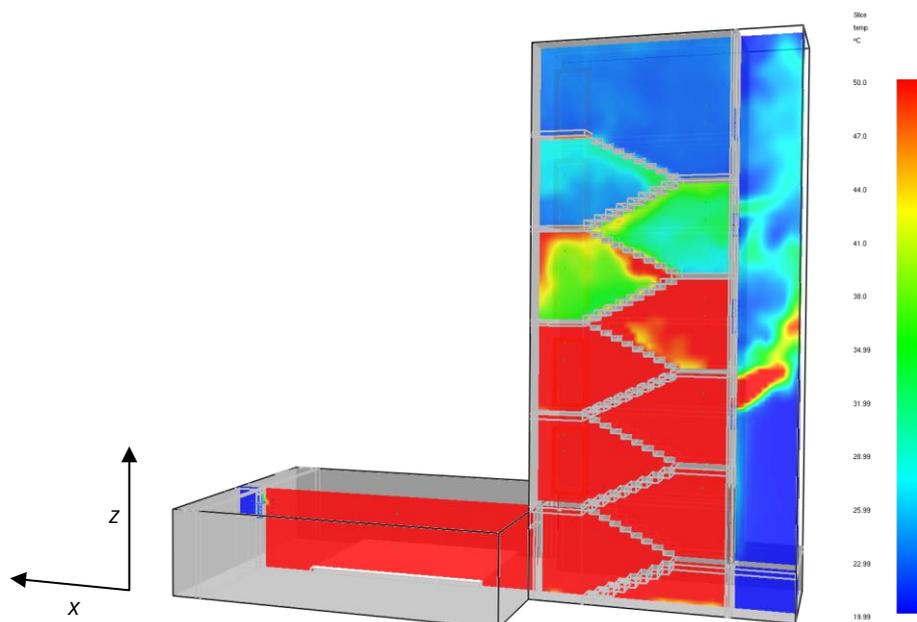


Abbildung 24: Slice File – Temperature bei $Y = 1,2\text{ m}$ der FDS-Simulation in SMV. Dargestellt sind in rot Bereiche von $\geq 50\text{ °C}$. Zeit: 532 s [8:52 min] Simulation: S_1_LEAK_1_REAC_1

Kohlenstoffdioxid CO₂ im Gebäude

Die Ausbreitung des toxischen Gases CO₂ kann ebenfalls mit Hilfe von SMV abgebildet werden. Exemplarisch kann so der Gastransport im gesamten Wohnobjekt aufgezeigt werden. Ersichtlich wird hierdurch die sukzessive Anreicherung über den Lackagepfad des Gases in die WE hinter den dichtschießenden Wohnungsabschlüssen. Es handelt sich hierbei um rein optische Erkenntnisse, eine Quantifizierung des Gases CO₂ fand nicht statt. *Abbildung 25* zeigt eine Frontalansicht des MFH über einen zeitlichen Verlauf von 20 Minuten.

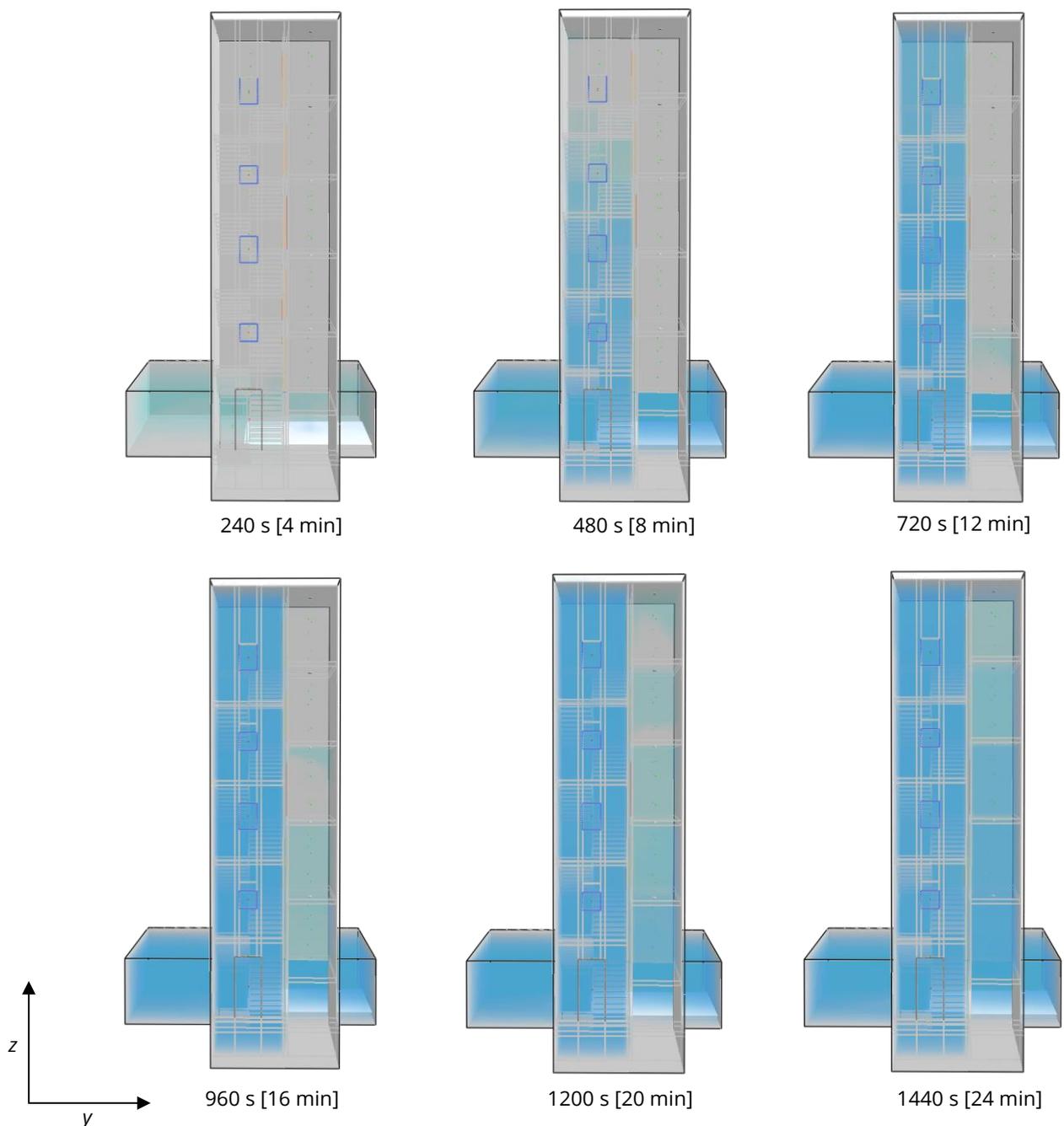


Abbildung 25: Carbon Dioxide Density der FDS-Simulation in SMV. Es handelt sich um die Frontalansicht des MFH. Dargestellt ist Anreicherung von Kohlenstoffdioxid in blau. Simulation: S_1_LEAK_1_REAC_1

Optische Dichte D_L im Gebäude

Eine Erhöhung der Optischen Rauchdichte D_L in m^{-1} über eine Simulationszeit von 15 Minuten kann beobachtet werden. Die Quantifizierung des Leistungskriteriums von $D_L > 0,2 \text{ m}^{-1}$ erfolgt in den Einzelauswertungen. Für die Darstellung in *Abbildung 26* wurde eine zweidimensionale Auswertungsebene (*Slice File*) bei $X = 0,45 \text{ m}$ gewählt. Diese Ebene steht vertikal im TR und reicht von den Geschosspodesten bis in die WE. Die Aufnahmen wurden aus der Perspektive der Gebäuderückansicht erstellt. Deutlich zu erkennen sind die strömungsmechanischen Turbulenzen im TR durch initial gekippte Fensteröffnungsflächen. In den WE hingegen ist die Ausbildung einer raucharmen Schicht deutlich zu erkennen. Da die WE lediglich über die Türleakagen strömungsmechanisch an die Umgebung angebunden sind und es keine weiteren natürlichen Zu- und Abluftöffnungen gibt, handelt es sich hierbei um eine idealisierte Darstellung.

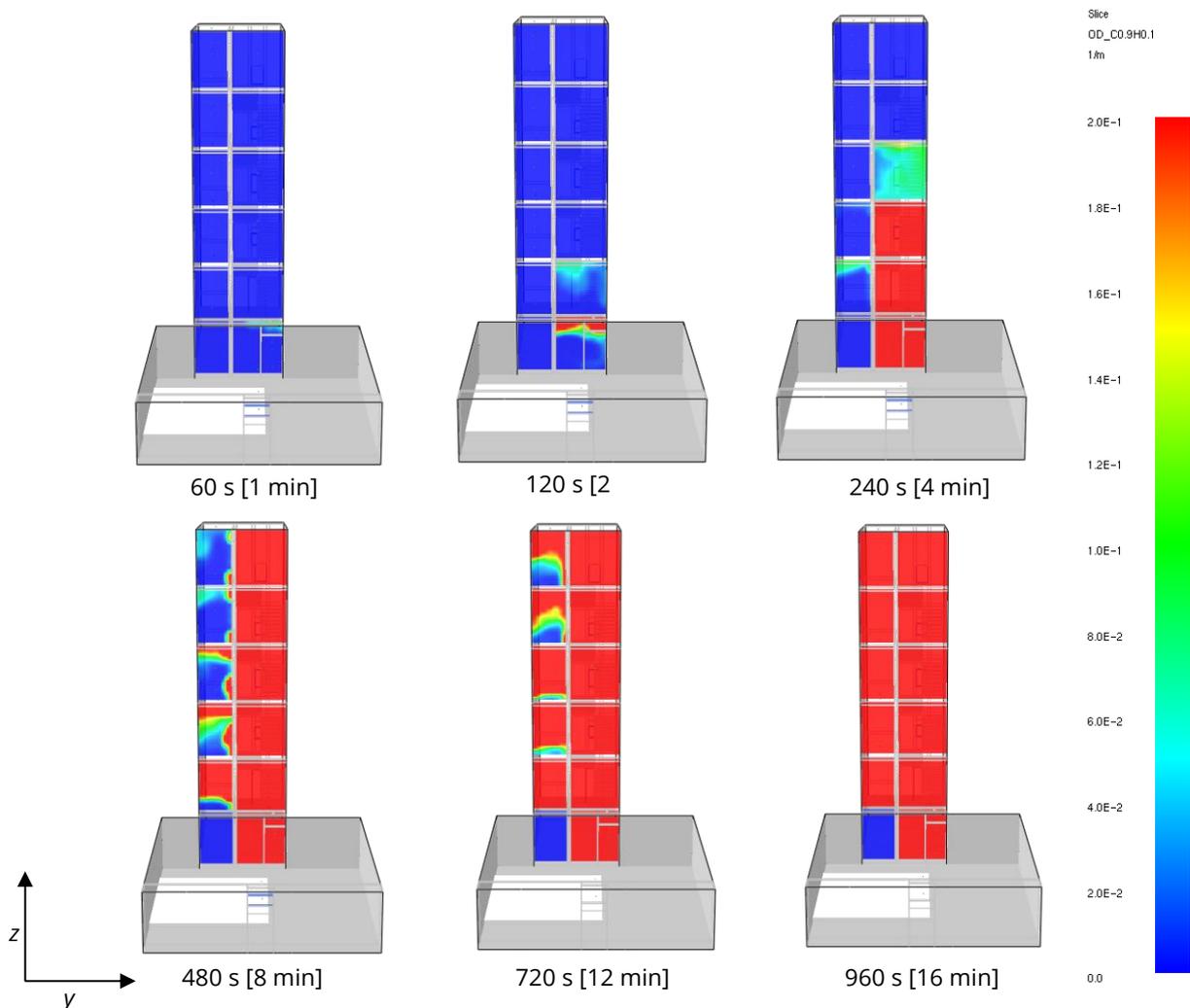


Abbildung 26: Soot Optical Density der FDS-Simulation in SMV. Es handelt sich um die Rückansicht des MFH. Visualisiert wird eine hohe optische Dichte in rot und eine geringe in blau. Zu sehen ist auch ein Berechnungstotraum, welcher konstant blau ist. Simulation: S_1_LEAK_1_REAC_1

8.6.3 S_1_LEAK_1_REAC_1

Die Simulation 1 fungiert als initiale Standardsimulation mit realitätsnahen Eingabeparametern. Die initialisierten Modellierungsansätze für die Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Wohnungsabschlüsse und die Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten wurden bereits ausführlich erläutert (vgl. Kapitel 8.4.6 *Wohnungsabschlussöffnungen mit Leckage* und 6.4 *Das Pyrolysemodell*). Interventionsmaßnahmen der Feuerwehr werden nicht berücksichtigt. Aus kapazitiven Gründen werden die Simulationsergebnisse anhand der quantifizierten Nachweiskriterien der Personensicherheit ausgewertet und verglichen. Die Ergebnisdarstellung der Einzelsimulationen findet entlang des notwendigen Treppenraumes – 1. Rettungsweg der Bewohner und Angriffsweg der Feuerwehr – während der Selbst- und Fremdrettungsphase statt. Die Auswertung der Einzelsimulationen schließt mit der Darstellung der wohnungsseitigen Situation hinter den verschlossenen und dichtschießenden Abschlüssen ab.

Eine tabellarische Darstellung der Auswertungsergebnisse über alle Nachweiskriterien der Brand- und Rauchgassimulationen ist der *Anlage 5* zu entnehmen. Das angewendete Schema der umfassenden Ergebnisdarstellung kann exemplarisch der *Tabelle 13* entnommen werden.

Tabelle 13: Exemplarische Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien für die Brand- und Rauchgassimulationen. Links ist die Simulationszeit in Sekunden und Minuten ersichtlich. Rechts zu sehen ist das Nachweiskriterium mit der Position im Gebäude und der Höhe des DEVC in m.

Zeit in s	Zeit in min	Auswertung der Nachweiskriterien
0	00:00:00	Start der Simulation, Brandausbruch
t	hh:mm:ss	Auslösung Rauchwarnmelder, Position, Auswertungshöhe in m
t	hh:mm:ss	Optische Dichte $D_L > 0,2 \text{ m}^{-1}$, Position, Auswertungshöhe in m
t	hh:mm:ss	Gastemperatur $T > 50 \text{ °C}$, Position, Auswertungshöhe in m
t	hh:mm:ss	Gaskonzentration $c_{CO} > 500 \text{ ppm}$, Position, Auswertungshöhe in m
1800	00:30:00	Ende der Simulation

In den nachfolgenden *Abbildungen 27* und *28* sind die Auswertungsergebnisse bezüglich der Nachweiskriterien sowohl im Treppenraum als auch hinter den dichtschießenden Wohnungsabschlüssen dargestellt. Zusätzlich zu der Simulationszeit in Sekunden auf der y-Achse, ist die Simulationszeit in Minuten beim Erreichen des Nachweiskriteriums an den Graphen visualisiert.

Mit der *Abbildung 27* wird das Erreichen der drei Nachweiskriterien im Treppenraum über die gesamte Simulationszeit darstellt. Auf der x-Achse sind die einzelnen Zwischenpodeste und Geschosspodeste von unten (links) nach oben (rechts) aufgeführt.

Zur Verdeutlichung der Auswertungsergebnisse wird exemplarisch eine Aussage aus der Darstellung verschriftlicht. *Das Nachweiskriterium einer Gaskonzentration c_{CO} von > 500 ppm wird auf dem Podest 3. OG nach 6:51 min (= 411 s) erreicht.*

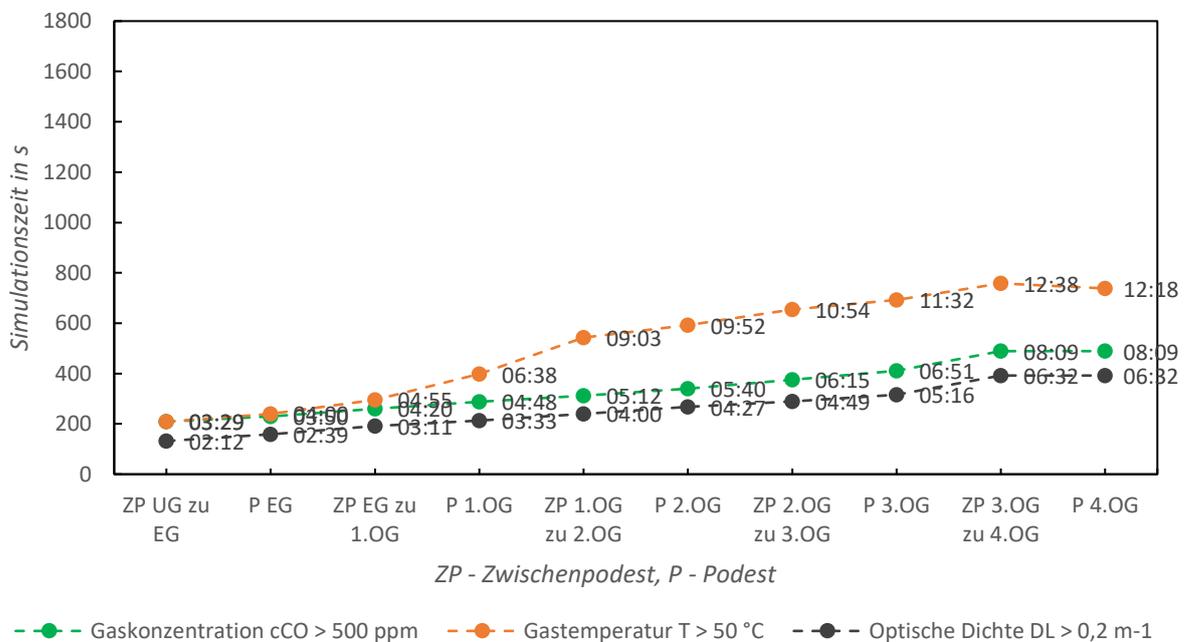


Abbildung 27: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_1_LEAK_1_REAC_1. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien über die gesamte Gebäude- und Treppenraumhöhe in Abhängigkeit der Simulationszeit.

Neben der Bewertung der Personensicherheit im TR wird auch das Rauchgasverhalten über die Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Wohnungsabschlüsse ausgewertet. *Abbildung 28* zeigt die Auswirkungen und Einflüsse hinter der geschlossenen Wohnungstüre in den WE. Die toxische und thermische Einflussnahme auf das Selbst- und Fremdrettungsverhalten der Bewohner im Nahbereich der Wohnungsabschlussöffnung kann so verdeutlicht werden. Im Vergleich zur *Abbildung 27* erfolgte die Nachweisführung in den WE anhand von jeweils zwei Auswertepunkten in der Höhe 0,5 m und 2,0 m.

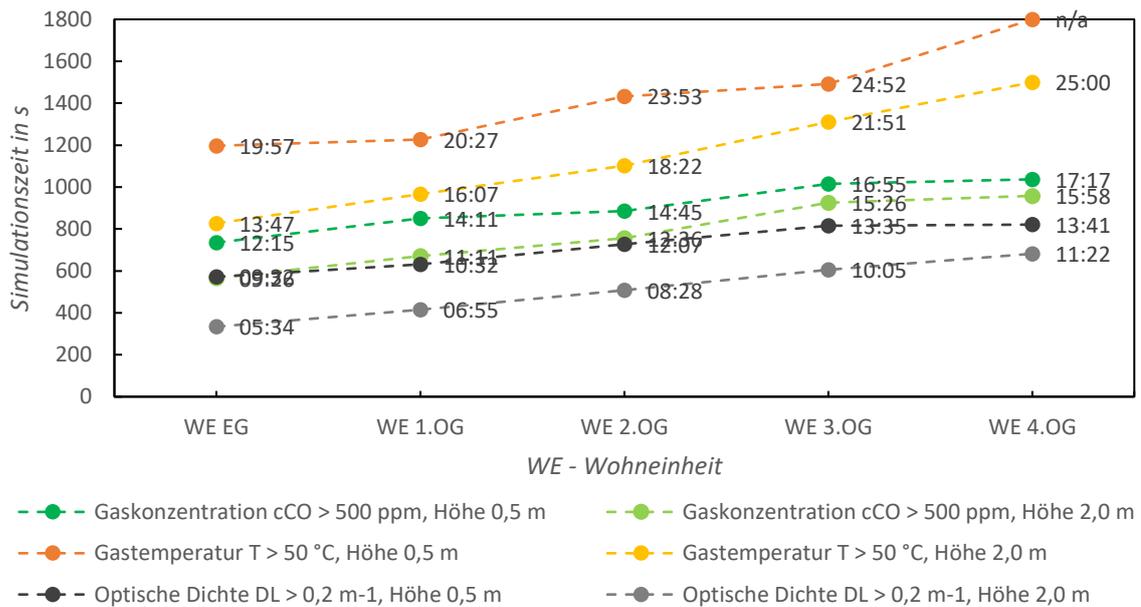


Abbildung 28: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_1_LEAK_1_REAC_1. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien in den Wohneinheiten in Abhängigkeit der Simulationszeit. Ist an Stelle eines Zeitpunktes *n/a* angegeben, bedeutet dies, dass das Nachweiskriterium während der gesamten Simulationszeit nicht erreicht wurde.

Die Graphen beider Abbildungen zeigen einen erwarteten Verlauf. Je größer die Entfernung zum Brandereignis ist, desto später werden die Nachweiskriterien erreicht.

Die Deutung und Bewertung der unterschiedlichen Eingangsbedingungen aller sechs Rauch- und Brandsimulation erfolgt in Kapitel 8.6.9 *Simulationsübergreifende Auswertung*.

8.6.4 S_2_LEAK_1_REAC_1_FW

In die Simulation 2 wurden die einsatztaktischen Herangehensweisen und Interventionsmaßnahmen der Feuerwehr integriert. Bis zum Eintreffen und ersten agieren der Einsatzkräfte am Wohngebäude entspricht diese Simulation der Simulation S_1_LEAK_1_REAC_1. Eine Auswertung findet daher lediglich für einen Zeitansatz von > 900 s (= 15 min), folglich im bereits belüfteten Treppenraum statt. Eine Deutung der Ergebnisse in den WE mit dem Beginn der einsatztaktischen Maßnahmen wird aufgrund mangelnder Plausibilität verworfen. In den WE ist lediglich mit einer Stagnation bzw. leichten Verbesserung der thermischen und toxischen Beeinflussung der Bewohner zu rechnen. Ein Argument hierfür ist die fehlende Ventilations- und Abluftöffnungsfläche aus der WE in die Umgebung. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf dem zeitlichen Ansatz und der Effektivität der einsatztaktischen Maßnahmen in Bezug auf die Personensicherheit im MFH. Mit dem Beginn der Interventionsmaßnahmen wird sich die Situation im Treppenraum zeitnah deutlich verbessern.

In der *Anlage 5* ist die tabellarische Auswertung der initialen und unterschrittenen Nachweiskriterien in Abhängigkeit der Simulationszeit zu finden. Da man durch das Handeln der Einsatzkräfte eine Verbesserung erwartet, wird hier das Unterschreiten der Nachweiskriterien überprüft.

Mit der *Abbildung 29* wird die Unterschreitung der drei Nachweiskriterien von Beginn der einsatztaktischen Maßnahmen bis zum Simulationsende ausgewertet. Visualisiert wurde zudem der Start der Überdruckbelüftung nach 1290 s (= 21:30 min) als horizontale Komponente. Mit Beginn der Überdruckbelüftung werden mit geringem Zeitversatz sämtliche Nachweiskriterien im Treppenraum unterschritten. Die thermischen und toxischen Gegebenheiten verbessern sich. Auch die Erhöhung der Sicht- und Erkennungsweite kann so nachweislich schnell und effektiv mit der Unterschreitung der Optischen Dichte D_L nachgewiesen werden. Der notwendige TR ist folglich in kürzester Zeit für die Bewohner des MFH wieder passierbar. Unter der Zuhilfenahme von Brandfluchthauben und weiteren Hilfestellungen der eingesetzten Einsatzkräfte, kann das Gebäude geräumt werden. Die Fremdrettungsphase durch die Trupps im Innenangriff über den 1. Rettungsweg kann folglich abgeschlossen werden. Aus der Ergebnisdarstellung ist zudem eine Stagnation der Optischen Dichte und der Gaskonzentration auf dem Podest im vierten Obergeschoss ersichtlich. Durch die strömungsmechanischen Einflüsse der Überdruckbelüftung kann in diesem Bereich keine Unterschreitung dieser Nachweiskriterien erwirkt werden.

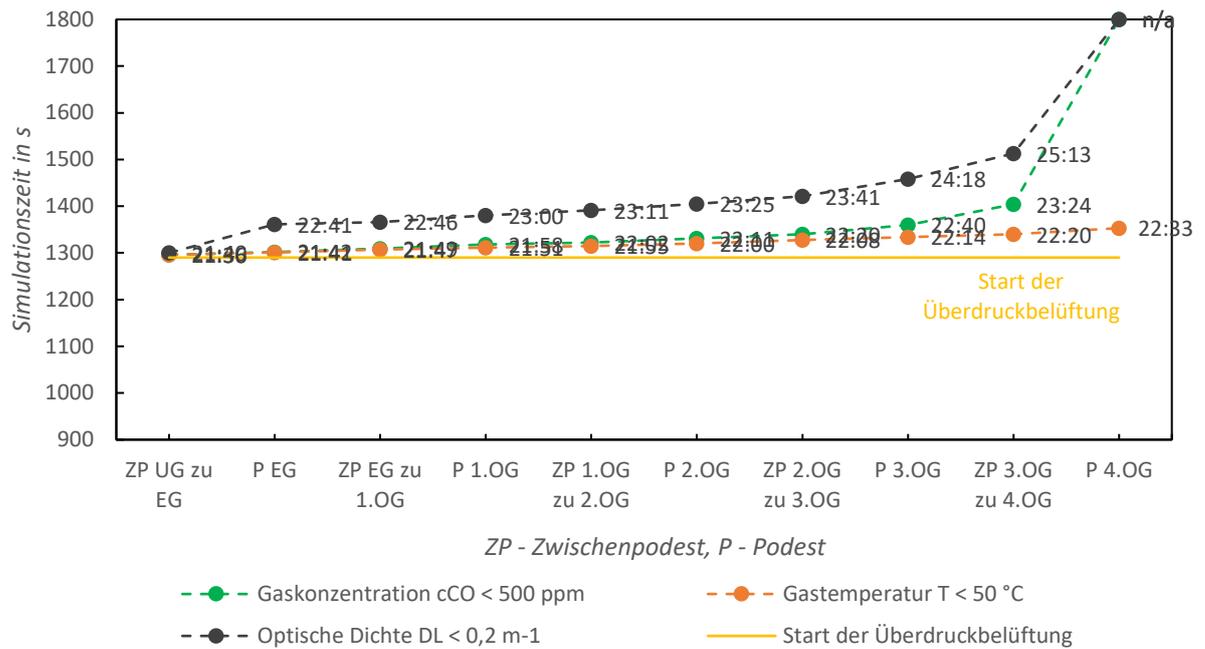


Abbildung 29: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_2_LEAK_1_REAC_1_FW. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien über die gesamte Gebäude- und Treppenraumhöhe in Abhängigkeit der Simulationszeit. Zusätzlich ist horizontal der Start der Überdruckbelüftung in gelb abgebildet.

Eine weiterführende einsatztaktische Auswertung bezüglich sämtlicher durch die Feuerwehr eingeleiteter Maßnahmen erfolgt in Kapitel 8.6.10 *Einsatztaktische Simulationsauswertung*.

8.6.5 S_3_LEAK_1_REAC_2

Die Simulation 3 dient als Verifizierungssimulation des implementierten Gebäudesystems und der REAC-Eingabe. Die Modellierung der Kanalquerschnittsflächen der dichtschließenden Wohnungsabschlüsse bleibt hierbei unverändert. Die Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten hingegen werden konservativer gewählt, um die Situation im notwendigen Treppenraum und in den WE konkretisieren zu können. Interventionsmaßnahmen der Feuerwehr werden nicht berücksichtigt.

In der *Anlage 5* ist die tabellarische Auswertung der initialen und überschrittenen Nachweiskriterien in Abhängigkeit der Simulationszeit zu finden.

Die Auswertungsergebnisse dieser Simulation sind in *Abbildung 30* und *Abbildung 31* dargestellt. Die Visualisierung erfolgt analog zu der Simulation S_1_LEAK_1_REAC_1.

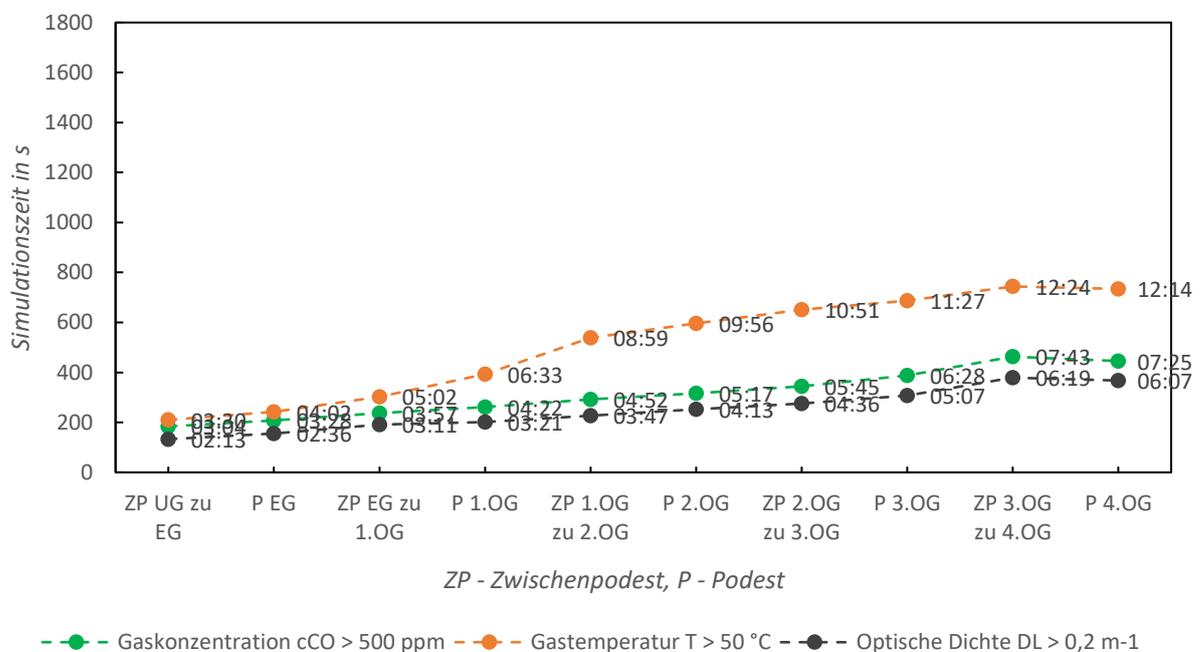


Abbildung 30: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_3_LEAK_1_REAC_2. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien über die gesamte Gebäude- und Treppenraumhöhe in Abhängigkeit der Simulationszeit.

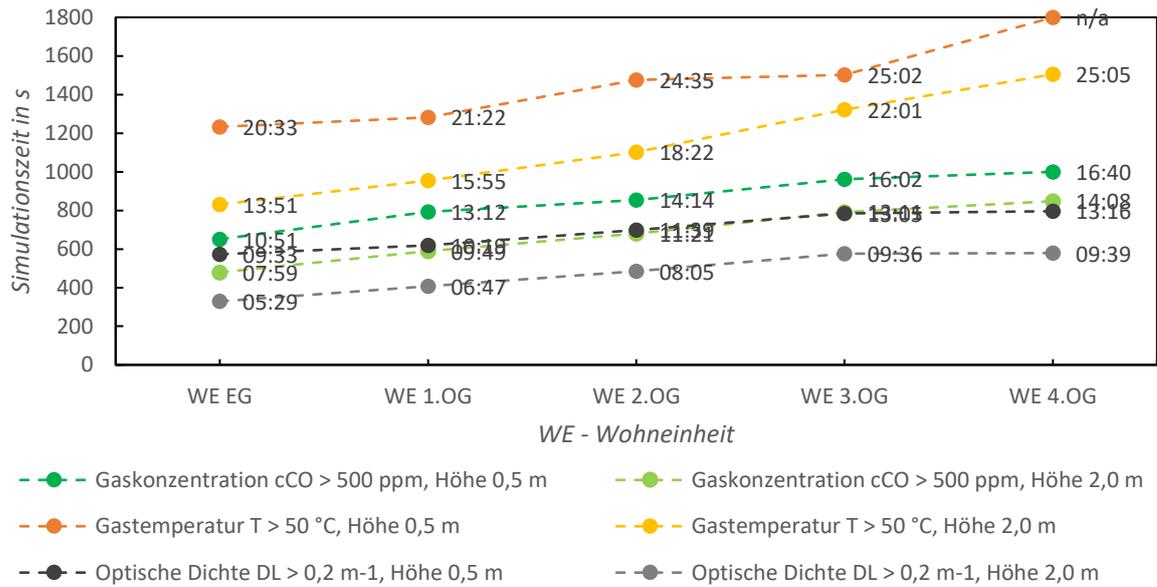


Abbildung 31: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_3_LEAK_1_REAC_2. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien in den Wohneinheiten in Abhängigkeit der Simulationszeit. Die Nachweisführung erfolgt anhand von jeweils zwei Auswertepunkten in den Höhen 0,5 m und 2,0 m.

Die Deutung und Bewertung der unterschiedlichen Eingangsbedingungen aller sechs Rauch- und Brandsimulation erfolgt in Kapitel 8.6.9 *Simulationsübergreifende Auswertung*.

8.6.6 S_4_LEAK_2_REAC_1

Die Simulation 4 fungiert als zweite Standardsimulation für die beiden nachfolgenden Simulation 5 und 6. Im Modellierungsansatz wurden die Kanalquerschnittsflächen für die dichtschießenden Abschlüsse der WE verdoppelt. Eine Variation der Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten findet erst in der Simulation 6 mit einer modifizierten REAC-Eingabe statt. Interventionsmaßnahmen der Feuerwehr werden nicht berücksichtigt.

In der *Anlage 5* ist die tabellarische Auswertung der initialen und überschrittenen Nachweiskriterien in Abhängigkeit der Simulationszeit zu finden.

Die Auswertungsergebnisse dieser Simulation sind in *Abbildung 32* und *Abbildung 33* dargestellt. Die Visualisierung erfolgt analog zu der Simulation S_1 und S_3.

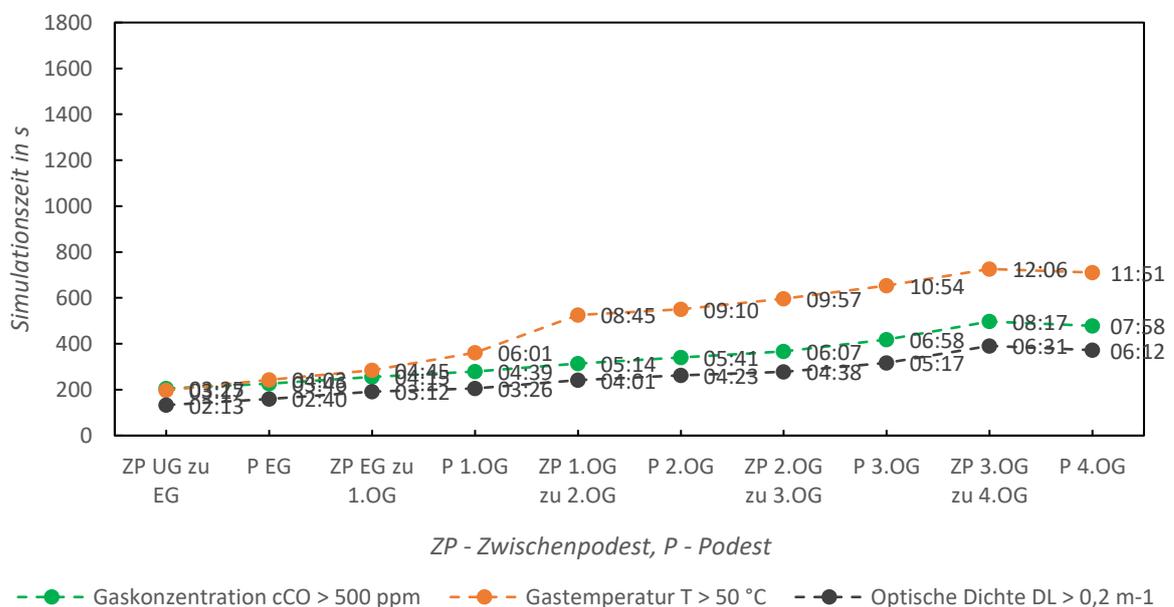


Abbildung 32: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_4_LEAK_2_REAC_1. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien über die gesamte Gebäude- und Treppenraumhöhe in Abhängigkeit der Simulationszeit.

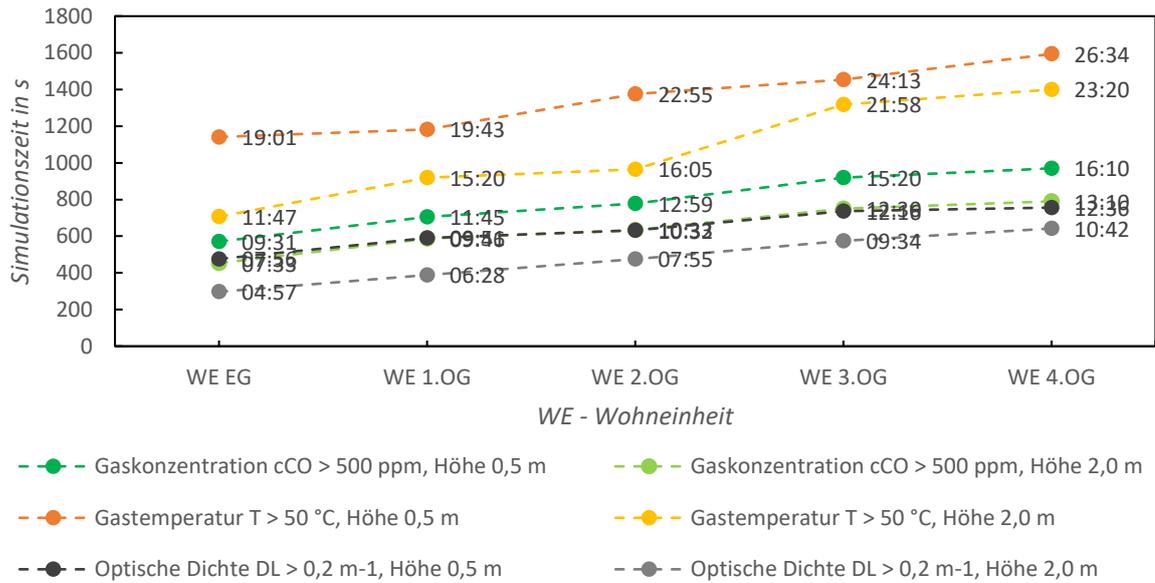


Abbildung 33: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_4_LEAK_2_REAC_1. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien in den Wohneinheiten in Abhängigkeit der Simulationszeit. Die Nachweisführung erfolgt anhand von jeweils zwei Auswertepunkten in den Höhen 0,5 m und 2,0 m.

Die Deutung und Bewertung der unterschiedlichen Eingangsbedingungen aller sechs Rauch- und Brandsimulation erfolgt in Kapitel 8.6.9 *Simulationsübergreifende Auswertung*.

8.6.7 S_5_LEAK_2_REAC_1_FW

In die Simulation 5 wurden ebenfalls die einsatztaktischen Herangehensweisen und Interventionsmaßnahmen der Feuerwehr integriert. Bis zum Eintreffen der ersten Einsatzkräfte am Wohngebäude entspricht die Simulation der vorherigen Simulation 4. Eine Auswertung findet daher lediglich für einen Zeitansatz von > 900 s (= 15 min), folglich im bereits belüfteten Treppenraum statt. Eine Deutung der Ergebnisse in den WE mit dem Beginn der einsatztaktischen Maßnahmen wird aufgrund mangelnder Plausibilität verworfen. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf dem zeitlichen Ansatz und der Effektivität der einsatztaktischen Maßnahmen in Bezug auf die Personensicherheit im MFH.

In der *Anlage 5* ist die tabellarische Auswertung der initialen und unterschrittenen Nachweiskriterien in Abhängigkeit der Simulationszeit zu finden. Da man durch das Handeln der Einsatzkräfte eine Verbesserung erwartet, wird hier das Unterschreiten der Nachweiskriterien überprüft.

Das Auswertungsergebnis dieser Simulation ist in *Abbildung 34* dargestellt. Die Visualisierung erfolgt analog zu der Simulation S_2_LEAK_1_REAC_1_FW.

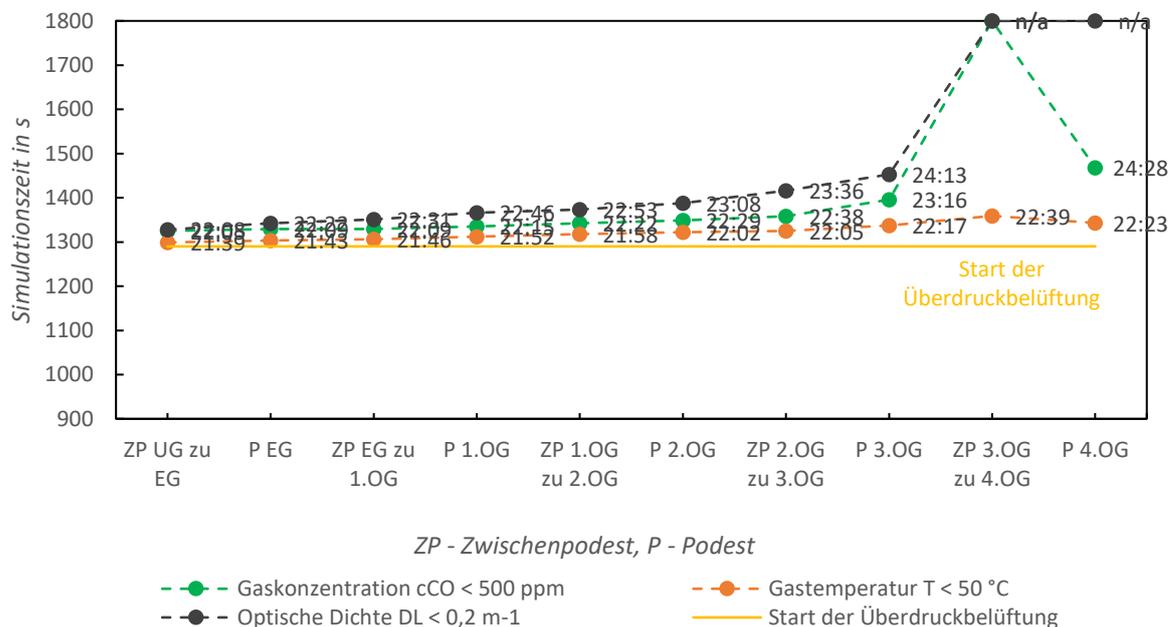


Abbildung 34: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_5_LEAK_2_REAC_1_FW. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien über die gesamte Gebäude- und Treppenraumhöhe in Abhängigkeit der Simulationszeit. Zusätzlich ist horizontal der Start der Überdruckbelüftung in gelb abgebildet.

Eine weiterführende einsatztaktische Auswertung bezüglich sämtlicher durch die Feuerwehr eingeleiteter Maßnahmen erfolgt in Kapitel 8.6.10 *Einsatztaktische Simulationsauswertung*.

8.6.8 S_6_LEAK_2_REAC_2

Bei der Simulation 6 handelt es sich um das konservativste Gesamtsystem. Das realitätsnähere Pendant ist die Simulation 1. Sowohl die Annahmen für die Implementierung der Kanalquerschnittsflächen einer dichtschießenden Tür als auch die Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten wurden konservativ gewählt. Diese Verifizierungssimulation unterscheidet sich folglich lediglich in der REAC-Eingabe zu der Simulation 4. Interventionsmaßnahmen der Feuerwehr werden nicht berücksichtigt.

In der *Anlage 5* ist die tabellarische Auswertung der initialen und überschrittenen Nachweiskriterien in Abhängigkeit der Simulationszeit zu finden.

Die Auswertungsergebnisse dieser Simulation sind in *Abbildung 35* und *Abbildung 36* dargestellt. Die Visualisierung erfolgt analog zu der Simulation S_1, S_3 und S_4.

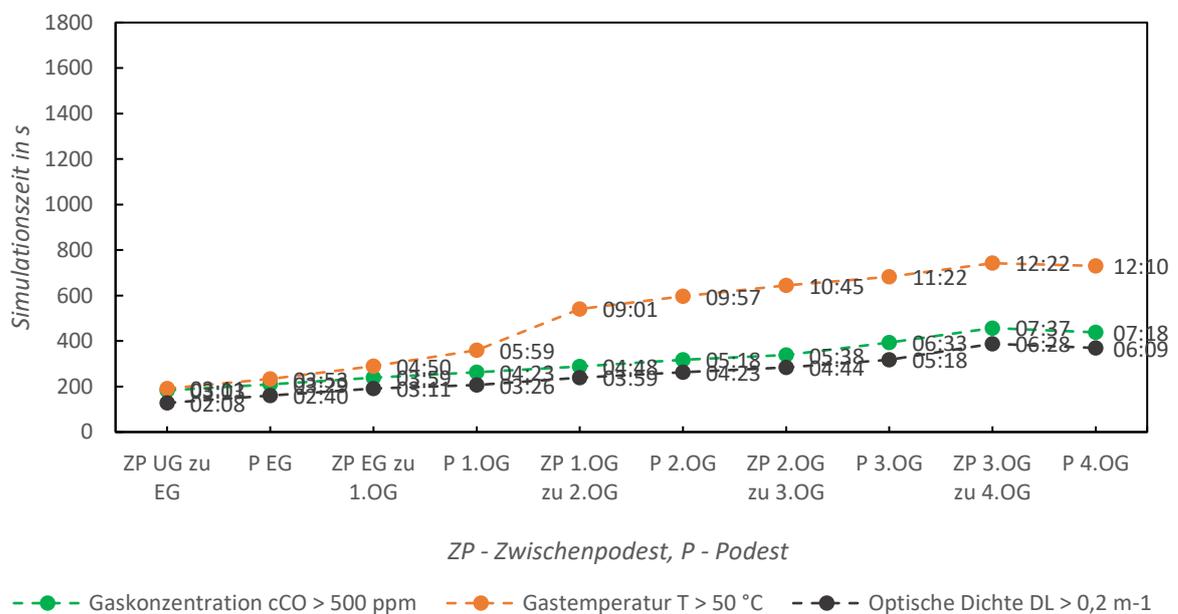


Abbildung 35: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien im Treppenraum - S_6_LEAK_2_REAC_2. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien über die gesamte Gebäude- und Treppenraumhöhe in Abhängigkeit der Simulationszeit.

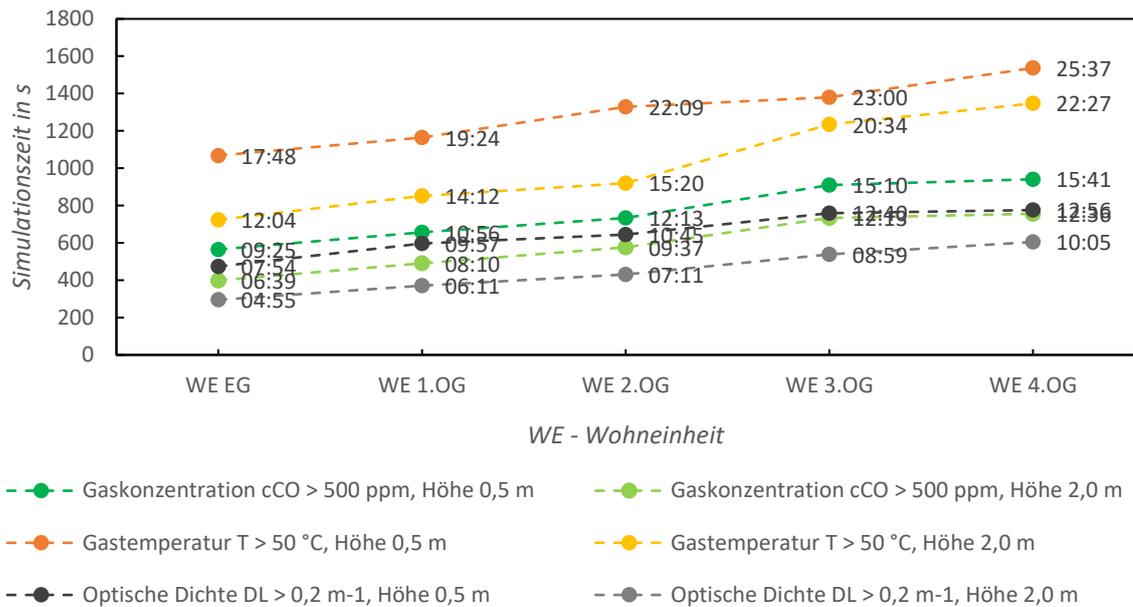


Abbildung 36: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_6_LEAK_2_REAC_2. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien in den Wohneinheiten in Abhängigkeit der Simulationszeit. Die Nachweisführung erfolgt anhand von jeweils zwei Auswertepunkten in den Höhen 0,5 m und 2,0 m.

Die Deutung und Bewertung der unterschiedlichen Eingangsbedingungen aller sechs Rauch- und Brandsimulation erfolgt in Kapitel 8.6.9 *Simulationsübergreifende Auswertung*.

8.6.9 Simulationsübergreifende Auswertung

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den Brand- und Rauchgassimulationen ohne einsatztaktische Einflussnahme der Feuerwehr findet eine Differenzierung der implementierten Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Wohnungsabschlüsse und der beiden REAC-Eingaben statt. Berücksichtigt werden für den nachfolgenden Vergleich lediglich die Simulation S_1, S_3, S_4 und S_6.

In der *Abbildung 37 (A-C)* wird der Einfluss der unterschiedlichen Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Abschlüsse und die Variation der REAC-Eingabe ersichtlich. Dargestellt wird das Erreichen der Nachweiskriterien in allen WE des MFH. Als Vergleichspunkte je Simulation dienen die türseitigen Auswertepunkte in einer Höhe von 2,0 m. Die Untergliederung der Darstellung in A-C resultiert aus den drei zu unterscheidenden Nachweiskriterien – Gaskonzentration c_{CO} (A), Gastemperatur T (B) und optische Dichte D_L (C).

Die initiale Standardsimulation S_1 (gelb) mit dem modellierten Leckagepfad LEAK_1 und einer Kanalquerschnittsfläche von $0,01 \text{ m}^2$ überschreitet alle Nachweiskriterien in den WE mit deutlichem zeitlichen Versatz als letztes.

Die Variation der REAC-Eingabe bezüglich der konservativen Ruß- und Kohlenstoffmonoxidausbeuten (REAK_2) hat lediglich einen marginalen Einfluss auf das Erreichen der Nachweiskriterien der Optischen Rauchdichte und der Gastemperatur in den WE. Der Einfluss auf das Nachweiskriterium der Gaskonzentration hingegen ist deutlich sichtbar. Grafisch abgebildet wird dies in *Abbildung 37 (A)* und dem Vergleich von S_1 (gelb) und S_3 (blau).

Bei der konservativsten Kombination der Kanalquerschnittsfläche (LEAK_2) und der REAC-Eingabe (REAC_2) der Simulation S_6 (grün) werden alle Nachweiskriterien in den WE am schnellsten übertroffen. Verdeutlichend dargestellt in *Abbildung 37 (A-C)*.

Die Ergebnisse der zeitlichen Quantifizierung der Nachweiskriterien in den WE über die vier Simulationsvariationen werden als plausibel bewertet.

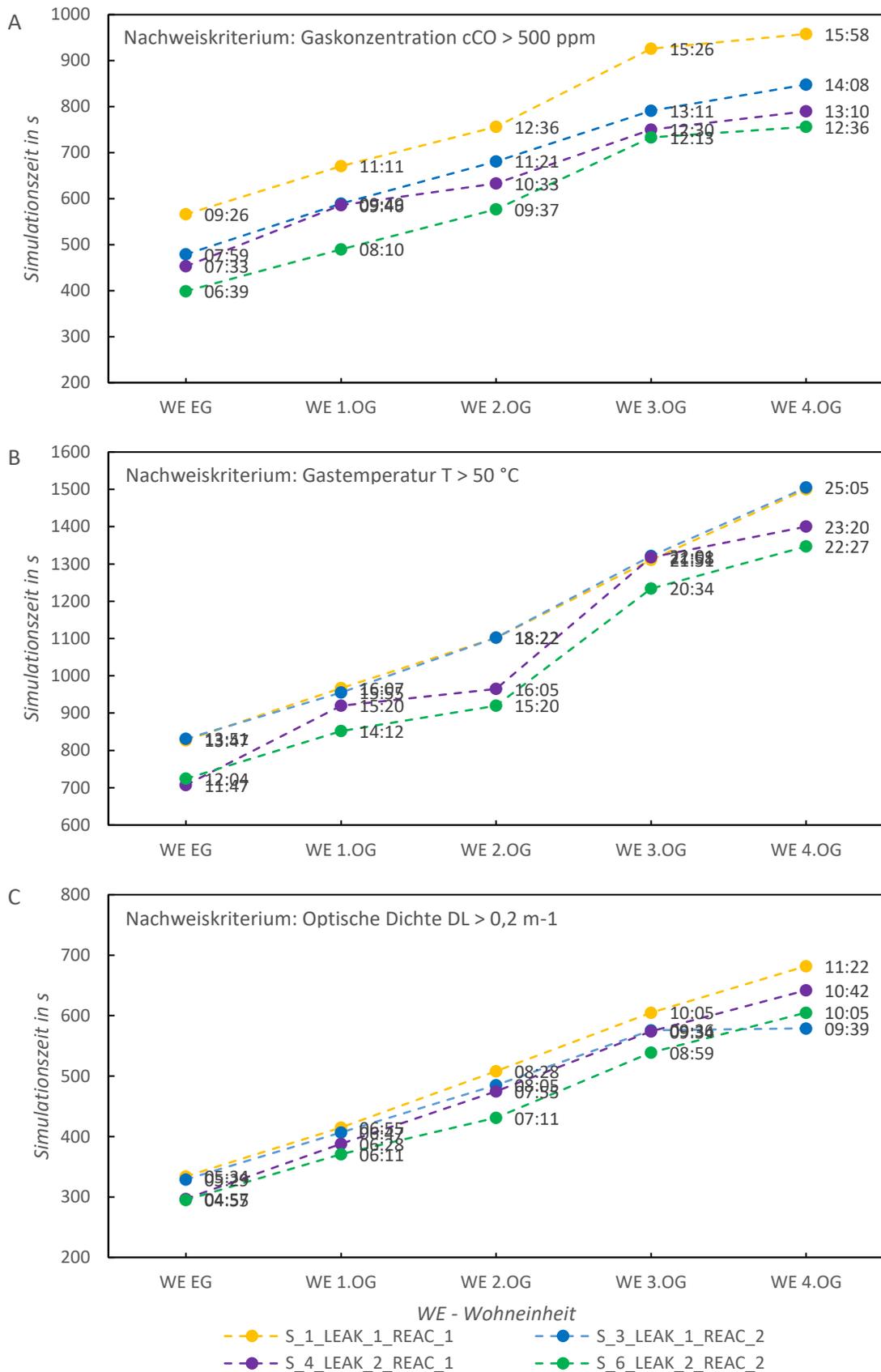


Abbildung 37: Ergebnisdarstellung der Nachweiskriterien in den Wohneinheiten - S_1, S_3, S_4 und S_6. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien (A-C) in den Wohneinheiten in Abhängigkeit der Simulationszeit. Der Vergleich erfolgt anhand der Auswertepunkte in 2,0 m Höhe direkt hinter dem dichtschließenden Wohnungsabschluss.

Rauchwarnmelder – *smoke detector*

Anhand der nachfolgenden *Abbildung 38* werden die Auslösezeiten der Rauchwarnmelder in den WE und im Untergeschoss des TR dargestellt. Da alle Rauchwarnmelder bereits vor dem Eintreffen der Feuerwehr und dem Beginn der einsatztaktischen Maßnahmen ausgelöst haben, müssen diese Simulationen (S_2 und S_5) nicht berücksichtigt werden. Zu beobachten ist ein korrelierendes Ansprech- und Auslöseverhalten der Rauchwarnmelder aller Simulationen. Ersichtlich wird zudem, dass die Variation der REAC-Eingabe lediglich einen geringen Einfluss auf das Ansprechverhalten der Rauchwarnmelder hat. Die Variation der modellierten Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Wohnungsabschlüsse hingegen hat einen Einfluss auf die Ansprechzeiten. Der Auslöseschwellenwert wird bei den beiden Simulationen S_4 und S_6 mit LEAK_2 (0,02 m²) früher überschritten. Alle Rauchwarnmelder lösen hier früher aus.

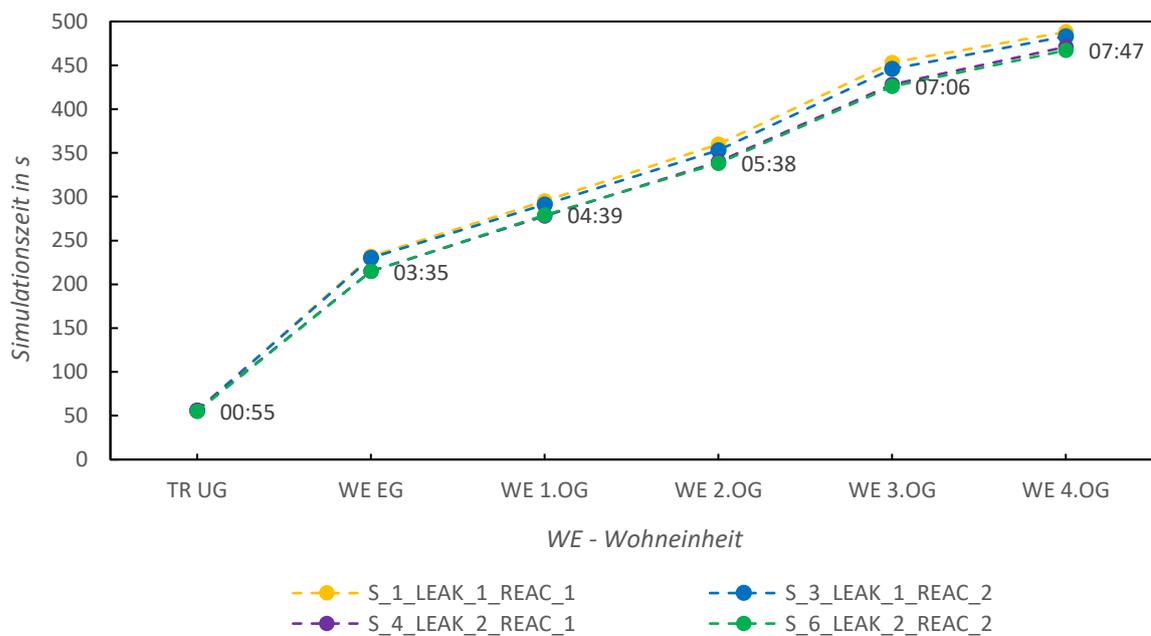


Abbildung 38: Ergebnisdarstellung der Rauchwarnmelder (*smoke detector*) der Simulationen S_1, S_3, S_4 und S_6. Dargestellt ist das zeitliche Auslöseverhalten von allen Rauchwarnmeldern im MFH. Es werden lediglich die Simulationen ohne einsatztaktische Einflussnahme berücksichtigt. Die konkreten Zeitpunkte wurden lediglich für einen der vier Kurven angegeben, da alle vier eng beieinander liegen.

Neben den fünf bauordnungsrechtlich vorgeschriebenen Rauchwarnmeldern in den WE wurde in allen Simulationen ein Rauchwarnmelder im Untergeschoss des notwendigen TR (TR UG) initialisiert und ausgewertet. Diese Positionierung dient der Quantifizierung einer Brand- und Rauchgasfrüherkennung im Bereich sämtlicher Kellerzugänge. Vergleicht man das zeitliche Ansprech- und Auslöseverhalten der Rauchwarnmelder so kann festgestellt werden, dass der Auslöseschwellenwert bei allen Simulationen nach 55 s bis 56 s erreicht wird (vgl. *Abbildung 37*). Der konservativste Auslösezeitpunkt eines Rauchwarnmelders in der erdgeschossigen WE (bauordnungsrechtlicher Mindestschutz) liegt bei 232 s (= 3:52 min). Die zeitliche Differenz von ca. 3 min ist jedoch trügerisch und kann fatale Auswirkungen auf das Selbstrettungsverhalten der Bewohner haben. Ein internes Hausalarmierungssystem – ohne Aufsaltung einer ständig besetzten Stelle – könnte die Bewohner so bereits nach 55 s auf ein Brandereignis im Bereich der Kellerzugänge aufmerksam machen. Ein schnelles und rationales Handeln der Bewohner ist im Folgenden Voraussetzung für die aufgestellte These. Mit der internen Alarmierung 55 s nach Brandausbruch bleibt den Bewohnern für die Selbstrettungsphase über den ersten baulichen Rettungsweg lediglich ein Zeitfenster von 60 s bis 90 s. Wie sich aus der Deutung der weiteren Auswertepunkte im TR ergibt, werden alle Nachweiskriterien auf der Höhe des Gebäudeeingangs (ZP UG zu EG) nach 120 s bis 210 s überschritten (vgl. *Abbildungen 27, 30, 32 und 35*). Eine sichere Selbstrettung der Bewohner wäre danach nicht mehr möglich.

Der Ansatz dieser zusätzlichen Brand- und Rauchgasfrüherkennung bringt also keinen ausreichenden Mehrwert. Die zeitliche Differenz zwischen dem Ansprechverhalten der Rauchwarnmelder und dem Überschreiten der Nachweiskriterien im notwendigen TR (Hauseingangsbereich) ist zu gering. Vor allem zu nachtschlafender Zeit benötigen die Bewohner einen größeren zeitlichen Vorlauf, um das MFH sicher im Zuge der Selbstrettungsphase verlassen zu können. Für ältere Hausbewohner oder mobilitätseingeschränkte Personen ist dieser Zeitansatz keinesfalls realisierbar. Der dichtschießende Wohnungsabschluss zum notwendigen Treppenraum sollte im Brandfall folglich stets verschlossen gehalten werden.

8.6.10 Einsatztaktische Simulationsauswertung

Bei der einsatztaktischen Ergebnisauswertung der Brand- und Rauchgassimulationen mit einsatztaktischer Einflussnahme der Feuerwehr findet eine Differenzierung der implementierten Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Wohnungsabschlüsse statt. Berücksichtigt werden für den nachfolgenden Vergleich lediglich die Simulation S_1, S_2 S_4 und S_5.

Anhand der *Abbildung 39* wird die einsatztaktische Einflussnahme auf das Brand- und Rauchgasverhalten der Simulation verdeutlicht. Exemplarisch wird für diese Darstellung die Simulation S_2 gewählt. Die beiden Simulationen mit einsatztaktischen Interventionsmaßnahmen (S_2 und S_5) unterscheiden sich lediglich in ihrer LEAK-Ausführung. Diese ist für die nachfolgende Auswertung nicht von Relevanz, da lediglich die Maßnahmen der Feuerwehr auf den notwendigen Treppenraum gedeutet werden. Dargestellt ist der zeitliche Verlauf der aufgezeichneten Werte der Auswertepunkte auf einer Höhe von 2,0 m. Visualisiert wurden lediglich die Auswertepunkte auf der Podestseite des MFH, direkt vor den Wohnungsabschlüssen. Die Untergliederung der Darstellung in A-C resultiert aus den drei zu unterscheidenden Nachweiskriterien – Gastemperatur T (A), optische Dichte D_L (B) und Gaskonzentration c_{CO} (C).

Mit dem Öffnen der Gebäudeeingangstüre durch die Interventionskräfte ist ein deutlicher und sprunghafter Temperaturanstieg im erdgeschossigen Bereich zu beobachten (siehe *Abbildung 39 (A)*). Dem stark unterventilierten Brandgeschehen steht plötzlich eine deutliche Mehrmenge an Luftsauerstoff zur Verfügung. Es folgt eine Rauchgasdurchzündung im Objekt, dieses Phänomen wird ausführlich in Kapitel 8.6.11 *Brandverlaufphasen* beschrieben.

Die implementierten einsatztaktischen Maßnahmen sind in der Legende in der *Abbildung 39 (A)* aufgelistet und werden in der Darstellung mit Hilfe von vertikalen Markierungen visualisiert.

Beobachtet werden kann, dass sich die Situation nach dem Erlöschen des Brandes und dem Schaffen von Abluftöffnungsflächen im TR schnell und konsequent über alle Nachweiskriterien verbessert. Der Start der Überdruckbelüftung ist hierbei nicht von Bedeutung. Die Aktivierung erfolgt erst nach 1290 s (= 21:30 min), wobei sich zu diesem Zeitpunkt schon alle Werte in einen deutlichen niedrigeren Bereich abgesenkt haben.

Eine natürliche Belüftung des TR durch die geöffneten Fensterabluftflächen der Einsatzkräfte im Innenangriff hat einen schnellen und positiven Einfluss auf alle Nachweiskriterien. Eine Verbesserung der Sichtverhältnisse und die Reduzierung der Umgebungstemperatur im TR ermöglicht den eingesetzten Trupps eine schnellere Menschenrettung und die Kontrolle des TR.

Durch einen geringen zeitlichen Versatz von lediglich einer Minute zwischen dem Öffnen des letzten Treppenraumfensters und dem Beginn der Überdruckbelüftung kann in den Simulationen mit einsatztaktischer Einflussnahme kein Nachweiskriterium vor dem Start der maschinellen Lüftung unterschritten werden (vgl. *Abbildung 29 und 34*). Durch eine zeitliche Verschiebung der Überdruckbelüftung um 120 s (= 2 min) nach hinten, hätten sämtliche Nachweiskriterien auf natürlichem Wege unterschritten werden können. Dieses Auswertungsergebnis hat einen wesentlichen einsatztaktischen Stellenwert. In der Erstphase des Einsatzes stehen lediglich begrenzte personelle Ressourcen zur Verfügung. Hier ist es nicht immer möglich für die Vornahme, die Positionierung und die Inbetriebnahme der maschinellen Überdruckbelüftung einen Trupp zur Verfügung zu stellen. Durch das gezielte und konsequente Schaffen von natürlichen Abluftöffnungsflächen kann die Ausgangssituation für die eingesetzten Trupps im Innenangriff schnell und nachhaltig verbessert werden.

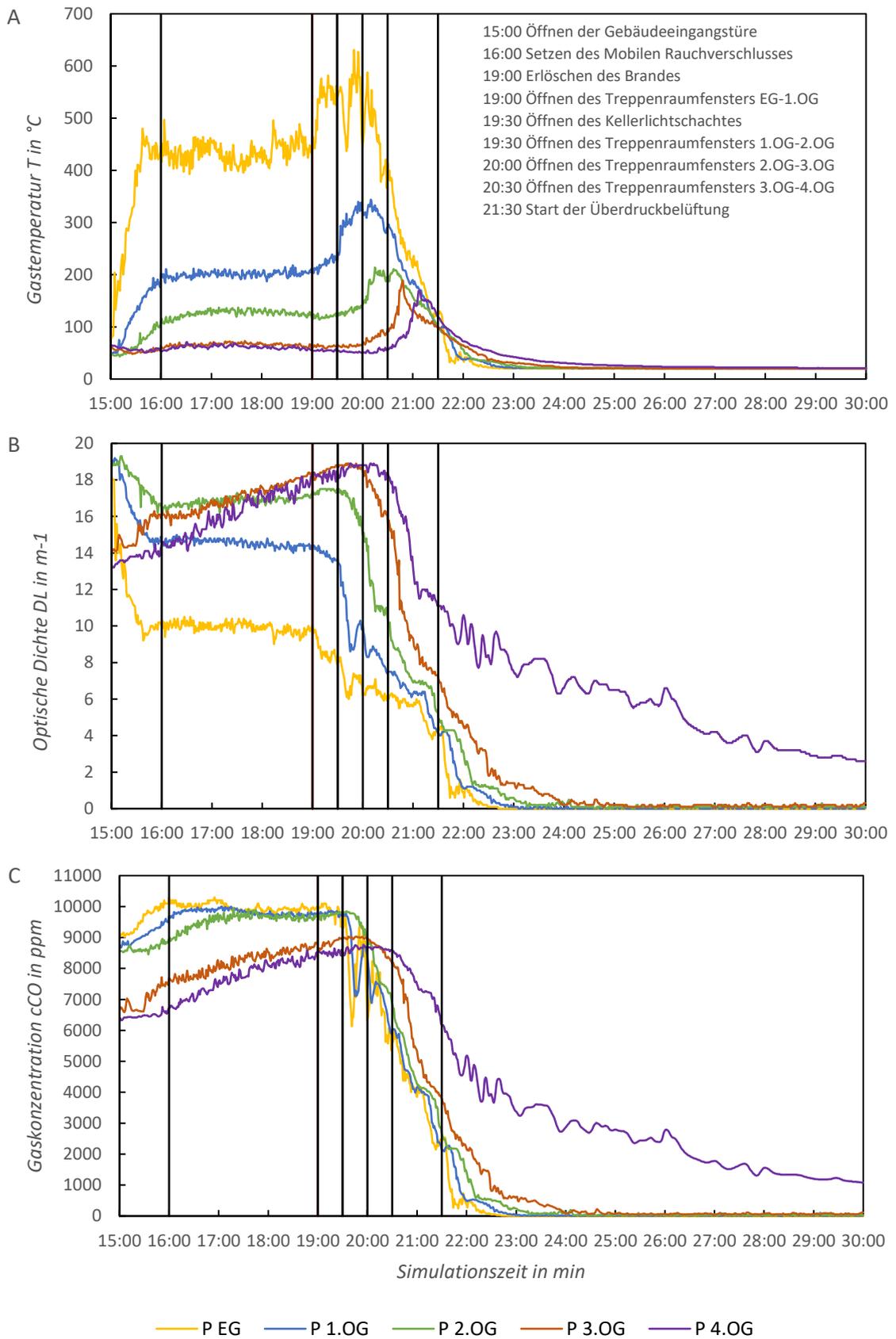


Abbildung 39: Ergebnisdarstellung der einsatztaktischen Maßnahmen im Treppenraum - S_2_LEAK_1_REAC_1_FW. Dargestellt sind alle drei Nachweiskriterien (A-C) im notwendigen Treppenraum in Abhängigkeit der Simulationszeit. Der Vergleich erfolgt anhand der Auswertepunkte in 2,0 m Höhe auf den Geschosspodesten.

Abschließend wird mit der *Abbildung 40 (A-B)* die Situation in der erdgeschossigen WE verdeutlicht. Dargestellt sind zwei Simulationen mit einsatztaktischen Interventionsmaßnahmen (S_2 und S_5) und die entsprechenden Simulationen ohne Maßnahmen der Feuerwehr (S_1 und S_4). Sowohl bei der Gaskonzentration (A) als auch bei der Optischen Dichte (B) stellt sich über den zeitlichen Verlauf der vier Simulationen eine Stagnation ein. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die Simulationen mit einsatztaktischer Einflussnahme frühzeitig in eine Stagnation auf einem geringeren Niveau übergehen. Bei den Simulationen ohne Interventionsmaßnahmen hingegen, ist eine deutlich spätere und höhere Stagnation festzustellen.

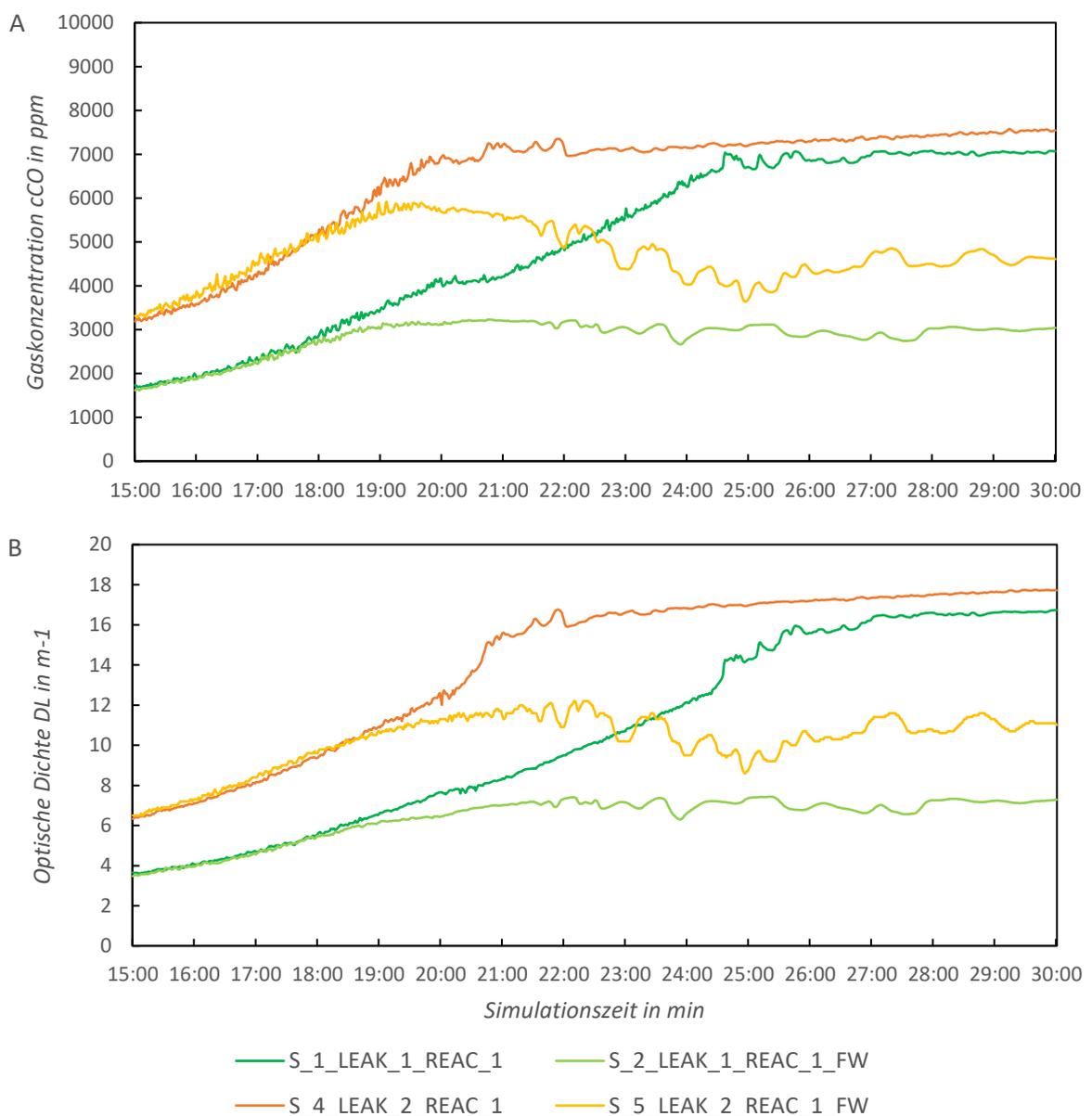


Abbildung 40: Ergebnisdarstellung der Einflussnahme von einsatztaktischen Maßnahmen auf die WE EG der Simulationen S_1, S_2, S_4 und S_5. Dargestellt sind zwei Nachweiskriterien (A und B) in der Wohneinheit in Abhängigkeit der Simulationszeit. Der Vergleich erfolgt anhand der Auswertepunkte in 2,0 m Höhe direkt hinter dem dichtschließenden Wohnungsabschluss.

8.6.11 Brandverlaufphasen

Die Deutung der Wärmefreisetzungsrate (HRR) über die gesamte Simulationszeit erfolgt mittels einer Gegenüberstellung der händisch ermittelten Daten und der Daten aller sechs Brand- und Rauchgassimulationen. Berücksichtigt werden die ermittelten Daten des brandlastgesteuerten Bemessungsbrandes nach Kapitel 6.3 *Festlegung der Brandverlaufphasen* und des ventilationsgesteuerten Brandgeschehens mit erfülltem *Flashover*-Kriterium nach der *Anlage 2: Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände nach DIN EN 1991-1-2/NA – Anhang AA und BB*. Die nachfolgende *Abbildung 41* zeigt alle sechs Brandverlaufphasen.

Die mittels Handrechenverfahren bestimmten Brandverläufe für das brandlast- und ventilationsgesteuerte Brandgeschehen korrespondieren bis zu dem Zeitpunkt $t_{1,fo} = 544,98$ s. Das ventilationsgesteuerte Brandgeschehen wechselt danach sprunghaft – aufgrund einer Rauchgasdurchzündung – von der Brandentwicklungsphase in die stationäre Vollbrandphase. Diese stationäre Phase wird durch keine der sechs Simulationen bei einer zeitlichen Betrachtung von ≤ 1800 s verlassen. Der Wechsel in die abklingende Brandphase mit der Verbrennung von 70 % der zur Verfügung stehenden Brandlast kann demzufolge bei allen sechs modellierten Simulationen nicht betrachtet werden.

Aus der Darstellung auf der Folgeseite ist zudem für alle sechs Simulationen ein unterventiliertes Brandgeschehen ersichtlich. Die Simulationsdifferenzen zueinander sind hierbei als marginal zu bewerten und auf die variierende REAC-Eingabe und die veränderten Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Abschlüsse zurückzuführen. Stellenweise ist über den Simulationsverlauf ein für den Kellerbrand typisches pulsierendes Rauchgasverhalten erkennbar. Mit flächenmäßiger Ausbreitung des Brandgeschehens nimmt auch der Sauerstoffbedarf für die Verbrennung zu. Die initialen und realitätsnahen Ventilationsöffnungsflächen können diesen Bedarf nicht ausreichend decken. Um einen maximalen Realitätsbezug zu einem ausgedehnten und unterventilierten Kellerbrandszenario zu wahren, wird dieses Verhalten lediglich geringfügig durch angekippte Fensteröffnungen kompensiert (vgl. Kapitel 8.7 *Plausibilitätsprüfung der Brand- und Rauchgassimulation*). Aus der *Abbildung 41* ist zudem ein plötzlicher und intensiver Anstieg – Rauchgasdurchzündung – der HRR der Simulationen S_2 und S_5 erkennbar. Die sprunghafte Zunahme korrespondiert zeitlich mit dem Öffnen der Gebäudeabschlussöffnung 900 s (= 15 min) nach Brandausbruch. Im Vergleich zu den Simulationen ohne Maßnahmen der Feuerwehr steht dem Bemessungsbrand so plötzlich eine größere Sauerstoffmenge zu Verfügung. Das Brandgeschehen wechselt in die Vollbrandphase.

Die Annahme einer erfolgreichen Brandbekämpfung des ausgedehnten Kellerbrandes durch die Interventionskräfte nach 1140 s (= 19 min) und der hiermit verbundenen Absenkung der Wärmefreisetzungsrate ist ebenfalls aus der Darstellung der Simulationen S_2 und S_5 ersichtlich.

Bei den Simulationen S_1, S_3, S_4 und S_6 ist eine Zunahme der HRR nach ungefähr 1020 s (= 17 min) zu beobachten. Dies resultiert aus dem flächenmäßigen Ausbrand der Brandlasten des Bemessungsbrandes. Dem noch verbleibenden Brandgeschehen steht eine ausreichende Menge an Luftsauerstoff zur Verfügung. Eine Änderung der Ventilationsöffnungsbedingungen erfolgt nicht.

Die maximalen Wärmefreisetzungsraten \dot{Q}_{max} der Simulationen kommen den rechnerisch ermittelten Daten über den zeitlichen Ansatz von 30 Minuten sehr nahe (siehe *Abbildung 41*). Die Wahl der nominalen Kantenlänge einer Gitterzelle von $\delta x = 0,15$ m kann abschließend als geeignet bestätigt werden.

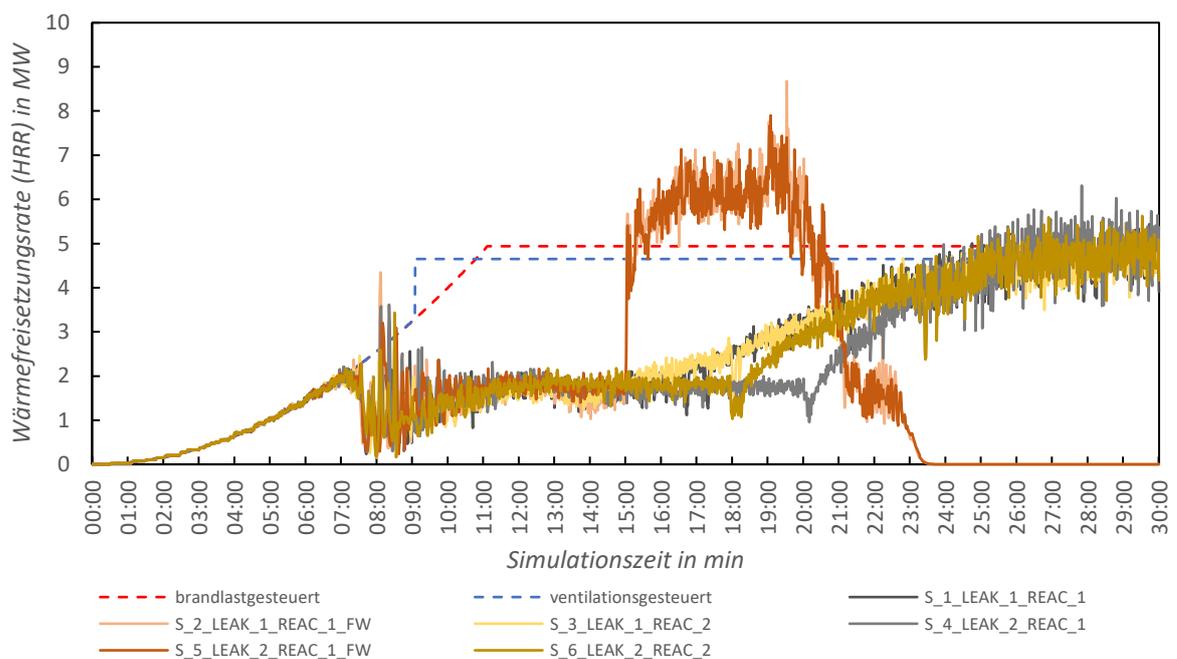


Abbildung 41: Charakteristische Brandverlaufphasen der Brand- und Rauchgassimulationen. Dargestellt ist neben den sechs Simulationsauswertungen auch das rechnerisch ermittelte brandlastgesteuerte und ventilationsgesteuerte Brandverhalten.

8.7 Plausibilitätsprüfung der Brand- und Rauchgassimulation

Zu Beginn der Simulationsmodellierung wurden die implementierten Einzelsysteme, wie die Überdruckbelüftung, das Setzen des Mobilien Rauchverschlusses und das Schaffen von Ventilationsabluftöffnungsflächen mit Hilfe von Kleinstsimulationen verifiziert. Unter Beachtung von fundierten naturwissenschaftlichen Herangehensweisen konnten so die einsatztaktischen Maßnahmen in die Brand- und Rauchgassimulation integriert werden.

Die Verifikation der modellierten Kanalquerschnittsfläche der dichtschießenden Wohnungsabschlüsse fand unter Zuhilfenahme der Modellierungsansätze *leak_test_2.fds* und *door_crack.fds* aus dem *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification* statt.¹⁰⁴

Bei den ersten Berechnungen über einen Zeitanatz von 1800 s (= 30 min) traten numerische Instabilitätsfehler auf und sorgten so für einen Abbruch der Simulation. Aus der generierten Fehlermeldung konnten druck- und geschwindigkeitsbehaftete Iterationsfehler ermittelt werden. Zurückgeführt werden konnte dies auf die zu Beginn fehlenden Ventilationsöffnungsflächen und natürliche Leckagepfade. Das Gebäudegesamtsystem war demzufolge zu dicht, ein Austausch mit der Umgebung fand nicht statt. Der exponentielle Druckverlauf führte letztendlich zum Abbruch der Simulation. Dies konnte mit drei angekippten Fensteröffnungsflächen und einer Reduzierung der Fläche des Bemessungsbrands von anfänglich 27,54 m² auf 17,64 m² kompensiert werden. Zu diskutieren wäre hier sicher eine zusätzliche Modellierung eines Bemessungsbrandes mit einer maximalen Wärmefreisetzungsrate von $\dot{Q}_{max} = \leq 1$ MW gewesen. Dieser Aspekt konnte aus kapazitiven und zeitlichen Gründen nicht weiterverfolgt werden. Die Rechenzeit einer Simulation mit der zur Verfügung stehenden Hardware lag bei ungefähr sechs Tagen.

Die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke aus dem Brandraum in den notwendigen Treppenraum sind unter Achtung des unterventilierten Brandgeschehens nachvollziehbar und plausibel. Die Zusammenhänge von Gastemperatur, Optischer Rauchdichte und Gaskonzentration von Kohlenstoffmonoxid, verteilt über den ersten baulichen Rettungsweg und die idealisierten Wohneinheiten, konnte über diverse Simulationskonfigurationen realitätsgetreu abgebildet werden. Sie hierzu Kapitel 8.6.9 *Simulationsübergreifende Auswertung*.

¹⁰⁴ McGratten et al. 2020b: 206-235

Eine Plausibilitätsprüfung der Brandsimulation auf Grundlage von Experimentaldaten aus einem Realbrandversuch im Jahre 1998 in Leipzig musste aus diversen Gründen verworfen werden. Die Ergebnisse aus diesem achtgeschossigen Plattenbaubrand sind lediglich auszugsweise in einer vfdb-Zeitschrift „*Der Brand in Räumen*“ veröffentlicht worden. Der Realbrandversuch beschränkte sich zudem lediglich auf eine horizontale Brand- und Rauchausbreitung in einem Geschoss über einen notwendigen Flur. Eine vertikale Rauch- und Schadstoffausbreitung über einen notwendigen Treppenraum wurden damals nicht untersucht. Weitere bauliche Gegebenheiten wie die Türanforderungen, Stichflure und Schleusen unterscheiden sich ebenfalls von der modellierten und ausgewerteten Brandsimulation. Außerdem handelte es sich um einen Flüssigkeitsbrand aus Isopropanol und Dieselmotorenkraftstoff, während im Rahmen dieser Arbeit ein ausgedehnter Feststoffbrand im Kellerbereich simuliert wird.

9 Zusammenfassung der einsatztaktischen Erkenntnisse

Durch die kombinierte Betrachtung der Brand- und Rauchgassimulation und der einsatztaktischen Herangehensweise der Feuerwehr wird ein abschließender Erkenntniszuwachs erlangt. Anhand der nachfolgenden prägnanten Aussagen entsteht so eine komprimierte Darstellung der Auswertungsergebnisse. Die situativen Gegebenheiten für die Bewohner und die eingesetzten Interventionskräfte werden in chronologischer Reihenfolge ab der Minute 15 nach Brandausbruch aufgezeigt.

Durch das Öffnen der Hauseingangstüre des Mehrfamilienhauses kann es infolge einer Luftsauerstoffzufuhr zu einer Rauchgasdurchzündung des stark unterventilierten Brandgeschehens kommen.

Das Setzen des mobilen Rauchverschlusses im Übergangsbereich zwischen Brandraum und notwendigem Treppenraum hat einen positiven Effekt auf die weiteren toxischen und thermischen Expositionen in den Treppenraum. Der Angriffstrupp sollte dieses einsatztaktische Mittel zwingend zum Einsatz bringen, um eine räumliche Trennung während der Brandbekämpfungsmaßnahmen aufrechtzuerhalten.

Den ersten Trupp im Innenangriff (Angriffstrupp) zur Brandbekämpfung im Keller einzusetzen, hat eine Vielzahl an einsatzrelevanten Vorteilen und einen positiven Effekt auf die Personensicherheit in den Wohnungen. Die Gefahr der Ausbreitung für die Bewohner, die Mannschaft und die Sachwerte kann schnell und effektiv reduziert werden (vgl. *Abbildung 2*). Durch die bereits eingeleiteten Brandbekämpfungsmaßnahmen im Untergeschoss existiert für den zweiten eingesetzten Trupp (Wassertrupp) eine hinreichende Rückwegsicherung.

Das Schaffen von umfangreichen Ventilationsöffnungsflächen im Treppenraum durch den zweiten eingesetzten Trupp zur Menschenrettung (Wassertrupp) konnte durch die Brandsimulation belastbar dargestellt werden. Mit der natürlichen Belüftung des Treppenraumes erzielt man schnell und effektiv eine Verbesserung der thermischen und toxischen Gegebenheiten. In den Wohneinheiten kommt es zu einer Stagnation, die Expositionswerte steigen nicht weiter an. Aufgrund der Höhe der Werte der Stagnation verbirgt sich jedoch kein sicherer oder teilsicherer Bereich hinter den dichtschießenden Wohnungsabschlüssen. Das Gebäude muss in adäquater Zeit geräumt werden und alle Personen über den ersten baulichen Rettungsweg oder die Geräte der Feuerwehr (2. Rettungsweg) in Sicherheit gebracht werden. Durch die natürliche Belüftung kann eine einfache und schnelle Reduzierung der Expositionswerte der drei Nachweiskriterien erreicht werden. Durch den eingesetzten Wassertrupp sollten folglich alle Abluftöffnungsflächen

im Treppenraum genutzt und geöffnet werden. Es ist schlussendlich mit verbesserten Sichtverhältnissen und thermischen Umgebungsbedingungen, sowie mit geringeren Kohlenstoffmonoxidkonzentrationen während der Kontrolle des Treppenraumes, der Kontrolle der Wohnungen und der Räumung des Objektes während der Fremdrettungsphase zu rechnen.

Eine Zunahme der Effektivität von natürlicher Belüftung über die Abluftöffnungsflächen in Kombination mit dem Beginn der maschinellen Überdruckbelüftung kann lediglich geringfügig aufgezeigt werden. Die Ausgangssituation der drei Nachweiskriterien im Treppenraum verbessert sich bereits vor dem Beginn der Überdruckbelüftung nachweisbar. Anhand der Auswertungsergebnisse kann durch den Start der Überdruckbelüftung eine schnellere und effektivere Spülwirkung des Treppenraumes aufgezeigt werden, als dies auf natürlichem Wege möglich wäre.

Schlussendlich liegt die Verantwortung für den zeitlichen Ansatz von einsatztaktischen Interventionsmaßnahmen bei den Feuerwehren im Land. Die Ergebnisse dieser Arbeit stützen sich auf einen zeitlichen Ansatz, der auf Annahmen und Absprachen mit der Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg beruht. Jede Feuerwehr – hauptberuflich oder ehrenamtlich – bewältigt ein solches Einsatzszenario jedoch unterschiedlich. Anhand der aufgezeigten Ergebnisse bezüglich der einsatztaktischen Maßnahmen muss jede Feuerwehr an den eigenen Konzepten den resultierenden Handlungsbedarf erkennen und ableiten.

Eine ergänzende Darstellung der zusammengefassten einsatztaktischen Erkenntnisse kann der *Anlage 4: Lehr- und Ausbildungsaussage für die LFS BW* entnommen werden.

10 Fazit, Diskussion und Ausblick

Die Kombination aus der grundlegenden Methodik der CFD unter Anwendung der Software FDS und der einsatztaktischen Herangehensweise der Einsatzkräfte erbrachte aussagekräftige Ergebnisse. Festgelegte Interventionsmaßnahmen der Feuerwehr konnten unter Berücksichtigung von Annahmen und Vereinfachungen als Modellierungsansatz in die Simulationen implementiert werden. Als Grundlage dienten vier Brand- und Rauchgassimulationen mit variierenden Eingangsparametern und ohne einsatztaktische Einflussnahme. Darauf aufbauend konnten zwei weitere Simulationen mit dem Einfluss von Interventionsmaßnahmen durch die Einsatzkräfte ausgewertet werden.

Das Betrachtungsszenario des ausgedehnten Kellerbrandes zu nachtschlafender Zeit in einem MFH ist für die Bewohner, aber auch für die Einsatzkräfte, ein nicht zu unterschätzendes Ereignis. Die zu Beginn dieser Arbeit erstellte Gefahrenmatrix (vgl. *Abbildung 2*) spiegelt diese Annahme wider. Es ist mit einer Vielzahl an betroffenen und zu rettenden Personen zu rechnen. Durch die modellierten Kanalquerschnittsflächen der dichtschießenden Wohnungsabschlüsse erfolgt sowohl ein thermischer Eintrag als auch eine toxische Exposition in die WE. Die Annahme, Personen hinter ebendiesen Abschlüssen in Sicherheit zu wissen, ist trügerisch und gefährlich. Die Bewohner hinter dieses nicht normativ und baurodungsrechtlich geregelten Abschlüssen können sich mitunter in unmittelbarer Lebensgefahr befinden. Ein schnelles Handeln der Einsatzkräfte für die Rettung dieser Bewohner ist dringend nötig. Die Annahme eines teilsicheren Bereiches – vergleichbar einer Rauchabschnittstrennung – der Bewohner in ihren WE ist ebenfalls zu demontieren. Die Wahl des konservativen und ungehinderten Brandereignisses auf den Treppenraum schlägt zwangsläufig auf die WE hinter den dichtschießenden Abschlüssen durch.

Vor dem Eintreffen der Feuerwehr ist der notwendige Treppenraum durch die Bewohner bereits nicht mehr passierbar. Hier muss schnellstmöglich Abhilfe in Form der Fremdrettung über Geräte der Feuerwehr – tragbare Leitern und Hubrettungsfahrzeuge – geschaffen werden. Durch die modellierten Ansätze der Einsatztaktik im Innenangriff konnte nachgewiesen werden, dass sich die Umgebungsbedingungen im Treppenraum schnell und effektiv verbessern lassen. Das Niveau der Nachweiskriterien sinkt durch das Schaffen von Abluftöffnungsflächen in Kombination mit den eingeleiteten Brandbekämpfungsmaßnahmen deutlich ab. Durch den Start der Überdruckbelüftung konnten alle Nachweiskriterien im Treppenraum letztendlich unterschritten werden. Durch diese Ertüchtigung des Rettungsweges für die Fremdrettungsphase verlagert sich die Menschenrettung und die Kontrolle der WE wieder in Richtung des notwendigen Treppenraumes.

Obwohl alle für die Simulation getroffenen Annahmen, Rahmenbedingungen und Erleichterung im Zuge eines fortlaufenden Kompromissfindungsprozesses gewählt wurden, bleibt ein Diskussionsrahmen bestehen. Bereits die fundierte Datenerhebung von Eingangsparametern bezüglich eines ausgedehnten Kellerbrandszenarios war eine Herausforderung. Hinzu kam das stark unterventilierte Brandverhalten des Bemessungsbrandes im MFH. Dies musste teilweise unter Berücksichtigung von weiteren realitätsnahen Ergänzungen, wie natürlichen und gekippten Ventilationsöffnungsflächen kompensiert werden. Zu diskutieren ist auch die Wahl des Bemessungsbrandes auf ein solch ausgedehntes und konservatives Ereignis. Hier wäre eine zusätzliche oder alternative Implementierung eines kleineren Brandereignisses – Kinderwagenbrand oder Sperrmüllbrand – im notwendigen Treppenraum mit Sicherheit eine Option gewesen. Einsatztaktische Maßnahmen wie die maschinelle Überdruckbelüftung, das Setzen eines mobilen Rauchverschlusses und das Erlöschen des Brandes mussten durch Modellierungsansätze ausgearbeitet und teilweise idealisiert und vereinfacht in die Simulationen implementiert werden. Exemplarisch kann hier das Erlöschen des Brandes benannt werden. Das Brandgeschehen im Keller wird in zeitlicher Korrelation zu dem Start von Brandbekämpfungsmaßnahmen deaktiviert. Die resultierenden Erzeugnisse wie Wasserdampf oder die Volumenvergrößerung werden nicht berücksichtigt. Die Einflussnahme von Umgebungsbedingungen, wie erhöhte Strömungs- und Windgeschwindigkeiten, veränderte Druck- und Feuchtigkeitsverhältnisse oder Wetterextreme konnte hier nicht betrachtet werden. Auf die Initialisierung des Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen und Baustoffen wurde verzichtet. Folglich wurde auch der Strahlungs- und Konvektionsaustausch mit den umgebenden Bauteilen und die Permeation von Kohlenstoffmonoxid durch Wände vernachlässigt. Die Ergebnisdarstellung, inklusive aller eventuellen Eingrenzungen und Ausnahmen, erfolgte mit maximaler Transparenz.

Eine weiterführende Validierung von sämtlichen Eingangsparametern und Modellierungsansätzen sowie weitere ergänzende Untersuchungen sind erforderlich. Durch kleinere Realbrandversuche in Kombination mit weiteren simulationsseitigen Variationen kann die Datenlage konkretisiert werden. Zeitliche Korrelationen von einsatztaktischen Maßnahmen und Bemessungsbrandszenarien könnten noch aussagekräftiger dargestellt werden. Im Rahmen eines eigenständigen Forschungsprojektes könnte dieser Verknüpfungsansatz zwischen Simulation und Realbrandgeschehen im Sinne der einsatztaktischen Optimierung und schlussendlich zu Gunsten der Personensicherheit weitergeführt werden.

Literaturverzeichnis

AGBF (Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren) (2015): Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten. Fortschreibung der Empfehlungen vom 16. September 1998.

Böswirth, Leopold/Bschorer, Sabine (2012): Technische Strömungslehre. 9. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Buchenau, Sven (2020): Nächtlicher Evakuierung: Kellerbrand in Bremen: 54 Bewohner aus Hochhaus gerettet. Online im Internet unter <https://www.feuerwehrmagazin.de/nachrichten/news/kellerbrand-in-bremen-54-bewohner-aus-hochhaus-gerettet-102124>. (09.02.2021).

DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) (1988): DIN 18 095 Teil 1 Rauchschutztüren – Begriffe und Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) (2005): DIN EN 12101-6 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 6: Festlegungen für Differenzdrucksysteme, Bausätze; Deutsche Fassung EN 12101-6:2005. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) (2015): DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkung – Brandeinwirkung auf Tragwerke. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN (Deutsches Institut für Normung e. V.) (2016): DIN 18009-1 Brandschutzingenieurwesen - Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

FwDV 100 (Feuerwehrdienstvorschrift 100) (1999): Führung und Leitung im Einsatz.

Glaser, Christian (2019): Risiko im Management. 100 Fehler, Irrtümer, Verzerrungen und wie man sie vermeidet. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Hosser, Dietmar (Hrsg.) (2013): Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb). Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 3. Auflage. Braunschweig: November 2013.

Hurley, Morgan J. (Hrsg.) (2016): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5. Auflage. New York: Springer-Verlag.

Kaiser, Guido (2010): „O.R.B.I.T. 2010“ Aktuelle Erkenntnisse zu medizinischen und rettungstechnischen Grundlagen der Planung im Feuerwehrewesen. Online im Internet unter <https://docplayer.org/51658574-O-r-b-i-t-aktuelle-erkenntnisse-zu-medizinischen-und-rettungstechnischen-grundlagen-der-planung-im-feuerwehrewesen.html>. (27.02.2021).

Kampmeier, Björn (2019a): Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien. Ingenieurmethoden im Brandschutz. Vorlesungsunterlagen der Hochschule Magdeburg-Stendal.

Kampmeier, Björn (2019b): Personensicherheit. Ingenieurmethoden im Brandschutz. Vorlesungsunterlagen der Hochschule Magdeburg-Stendal.

Lange-Hegermann, Jörg (2020): Nacht zu Neujahr 2020: Kellerbrand in Oberhausen, Menschenrettung bei massiver Rauchentwicklung. In: BRANDSchutz. 74. Jg., H. 6, S. 501-505.

LBO (Landesbauordnung für Baden-Württemberg) (2010).

LBOAVO (Allgemeine Ausführungsverordnung des Wirtschaftsministeriums zur Landesbauordnung) (2010).

LEADER GmbH (2020): Akku-Hochleistungslüfter BATFAN 2 – 20 min. Online im Internet unter <https://www.leader-group.company/de/feuerwehrausrustung/hochleistungslufter/hochleistungslufter-mit-elektromotor/akku-hochleistungslufter-batfan-2-20-min>. (09.02.2021).

Lecheler, Stefan (2011): Numerische Strömungsberechnung - Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele. 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

LFS BW (Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg) (2012): Einführung Einsatzleitung/Verbandführer.

LFS BW (Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg) (2016a): Einsatztaktik.

LFS BW (Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg) (2016b): Einsatztaktik für die Feuerwehr – Hinweise zur Ventilation bei Brandeinsätzen.

LFS BW (Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg) (o.J.): Internes Dokument.

LFV (Landesfeuerwehrverband)/IM (Innenministerium) (Hrsg.) (2008): Hinweise zur Leistungsfähigkeit der Feuerwehr.

MBO (Musterbauordnung) (2002).

McGrattan, Kevin/Hostikka, Simon/Floyd, Jason/McDermott, Randall/Vanella, Marcos (2020a): Fire Dynamics Simulator User's Guide. National Institute of Standards and Technology (NIST). 6. Auflage. Gaithersburg: März 2020.

McGratten, Kevin/Hostikka, Simon/Floyd, Jason/McDermott, Randall/Vanella, Marcos (2020b): Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification. National Institute of Standards and Technology (NIST). 6. Auflage. Gaithersburg: August 2020.

MHHR (Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern) (2008).

Osburg, Manuel (2020): Ingenieurmethoden im Brandschutz. Einführung in die Brandsimulation. Vorlesungsunterlagen der Hochschule Magdeburg-Stendal.

Stahr, Michael/Schulz, Virginie (2015): Bausanierung. Erkennen und Beheben von Bauschäden. 6. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Timmann, Christian/Unger, Jan Ole (2020): Kellerbrand in Hochhaus. In: FEUERWEHR - RETTEN, LÖSCHEN, BERGEN. 73. Jg., H. 3, S. 10.

VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) (2017): Sicherheit in Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen. Prinzipien zur Rauchableitung. Mühlheim am Main: VDMA Verlag GmbH.

VdS 2827 (2000): Bemessungsbrände für Brandsimulationen und Brandschutzkonzepte. Köln: VdS Schadenverhütung GmbH.

Wallasch, Karl/Stock, Boris (2008): Brandsimulation mit FDS. Das Fire Dynamics Simulator Handbuch. 1. Auflage. Norderstedt: Books on Demand GmbH.

Wierse, Andreas (2020): Computational Scientist wissen, wie es brennt. Online im Internet unter <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bauingenieur/forschung-und-entwicklung/wissen-wie-es-brennt/>. (09.02.2021)

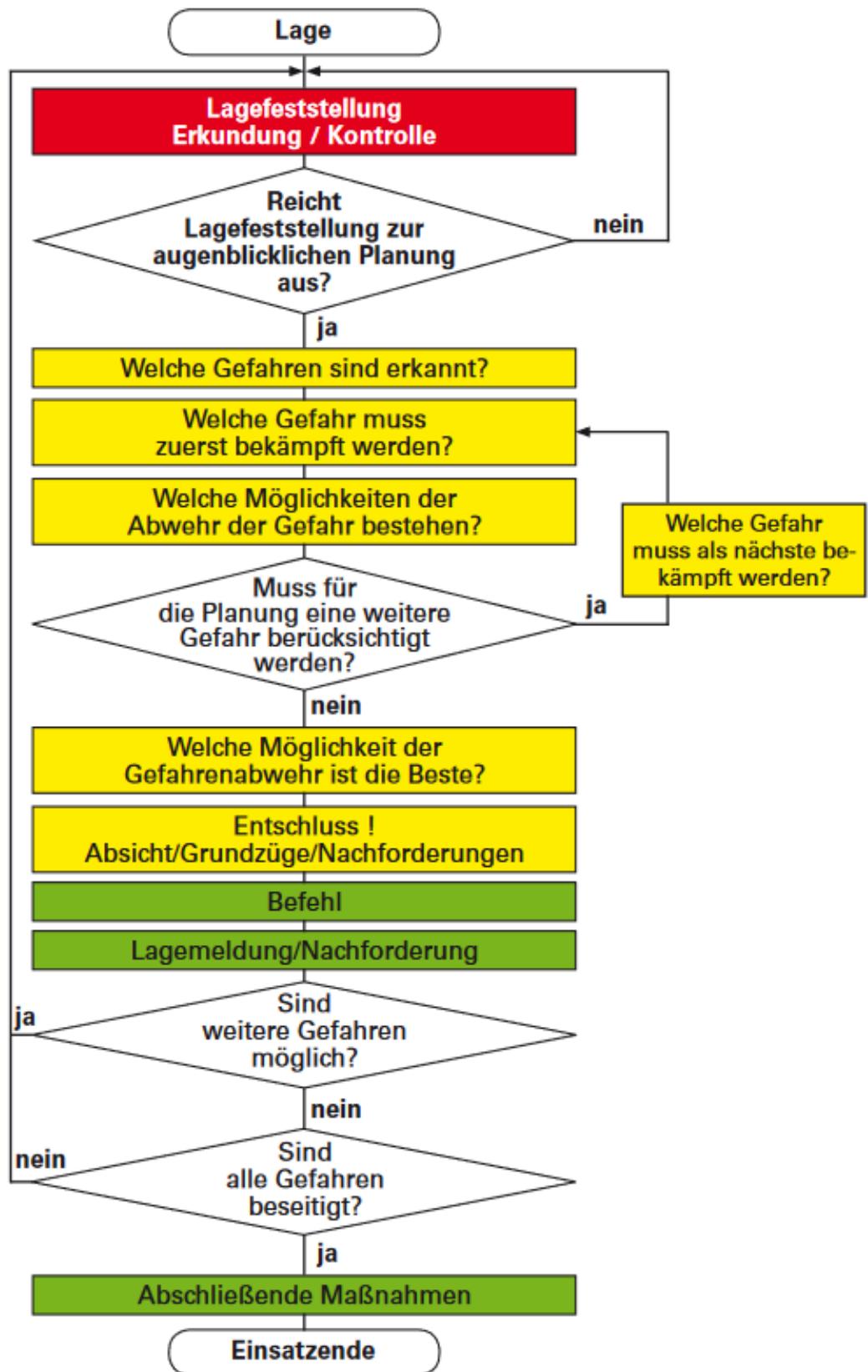
Wilk, Erhardt/Osburg, Manuel (2017): Der Brand in Räumen Teil 10-1-1- Rauchgasentwicklung und -ausbreitung im Brandraum. In: vfdb-Zeitschrift. H. 4.

Zehfuß, Jochen (Hrsg.) (2020): Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb). Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 4. Auflage. Braunschweig: März 2020.

Anhang

Anlage 1: Ablaufplan des Führungsvorgangs der LFS BW.....	A-1
Anlage 2: Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände nach DIN EN 1991-1-2/NA – Anhang AA und BB.....	A-2
Anlage 3: Input File FDS – Masterarbeit von Moritz Mayer, 20193085.....	A-7
Anlage 4: Lehr- und Ausbildungsaussage für die LFS BW.....	A-21
Anlage 5: Tabellarische Darstellung der Simulationsauswertungen.....	A-23

Anlage 1: Ablaufplan des Führungsvorgangs der LFS BW ¹⁰⁵



¹⁰⁵ LFS BW 2016a: 7

Anlage 2: Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände nach DIN EN 1991-1-2/NA – Anhang AA und BB ¹⁰⁶

Anwendungsgrenzen

- Räume bis 400 m²
 - Räume bis 5 m Höhe
 - Vertikal, Ventilationsöffnung von 12,5-50 % der Wandfläche
 - Brandlastdichte von 100-1300 $\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$
- Für größere oder höhere Räume liegen die Ergebnisse zunehmend auf der sicheren Seite

Eingangsparameter in Abhängigkeit der Nutzung

- Brandlastdichte $q = 932,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$ (Tab. BB.)
- Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate
 $\dot{q}_f = RHR_f = 0,28 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} = 280 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ (Tab. BB.2)
- Brandentwicklungsdauer t_d (Zeit bis $Q_0 = 1 \text{ MW}$) = 300 s – mittel (Tab. BB.2)
- Verbrennungseffektivität $\chi = 0,8$ (S. 18)

Wahrscheinlichkeiten

- Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes (nutzungsabhängig)
→ Wohngebäude $p_1 = 3,0 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{a}}$ (BB.3 – S.26)
- Ausfallwahrscheinlichkeit
→ manuelle Brandbekämpfung
→ Nutzer $p_{2.1} = 0,5$ (S.26)
→ FW $p_{2.2} = 0,5$ (BB.4 – S.27)
→ automatische Brandbekämpfungs-Löschanlage
→ hier $p_3 = 1$ (BB.4)
- Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadfeuers
 $p_{fi} = p_1 \cdot (p_{2.1} \cdot p_{2.2}) \cdot p_3 = 3,0 \cdot 10^{-3} \cdot (0,5 \cdot 0,5) \cdot 1 = 0,00075 = 7,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{a}}$
- Akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit
→ mittlere Schadensfolgen bei Wohnhaus nach MBO
→ $p_f = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{a}}$ (BB.5 – S.28)

¹⁰⁶ DIN 2015: 10-29

- Zulässig bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall

$$\rightarrow p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1,3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{a}}{7,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{a}} = 0,017\bar{3}$$

- Aus Tab. S. 29 mit $p_{f,fi} = 1,2 \cdot 10^{-2} = 0,012 \approx 0,0173$ (S.29 – NA)

$$\rightarrow p_{fi} = 2,25 \quad \text{Zuverlässigkeitsindex}$$

- Teilsicherheitsbeiwerte:

$$p_{fi} = 2,25 \quad \text{(Tab. S.29)}$$

$$\gamma_{fi,q} = 1 \quad \text{Brandlastdichte}$$

$$\gamma_{fi,RHR} = 1 \quad \text{HRR}$$

Bemessungswert der Brandlastdichte

$$q_{f,d} = \chi \cdot q_{f,k} \cdot \gamma_{fi,q} = 0,8 \cdot 932,5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \cdot 1 = 746 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \quad \text{(BB.1)}$$

Öffnungsfaktor und Gesamtbrandlast

- Grundfläche: $A_f = 17,64 \text{ m}^2$ (Brandfläche)

- Fensterfläche: $A_w = 0,7 \text{ m}^2 + 2 \text{ m}^2 = 2,7 \text{ m}^2$ (Tür + Fenster)

- Gemittelte Höhe der Öffnungsflächen: $h_w = 1,55 \text{ m}$

- Gesamtbrandlast im Raum $Q_d = q_{f,d} \cdot A_f = 746 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \cdot 17,64 \text{ m}^2 = 13159,44 \text{ MJ}$

- Gesamtfläche der umfassenden Bauteile, einschließlich Öffnungsfläche:

$$A_t = (83,52 \text{ m}^2 \cdot 2) + ((8,7 \text{ m} \cdot 2,55 \text{ m}) \cdot 2) + ((9,6 \text{ m} \cdot 2,55 \text{ m}) \cdot 2) = 260,37 \text{ m}^2$$

- Öffnungsfaktor $O = \frac{A_w \cdot \sqrt{h_w}}{A_t} = \frac{2,7 \text{ m}^2 \cdot \sqrt{1,55 \text{ m}}}{260,37 \text{ m}^2} = 0,0129 \text{ m}^{0,5}$

Brandlast- oder ventilationsgesteuert

- Max. Wärmefreisetzungsrate brandlastgesteuert

$$\dot{Q}_{max,f,k} = RHR_f \cdot A_f = 0,28 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \cdot 17,64 \text{ m}^2 = 4,939 \text{ MW} \quad (\text{BB.5})$$

- Max. Wärmefreisetzungsrate ventilationsgesteuert

$$\dot{Q}_{max,v,k} = (1,21 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}) = 1,21 \cdot 2,7 \text{ m}^2 \cdot \sqrt{1,55 \text{ m}} = 4,07 \text{ MW}$$

→ vereinfacht (AA.1)

$$= 0,1 \cdot \chi \cdot H_u \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} = 0,1 \cdot 0,8 \cdot 17,3 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 2,7 \text{ m}^2 \cdot \sqrt{1,55 \text{ m}} = 4,65 \text{ MW}$$

→ besser (BB.6)

- $\dot{Q}_{max,k} = \min\{\dot{Q}_{max,f,k}; \dot{Q}_{max,v,k}\} \Rightarrow$ **ventilationsgesteuert**

$$\dot{Q}_{max,v,k} = 4,65 \text{ MW} \quad (\text{BB.6})$$

$$\dot{Q}_{max,h} = 4,65 \text{ MW}$$

- Bemessungswert der max. Wärmefreisetzungsrate:

$$\dot{Q}_{max,d} = \dot{Q}_{max,h} \cdot \gamma_{fi,RHR} = 4,65 \text{ MW} \cdot 1 = 4,65 \text{ MW}$$

Bestimmung von t_1 und *Flashover*-Kriterium

- Berechnung von t_1

$$t_1 = t_d \cdot \sqrt{\dot{Q}_{max,d}} = 300 \text{ s} \cdot \sqrt{4,65 \text{ MW}} = 646,92 \text{ s} \quad (\text{AA.7})$$

- Berechnung von \dot{Q}_{fo}

$$\dot{Q}_{fo} = 0,0078 \cdot A_t + 0,378 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad (\text{BB.8a})$$

$$= 0,0078 \cdot 260,37 \text{ m}^2 + 0,378 \cdot 2,7 \text{ m}^2 \cdot \sqrt{1,55 \text{ m}} = 3,3 \text{ MW}$$

- Berechnung von $t_{1,fo}$

$$t_{1,fo} = t_d \cdot \sqrt{\dot{Q}_{fo}} = 300 \text{ s} \cdot \sqrt{3,3 \text{ MW}} = 544,98 \text{ s}$$

- Prüfung, ob *Flashover* vorhanden

$$\dot{Q}_{fo} < \dot{Q}_{max,d} \Rightarrow \text{vorhanden}$$

$$\dot{Q}_{fo} > \dot{Q}_{max,d} \Rightarrow \text{nicht vorhanden}$$

und

$$t_{1,fo} < t_1 \quad \text{weiter mit } t_{1,fo}$$

Flashover (FO) vorhanden!

Berechnung von t_2 und $t_3 + Q_1-Q_3$

- Berechnung von Q_1

$$Q_1 = \frac{1}{3} \cdot \frac{t_{1,fo}}{t_d} = \frac{1}{3} \cdot \frac{544,98 \text{ s}^3}{300 \text{ s}^2} = 599,48 \text{ MJ} \quad (\text{S.17})$$

- Berechnung von Q_2

$$Q_2 = 0,7 \cdot Q_d - Q_1 = 0,7 \cdot 20544,84 \text{ MJ} - 599,48 \text{ MJ} = 13781,91 \text{ MJ}$$

- Berechnung von t_2

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{\dot{Q}_{max,d}} = 544,98 \text{ s} + \frac{13781,91 \text{ MJ}}{4,65 \text{ MW}} = 3508,83 \text{ s}$$

- Berechnung von Q_3

$$Q_3 = 0,3 \cdot Q_d = 0,3 \cdot 20544,84 \text{ MJ} = 6163,45 \text{ MJ}$$

- Berechnung von t_3

$$t_3 = t_2 + \frac{2 \cdot Q_3}{\dot{Q}_{max,d}} = 3508,83 \text{ s} + \frac{2 \cdot 6163,45 \text{ MJ}}{4,65 \text{ MW}} = 6159,78 \text{ s}$$

Referenzbrandlastdichte

- Vorne identisch (t_1)
- Neue Zeitpunkte (t_2 und t_3)
- Brand wird länger
- Davon ausgehend kann der abfallende Ast der Realbrandkurve für die tatsächliche Brandlastdichte betrachtet werden

- $q_{ref} = 1300 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$

- Gesamtbrandlastdichte im Raum

$$Q_{d,1300} = q_{ref} \cdot A_f = 1300 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \cdot 17,64 \text{ m}^2 = 22932 \text{ MJ}$$

- Berechnung von $Q_{2,1300}$

$$Q_{2,1300} = (0,7 \cdot Q_{d,1300}) - Q_1 = (0,7 \cdot 22932 \text{ MJ}) - 599,48 \text{ MJ} = 15452,92 \text{ MJ}$$

- Berechnung von $t_{2,1300}$

$$t_{2,1300} = t_1 + \frac{Q_{2,1300}}{\dot{Q}_{max,d}} = 544,98 \text{ s} + \frac{15452,92 \text{ MJ}}{4,65 \text{ MW}} = 3868,19 \text{ s}$$

- Berechnung von $Q_{3,1300}$

$$Q_{3,1300} = 0,3 \cdot Q_{d,1300} = 0,3 \cdot 22932 \text{ MJ} = 6879,6 \text{ MJ}$$

- Berechnung von $t_{3,1300}$

$$t_{3,1300} = t_{2,1300} + \frac{2 \cdot Q_{3,1300}}{\dot{Q}_{max,d}} = 3868,19 \text{ s} + \frac{2 \cdot 6879,6 \text{ MJ}}{4,65 \text{ MW}} = 6827,16 \text{ s}$$

Berechnung von Θ_1 - Θ_3 in Abhängigkeit brandlast- oder Ventilationsgesteuerter Brand Ventilation

- Wärmespeichungsvermögen der Umfassungsbauteile b (Tab. AA.1)
→ Beton: $b = 1500 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} \cdot \sqrt{5} \text{ K}$
 - Berechnung von $\Theta_{1,v}$
$$\Theta_{1,v} = -8,75 \cdot \frac{1}{0} - 0,1 \cdot b + 1175$$
$$= -8,75 \cdot \frac{1}{0,0129 \text{ m}^{0,5}} - 0,1 \cdot 1500 + 1175 = 346,71 \text{ °C}$$
 - Berechnung von $\Theta_{2,v}$
$$\Theta_{2,v} = (0,004 \cdot b - 17) \cdot \frac{1}{0} - 0,4 \cdot b + 2175$$
$$= (0,004 \cdot 1500 - 17) \cdot \frac{1}{0,0129 \text{ m}^{0,5}} - 0,4 \cdot 1500 + 2175 = 722,29 \text{ °C}$$
 - Berechnung von $\Theta_{3,v}$
$$\Theta_{3,v} = -5,0 \cdot \frac{1}{0} - 0,16 \cdot b + 1060$$
$$= -5,0 \cdot \frac{1}{0,0129 \text{ m}^{0,5}} - 0,16 \cdot 1500 + 1060 = 432,4 \text{ °C}$$
-

Berücksichtigung der Bemessungsbrandlastdichte

Da die tatsächliche Brandlast keinen Einfluss auf den aufsteigenden Ast hat, müssen $t_{2,x}$, $\Theta_{2,x}$ und $\Theta_{3,x}$ erneut berechnet werden.

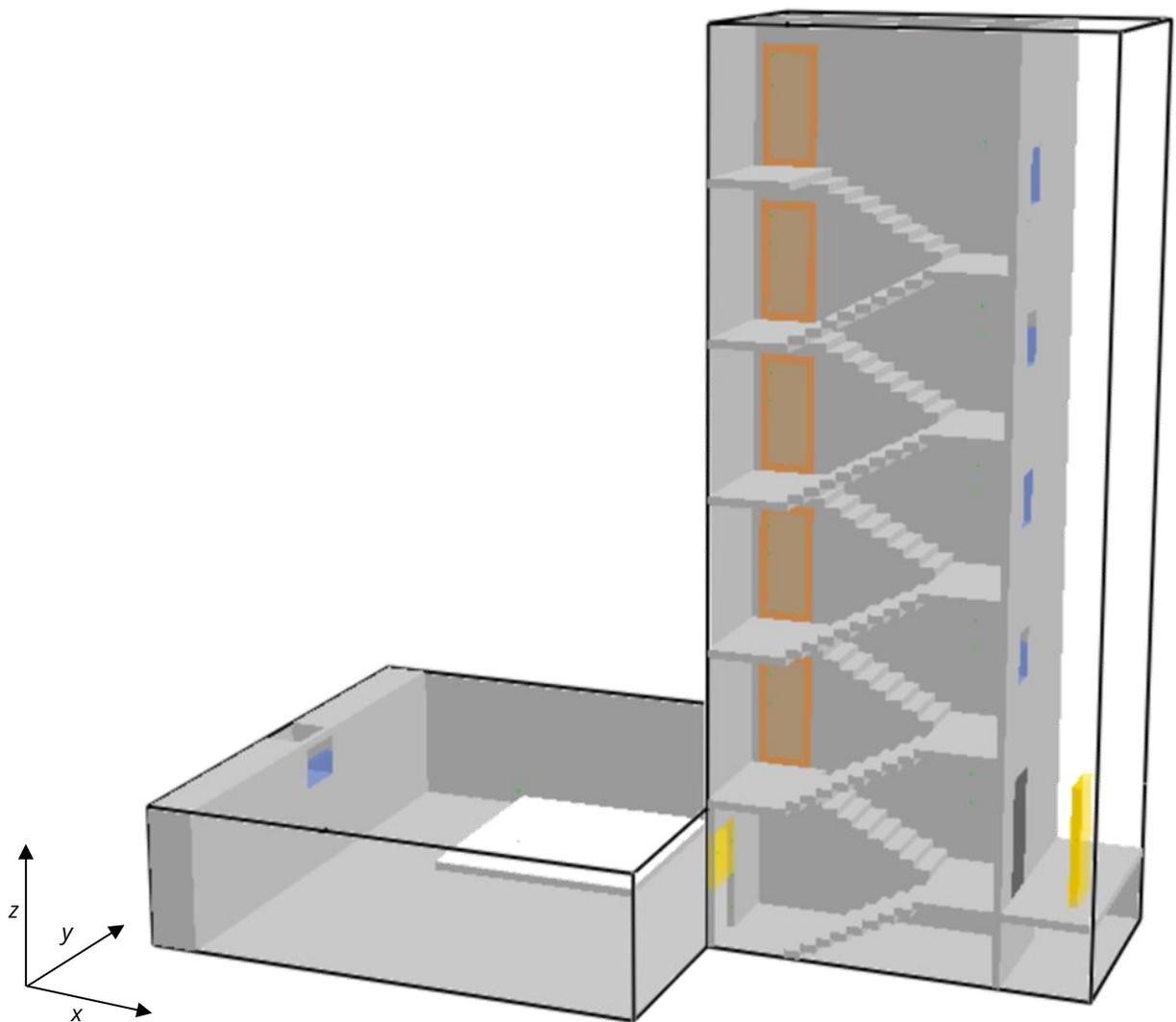
Berechnung der absteigenden Temperaturkurve mit $q_{f,d} = 746 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$

Prüfen: $Q_1 = 599,48 \text{ MJ}$ vs. $14381,39 \text{ MJ}$ ($0,7 \cdot 20544,84 \text{ MJ}$)

Somit:

- $$\Theta_{2,real} = (\Theta_2 - \Theta_1) \cdot \sqrt{\frac{t_2 - t_1}{t_{2,real} - t_1}} + \Theta_1$$
$$= (722,29 \text{ °C} - 346,71 \text{ °C}) \cdot \sqrt{\frac{3508,83 \text{ s} - 544,98 \text{ s}}{5805,61 \text{ s} - 544,98 \text{ s}}} + 346,71 \text{ °C} = 628,62 \text{ °C}$$
- $$\Theta_{3,real} = \Theta_3 \cdot \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,real}}{60} + 1\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_{3,ref}}{60} + 1\right)}$$
$$= 432,4 \text{ °C} \cdot \frac{\log_{10}\left(\frac{6150,78 \text{ s}}{60} + 1\right)}{\log_{10}\left(\frac{10425,2 \text{ s}}{60} + 1\right)} = 388,67 \text{ °C}$$

Input File der FDS-Brandsimulation



```

1 &HEAD CHID = 'S_1_LEAK_1_REAC_1', TITLE = 'Masterarbeit von Moritz Mayer, 20193085' /
2 &MISC RESTART = .FALSE. /
3
4
5 ----- period and solution -----
6
7 &TIME T_END = 1800 /
8 &DUMP NFRAMES = 1800 /
9
10
11 ----- Mesh - definition -----
12
13 stairwell, apartments and front door
14 &MESH XB = -0.3,6.9 , 0.0,4.2 , 0.0,16.05 , IJK = 48 , 28 , 107 /
15
16 area on fire - basement
17 &MESH XB = -0.3,-9.9 , -3.6,6.0 , 0.0,2.55 , IJK = 64 , 64 , 17 /
18
19
20 ----- concrete-optics -----
21
22 &MISC SURF_DEFAULT = 'concrete_optics' /
23 &SURF ID = 'concrete_optics', COLOR = 'SILVER' /
24
25
26 ----- stairwell -----
27
28 landing UG - platform UG/EG
29 &MULT ID = 'landing1' , DX = 0.3 , DZ = 0.15 , DX0 = 1.2 , DZ0 = 0.0 , N_LOWER = 0 , N_UPPER = 7 /
30 &OBST XB = 0.0,0.3 , 0.0,1.2 , 0.0,0.15 , MULTI_ID = 'landing1' /
31
32 platform UG/EG
33 &OBST XB = 3.6,5.1 , 0.0,2.4 , 1.2,1.35 /
34
35 landing platform UG/EG - EG
36 &MULT ID = 'landing2' , DX = -0.3 , DZ = 0.15 , DX0 = 3.3 , DZ0 = 1.35 , N_LOWER = 0 , N_UPPER = 7 /
37 &OBST XB = 0.0,0.3 , 1.2,2.4 , 0.0,0.15 , MULTI_ID = 'landing2' /
38
39 platform EG
40 &OBST XB = -0.3,1.2 , 0.0,2.4 , 2.55,2.7 /
41
42 landing EG - platform EG/1.OG
43 &MULT ID = 'landing3' , DX = 0.3 , DZ = 0.15 , DX0 = 1.2 , DZ0 = 2.7 , N_LOWER = 0 , N_UPPER = 7 /
44 &OBST XB = 0.0,0.3 , 0.0,1.2 , 0.0,0.15 , MULTI_ID = 'landing3' /
45
46 platform EG/1.OG
47 &OBST XB = 3.6,5.1 , 0.0,2.4 , 3.9,4.05 /
48
49 landing platform EG/1.OG - 1.OG
50 &MULT ID = 'landing4' , DX = -0.3 , DZ = 0.15 , DX0 = 3.3 , DZ0 = 4.05 , N_LOWER = 0 , N_UPPER = 7 /
51 &OBST XB = 0.0,0.3 , 1.2,2.4 , 0.0,0.15 , MULTI_ID = 'landing4' /
52
53 platform 1.OG
54 &OBST XB = -0.3,1.2 , 0.0,2.4 , 5.25,5.4 /
55

```

```

56 landing 1.OG - platform 1.OG/2.OG
57 &MULT ID = 'landings', DX = 0.3, DZ = 0.15, DX0 = 1.2, DZ0 = 5.4, N_LOWER = 0, N_UPPER = 7 /
58 &OBST XB = 0.0,0.3, 0.0,1.2, 0.0,0.15, MULT_ID = 'landings' /
59
60 platform 1.OG/2.OG
61 &OBST XB = 3.6,5.1, 0.0,2.4, 6.6,6.75 /
62
63 landing platform 1.OG/2.OG - 2.OG
64 &MULT ID = 'landings6', DX = -0.3, DZ = 0.15, DX0 = 3.3, DZ0 = 6.75, N_LOWER = 0, N_UPPER = 7 /
65 &OBST XB = 0.0,0.3, 1.2,2.4, 0.0,0.15, MULT_ID = 'landings6' /
66
67 platform 2.OG
68 &OBST XB = -0.3,1.2, 0.0,2.4, 7.95,8.1 /
69
70 landing 2.OG - platform 2.OG/3.OG
71 &MULT ID = 'landings7', DX = 0.3, DZ = 0.15, DX0 = 1.2, DZ0 = 8.1, N_LOWER = 0, N_UPPER = 7 /
72 &OBST XB = 0.0,0.3, 0.0,1.2, 0.0,0.15, MULT_ID = 'landings7' /
73
74 platform 2.OG/3.OG
75 &OBST XB = 3.6,5.1, 0.0,2.4, 9.3,9.45 /
76
77 landing platform 2.OG/3.OG - 3.OG
78 &MULT ID = 'landings8', DX = -0.3, DZ = 0.15, DX0 = 3.3, DZ0 = 9.45, N_LOWER = 0, N_UPPER = 7 /
79 &OBST XB = 0.0,0.3, 1.2,2.4, 0.0,0.15, MULT_ID = 'landings8' /
80
81 platform 3.OG
82 &OBST XB = -0.3,1.2, 0.0,2.4, 10.65,10.8 /
83
84 landing 3.OG - platform 3.OG/4.OG
85 &MULT ID = 'landings9', DX = 0.3, DZ = 0.15, DX0 = 1.2, DZ0 = 10.8, N_LOWER = 0, N_UPPER = 7 /
86 &OBST XB = 0.0,0.3, 0.0,1.2, 0.0,0.15, MULT_ID = 'landings9' /
87
88 platform 3.OG/4.OG
89 &OBST XB = 3.6,5.1, 0.0,2.4, 12.0,12.15 /
90
91 landing platform 3.OG/4.OG - 4.OG
92 &MULT ID = 'landings10', DX = -0.3, DZ = 0.15, DX0 = 3.3, DZ0 = 12.15, N_LOWER = 0, N_UPPER = 7 /
93 &OBST XB = 0.0,0.3, 1.2,2.4, 0.0,0.15, MULT_ID = 'landings10' /
94
95 platform 4.OG
96 &OBST XB = -0.3,1.2, 0.0,2.4, 13.35,13.5 /
97

```

```

98 wall stairwell
99 $OBST XB = -0.3,5.1 , 2.4,2.55 , 0.0,16.05 /
100 $OBST XB = 5.1,5.25 , 0.0,4.2 , 0.0,16.05 /
101 $HOLE XB = 5.05,5.30 , 2.55,4.2 , 0.0,1.2 /
102
103 ----- area in front of the house -----
104
105 opening areas in front of the house - Mesh
106 $VENT XB = 5.25,6.9 , 0.0,0.0 , 1.35,16.05 , SURF_ID = 'OPEN' /
107 $VENT XB = 5.25,6.9 , 4.2,4.2 , 1.35,16.05 , SURF_ID = 'OPEN' /
108 $VENT XB = 6.9,6.9 , 0.0,4.2 , 0.00,16.05 , SURF_ID = 'OPEN' /
109 $VENT XB = 5.25,6.9 , 0.0,4.2 , 16.05,16.05 , SURF_ID = 'OPEN' /
110
111 house entrance door
112 $OBST XB = 5.25,6.9 , 0.0,4.2 , 1.2,1.35 /
113 $HOLE XB = 5.05,5.30 , 0.75, 1.7 , 1.35, 3.45 /
114
115 windows stairwell
116 $HOLE XB = 5.05,5.30 , 0.9,1.5 , 5.1,6.0 /
117 $HOLE XB = 5.05,5.30 , 0.9,1.5 , 7.8,8.7 /
118 $HOLE XB = 5.05,5.30 , 0.9,1.5 , 10.5,11.4 /
119 $HOLE XB = 5.05,5.30 , 0.9,1.5 , 13.2,14.1 /
120
121 ----- apartment area -----
122
123
124 $OBST XB = -0.3,5.1 , 2.55,4.2 , 2.55,2.7 /
125 $OBST XB = -0.3,5.1 , 2.55,4.2 , 5.25,5.4 /
126 $OBST XB = -0.3,5.1 , 2.55,4.2 , 7.95,8.1 /
127 $OBST XB = -0.3,5.1 , 2.55,4.2 , 10.65,10.8 /
128 $OBST XB = -0.3,5.1 , 2.55,4.2 , 13.35,13.5 /
129
130 $HOLE XB = 0.05,0.8 , 2.35,2.6 , 2.85,4.65 /
131 $HOLE XB = 0.05,0.8 , 2.35,2.6 , 5.55,7.35 /
132 $HOLE XB = 0.05,0.8 , 2.35,2.6 , 8.25,10.05 /
133 $HOLE XB = 0.05,0.8 , 2.35,2.6 , 10.95,12.75 /
134 $HOLE XB = 0.05,0.8 , 2.35,2.6 , 13.65,15.45 /
135
136
137 ----- area on fire - basement door -----
138
139 $OBST XB = -0.3,-0.15 , 0.0,2.4 , 0.0,2.55 /
140 $OBST XB = -0.3,-0.15 , 2.55,4.2 , 0.0,2.55 /
141 $HOLE XB = -0.31,-0.14 , 0.0,1.05 , 0.0,2.10 /
142
143 ----- light well -----
144
145
146 $OBST XB = -9.0,-9.15 , -3.6,6.0 , 0.0,2.55 /
147 $HOLE XB = -9.01,-9.14 , 0.7,1.75 , 1.7,2.45 /
148 $VENT XB = -9.15,-9.9 , -3.6,6.0 , 2.55,2.55 , SURF_ID = 'OPEN' /
149
150 $OBST XB = -9.15, -9.9 , -3.6,0.7 , 0.0,2.55 /
151 $OBST XB = -9.15, -9.9 , 1.75,6.0 , 0.0,2.55 /
152 $OBST XB = -9.15, -9.9 , 0.7,1.75 , 0.0,1.70 /

```



```

214 apartment doors
215 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 2.7,2.85 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_u' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
216 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 2.7,2.85 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_u' , COLOR = 'SALMON' /
217 HRVAC ID = 'LEAK_EG_1' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_eg_u' , AREA = 0.00475 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0095
218
219 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 4.65,4.80 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_o' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
220 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 4.65,4.80 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_o' , COLOR = 'SALMON' /
221 HRVAC ID = 'LEAK_EG_0' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_eg_o' , AREA = 0.00105 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0021
222
223 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.4,2.4 , 2.85,4.65 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
224 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.55,2.55 , 2.85,4.65 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_1' , COLOR = 'SALMON' /
225 HRVAC ID = 'LEAK_EG_1' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_eg_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0042
226
227 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.4,2.4 , 2.85,4.65 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_r' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
228 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.55,2.55 , 2.85,4.65 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_eg_r' , COLOR = 'SALMON' /
229 HRVAC ID = 'LEAK_EG_r' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_eg_r' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0042
230
231 608ST XB = 0.05,0.8 , 2.4,2.55 , 2.85,4.65 , SURF ID = 'door_sw_eg' , PERMIT_HOLE = .FALSE. ,
232 65URF ID = 'door_sw_eg' , MAIL_ID = 'Nadelholz' , COLOR = 'TAN' , BACKING = 'EXPOSED' , THICKNESS = 0.1 /
233 6MATL ID = 'Nadelholz' , FYI = 'SFFE Handbook' , DENSITY = 420 , SPECIFIC_HEAT = 2.72 , CONDUCTIVITY = 0.11 /
234
235
236 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 5.4,5.55 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_u' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
237 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 5.4,5.55 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_u' , COLOR = 'SALMON' /
238 HRVAC ID = 'LEAK_LOG_u' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_log_u' , AREA = 0.00475 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0095
239
240 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 7.35,7.50 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_o' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
241 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 7.35,7.50 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_o' , COLOR = 'SALMON' /
242 HRVAC ID = 'LEAK_LOG_o' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_log_o' , AREA = 0.00105 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0021
243
244 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.4,2.4 , 5.55,7.35 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
245 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.55,2.55 , 5.55,7.35 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_1' , COLOR = 'SALMON' /
246 HRVAC ID = 'LEAK_LOG_1' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_log_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0042
247
248 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.4,2.4 , 5.55,7.35 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_r' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
249 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.55,2.55 , 5.55,7.35 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_log_r' , COLOR = 'SALMON' /
250 HRVAC ID = 'LEAK_LOG_r' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_log_r' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0042
251
252 608ST XB = 0.05,0.8 , 2.4,2.55 , 5.55,7.35 , SURF ID = 'door_sw_log' , PERMIT_HOLE = .FALSE. ,
253 65URF ID = 'door_sw_log' , MAIL_ID = 'Nadelholz' , COLOR = 'TAN' , BACKING = 'EXPOSED' , THICKNESS = 0.1 /
254
255
256 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 8.1,8.25 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20g_u' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
257 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 8.1,8.25 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20g_u' , COLOR = 'SALMON' /
258 HRVAC ID = 'LEAK_20G_u' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_20g_u' , AREA = 0.00475 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0095
259
260 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 10.05,10.20 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20g_o' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
261 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 10.05,10.20 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20g_o' , COLOR = 'SALMON' /
262 HRVAC ID = 'LEAK_20G_o' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_20g_o' , AREA = 0.00105 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0021
263
264 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.4,2.4 , 8.25,10.05 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20g_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
265 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.55,2.55 , 8.25,10.05 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20g_1' , COLOR = 'SALMON' /
266 HRVAC ID = 'LEAK_20G_1' , TYPE_ID = 'LEAK' , VENT2_ID = 'vent_sw_20g_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1. / LEAK_1 LEAK_210.0042
267

```

```

268 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.4,2.4 , 8.25,10.05 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20G_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
269 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.55,2.55 , 8.25,10.05 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_20G_1' , COLOR = 'SALMON' /
270 AHVAC ID = 'LEAK_20G_1' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_20G_1' , VENT2 ID = 'vent_sw_20G_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0042
271
272 AOBST XB = 0.05,0.8 , 2.4,2.55 , 6.25,10.05 , SURF ID = 'door_ep_20G' , FERMIT HOLE = FALSE. , THICKNESS = 0.1 /
273 ASURF ID = 'door_ep_20G' , MATL ID = 'Nadelholz' , COLOR = 'TAN' , BACKING = 'EXPOSED'
274
275
276 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 10.8,10.95 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
277 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 10.8,10.95 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_1' , COLOR = 'SALMON' /
278 AHVAC ID = 'LEAK_30G_1' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_30G_1' , VENT2 ID = 'vent_sw_30G_1' , AREA = 0.00475 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0095
279
280 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 12.75,12.90 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_0' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
281 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 12.75,12.90 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_0' , COLOR = 'SALMON' /
282 AHVAC ID = 'LEAK_30G_0' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_30G_0' , VENT2 ID = 'vent_sw_30G_0' , AREA = 0.00105 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0021
283
284 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.4,2.4 , 10.95,12.75 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
285 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.55,2.55 , 10.95,12.75 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_1' , COLOR = 'SALMON' /
286 AHVAC ID = 'LEAK_30G_1' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_30G_1' , VENT2 ID = 'vent_sw_30G_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0042
287
288 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.4,2.4 , 10.95,12.75 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
289 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.55,2.55 , 10.95,12.75 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_30G_1' , COLOR = 'SALMON' /
290 AHVAC ID = 'LEAK_30G_1' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_30G_1' , VENT2 ID = 'vent_sw_30G_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0042
291
292 AOBST XB = 0.05,0.8 , 2.4,2.55 , 10.95,12.75 , SURF ID = 'door_ep_30G' , FERMIT HOLE = FALSE. , THICKNESS = 0.1 /
293 ASURF ID = 'door_ep_30G' , MATL ID = 'Nadelholz' , COLOR = 'TAN' , BACKING = 'EXPOSED'
294
295
296 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 13.5,13.65 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
297 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 13.5,13.65 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_1' , COLOR = 'SALMON' /
298 AHVAC ID = 'LEAK_40G_1' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_40G_1' , VENT2 ID = 'vent_sw_40G_1' , AREA = 0.00475 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0095
299
300 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.4,2.4 , 15.45,15.60 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_0' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
301 AVENT XB = -0.10,0.95 , 2.55,2.55 , 15.45,15.60 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_0' , COLOR = 'SALMON' /
302 AHVAC ID = 'LEAK_40G_0' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_40G_0' , VENT2 ID = 'vent_sw_40G_0' , AREA = 0.00105 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0021
303
304 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.4,2.4 , 13.65,15.45 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
305 AVENT XB = -0.10,0.05 , 2.55,2.55 , 13.65,15.45 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_1' , COLOR = 'SALMON' /
306 AHVAC ID = 'LEAK_40G_1' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_40G_1' , VENT2 ID = 'vent_sw_40G_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0042
307
308 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.4,2.4 , 13.65,15.45 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_1' , COLOR = 'SANDY BROWN' /
309 AVENT XB = 0.80,0.95 , 2.55,2.55 , 13.65,15.45 , SURF ID = 'HVAC' , ID = 'vent_sw_40G_1' , COLOR = 'SALMON' /
310 AHVAC ID = 'LEAK_40G_1' , TYPE ID = 'LEAK' , VENT ID = 'vent_sw_40G_1' , VENT2 ID = 'vent_sw_40G_1' , AREA = 0.0021 , LEAK_ENTHALPY = .TRUE. , LOSS = 1.,1., / LEAK_1 LEAK_2:0.0042
311
312 AOBST XB = 0.05,0.8 , 2.4,2.55 , 13.65,15.45 , SURF ID = 'door_ep_40G' , FERMIT HOLE = FALSE. , THICKNESS = 0.1 /
313 ASURF ID = 'door_ep_40G' , MATL ID = 'Nadelholz' , COLOR = 'TAN' , BACKING = 'EXPOSED'
314
315

```

```

316 ----- evaluation -----
317
318 general
319 &BNDF QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE' , CELL_CENTERED = .FALSE. /
320 &ISOP QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VALUE = 180 /
321
322 smoke detector
323 &DEVIC ID = 'SD_UG' , PROP_ID = 'Smoke Detector' , XYZ = 0.45 , 0.6 , 2.525 /
324 &DEVIC ID = 'SD_EG' , PROP_ID = 'Smoke Detector' , XYZ = 2.4 , 3.375 , 5.225 /
325 &DEVIC ID = 'SD_10G' , PROP_ID = 'Smoke Detector' , XYZ = 2.4 , 3.375 , 7.925 /
326 &DEVIC ID = 'SD_20G' , PROP_ID = 'Smoke Detector' , XYZ = 2.4 , 3.375 , 10.625 /
327 &DEVIC ID = 'SD_30G' , PROP_ID = 'Smoke Detector' , XYZ = 2.4 , 3.375 , 13.325 /
328 &DEVIC ID = 'SD_40G' , PROP_ID = 'Smoke Detector' , XYZ = 2.4 , 3.375 , 16.025 /
329 &PROP ID = 'Smoke Detector' , QUANTITY = 'CHAMBER_OBSCURATION' , LENGTH = 1.8 , ACTIVATION_OBSCURATION = 3.24 /
330
331 slice files
332 &SLCF PBX = -4.65 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
333 &SLCF PBX = -4.65 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
334 &SLCF PBX = -4.65 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
335 &SLCF PBX = -4.65 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
336 &SLCF PBX = -4.65 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
337
338 &SLCF PBX = 0.45 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
339 &SLCF PBX = 0.45 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
340 &SLCF PBX = 0.45 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
341 &SLCF PBX = 0.45 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
342 &SLCF PBX = 0.45 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
343
344 &SLCF PBX = 4.35 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
345 &SLCF PBX = 4.35 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
346 &SLCF PBX = 4.35 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
347 &SLCF PBX = 4.35 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
348 &SLCF PBX = 4.35 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
349
350 &SLCF PBX = 5.8 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
351 &SLCF PBX = 5.8 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
352 &SLCF PBX = 5.8 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
353 &SLCF PBX = 5.8 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
354 &SLCF PBX = 5.8 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
355
356 &SLCF PBY = 0.6 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
357 &SLCF PBY = 0.6 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
358 &SLCF PBY = 0.6 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
359 &SLCF PBY = 0.6 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
360 &SLCF PBY = 0.6 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
361
362 &SLCF PBY = 1.2 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
363 &SLCF PBY = 1.2 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
364 &SLCF PBY = 1.2 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
365 &SLCF PBY = 1.2 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
366 &SLCF PBY = 1.2 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
367

```

```

368 4SLCF PBX = 1.8 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
369 4SLCF PBY = 1.8 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
370 4SLCF PBY = 1.8 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
371 4SLCF PBY = 1.8 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
372 4SLCF PBY = 1.8 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
373
374 4SLCF PBY = 3.45 , QUANTITY = 'VELOCITY' , VECTOR = .TRUE. /
375 4SLCF PBY = 3.45 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' , VECTOR = .TRUE. /
376 4SLCF PBY = 3.45 , QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' , VECTOR = .TRUE. /
377 4SLCF PBY = 3.45 , QUANTITY = 'VOLUME FRACTION' , SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' , VECTOR = .TRUE. /
378 4SLCF PBY = 3.45 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
379
380 4SLCF PBZ = 0.6 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
381 4SLCF PBZ = 1.2 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
382 4SLCF PBZ = 1.8 , QUANTITY = 'PRESSURE' , VECTOR = .TRUE. /
383
384 devices
385 temperature
386 4DEVG ID = 'Temp_light_well_out' , XYZ = -9.50 , 1.20 , 2.10 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
387 4DEVG ID = 'Temp_light_well_in' , XYZ = -8.75 , 1.20 , 2.10 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
388 4DEVG ID = 'Temp_fire_lm' , XYZ = -4.65 , 1.20 , 1.00 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
389 4DEVG ID = 'Temp_fire_2m' , XYZ = -4.65 , 1.20 , 2.00 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
390
391 4DEVG ID = 'Temp_pre_mesh_0,6m' , XYZ = -0.45 , 0.50 , 0.60 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
392 4DEVG ID = 'Temp_pre_mesh_1,2m' , XYZ = -0.45 , 0.50 , 1.20 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
393 4DEVG ID = 'Temp_pre_mesh_1,8m' , XYZ = -0.45 , 0.50 , 1.80 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
394
395 4DEVG ID = 'Temp_post_mesh_0,6m' , XYZ = 0.00 , 0.50 , 0.60 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
396 4DEVG ID = 'Temp_post_mesh_1,2m' , XYZ = 0.00 , 0.50 , 1.20 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
397 4DEVG ID = 'Temp_post_mesh_1,8m' , XYZ = 0.00 , 0.50 , 1.80 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
398
399 4DEVG ID = 'Temp_ZP_UG_1,5m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 2.85 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
400 4DEVG ID = 'Temp_ZP_UG_Eg_2,0m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 3.35 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
401
402 4DEVG ID = 'Temp_P_EG_1,5m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 4.20 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
403 4DEVG ID = 'Temp_P_EG_2,0m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 4.70 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
404
405 4DEVG ID = 'Temp_ZP_EG_1OG_1,5m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 5.55 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
406 4DEVG ID = 'Temp_ZP_EG_1OG_2,0m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 6.05 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
407
408 4DEVG ID = 'Temp_P_1OG_1,5m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 6.90 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
409 4DEVG ID = 'Temp_P_1OG_2,0m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 7.40 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
410
411 4DEVG ID = 'Temp_ZP_1OG_2OG_1,5m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 8.25 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
412 4DEVG ID = 'Temp_ZP_1OG_2OG_2,0m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 8.75 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
413
414 4DEVG ID = 'Temp_P_2OG_1,5m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 9.60 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
415 4DEVG ID = 'Temp_P_2OG_2,0m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 10.10 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
416
417 4DEVG ID = 'Temp_ZP_2OG_3OG_1,5m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 10.95 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
418 4DEVG ID = 'Temp_ZP_2OG_3OG_2,0m' , XYZ = 4.35 , 1.20 , 11.45 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
419
420 4DEVG ID = 'Temp_P_3OG_1,5m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 12.30 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
421 4DEVG ID = 'Temp_P_3OG_2,0m' , XYZ = 0.45 , 1.20 , 12.80 , QUANTITY = 'TEMPERATURE' /

```



```

635      pressure
636      &DEVC ID = 'Pr_light_well'
637      &DEVC ID = 'Pr_pre_mesh_1,2m'
638      &DEVC ID = 'Pr_post_mesh_1,2m'
639      &DEVC ID = 'Pr_P_EG_1,5m'
640      &DEVC ID = 'Pr_P_LOG_1,5m'
641      &DEVC ID = 'Pr_P_20G_1,5m'
642      &DEVC ID = 'Pr_P_30G_1,5m'
643      &DEVC ID = 'Pr_P_40G_1,5m'
644      &DEVC ID = 'Pr_Ap_EG_1,5m_d'
645      &DEVC ID = 'Pr_Ap_LOG_1,5m_d'
646      &DEVC ID = 'Pr_Ap_20G_1,5m_d'
647      &DEVC ID = 'Pr_Ap_30G_1,5m_d'
648      &DEVC ID = 'Pr_Ap_40G_1,5m_d'
649
650
651      XYZ = -9.50 , 1.20 , 2.10
        XYZ = -0.45 , 0.50 , 1.20
        XYZ = 0.00 , 0.50 , 1.20
        XYZ = 0.45 , 1.20 , 4.20
        XYZ = 0.45 , 1.20 , 6.90
        XYZ = 0.45 , 1.20 , 9.60
        XYZ = 0.45 , 1.20 , 12.30
        XYZ = 0.45 , 1.20 , 15.00
        XYZ = 0.45 , 3.375 , 4.20
        XYZ = 0.45 , 3.375 , 6.90
        XYZ = 0.45 , 3.375 , 9.60
        XYZ = 0.45 , 3.375 , 12.30
        XYZ = 0.45 , 3.375 , 15.00
        QUANTITY = 'PRESSURE' /
        QUANTITY = 'PRESSURE' /

```

&TAIL /

Anlage 4: Lehr- und Ausbildungsaussage der LFS BW



Baden-Württemberg

LANDESFEUERWEHRSCHULE

Einsatztaktik – Kellerbrand im Mehrfamilienhaus

Hinter dieser Überschrift versteckt sich eine Masterarbeit zur Untersuchung des Brand- und Rauchgasverhaltens bei einem ausgedehnten Kellerbrand in einem Mehrfamilienhaus. Durch Brandsimulationen mit der Software *Fire Dynamics Simulator* konnte ein ausgedehntes Kellerbrandszenario dargestellt werden. Zusätzlich wurden einsatztaktische Maßnahmen der Feuerwehr in der Simulation berücksichtigt.

Betrachtet wurde die Personensicherheit anhand der Rauchgastemperatur, der Konzentration von Kohlenstoffmonoxid und der optischen Rauchdichte.

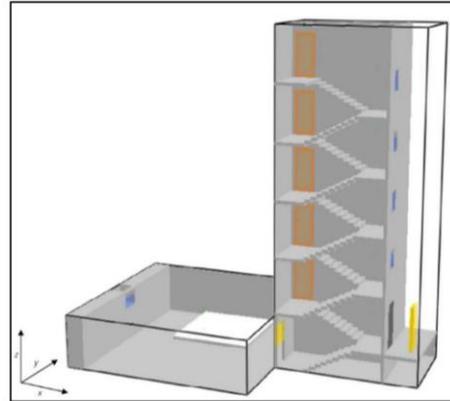


Abbildung 1: Simuliertes Modell des Mehrfamilienhauses mit Kellerraum (links) und Treppenraum (rechts)

Zur Anwendung kamen neben der Simulationsauswertung auch weitere Ingenieurmethoden im Brandschutz.

Einsatztaktische Vorgehensweise

In der Simulation konnte das einsatztaktische Vorgehen von zwei im Innenangriff eingesetzten Trupps abgebildet werden. Überprüft wurde folgende Vorgehensweise:

„Angriffstrupp zur Brandbekämpfung mit erstem Rohr in den Keller über den Treppenraum vor!“

„Wassertrupp zur Kontrolle und dem Schaffen von Abluftöffnungen mit zweitem Rohr (trocken) in den Treppenraum vor!“

Den Trupps wurden folgende Maßnahmen zugeordnet:

- Öffnen der Hauseingangstüre (AT*)
- Setzen des mobilen Rauchverschlusses (AT*)
- Brandbekämpfungsmaßnahmen (AT*)
- Öffnen des Kellerlichtschachtes (AT*)
- Öffnen der Treppenraumfenster (WT*)
- Start der Überdruckbelüftung (ST*)

*AT-Angriffstrupp, WT-Wassertrupp, ST-Schlauchtrupp



Abbildung 2: Nachgestelltes Einsatzszenario anhand einer Planübung an der Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg

Zusammenfassung der einsatztaktischen Erkenntnisse

Durch das Öffnen der Hauseingangstüre durch den Angriffstrupp wird dem zumeist unterventilierten Brandgeschehen eine große Menge an Luftsauerstoff zugeführt. Die Folge wird eine Beschleunigung des Brandes sein.

Das Schaffen einer räumlichen Trennung zwischen dem Brandraum und dem Treppenraum durch einen mobilen Rauchverschluss hat positive Auswirkungen auf Personen, die sich im Treppenraum befinden – sowohl ungeschützte Bewohner (Verbesserung der Überlebenschance) als auch Trupps unter Atemschutz (Verbesserung der Arbeitsbedingungen).

Durch den ersten Trupp zur Brandbekämpfung kann die Gefahr der Ausbreitung von Feuer und Rauch für die Bewohner und die Mannschaft minimiert werden. Die Gefahr wird aktiv bekämpft und führt somit zu einer Verbesserung der verbleibenden Gefährdungen.

Durch das Schaffen von Abluftöffnungsflächen im Treppenraum kann eine schnelle und effektive Verbesserung der thermischen und toxischen Umgebungsbedingungen herbeigeführt werden. Schon allein durch die natürliche Belüftung kann eine schnelle Reduzierung der Expositionswerte erzielt werden. Diese verbesserten (Sicht-)Verhältnisse haben einen positiven Effekt auf die Fremdrettungsphase durch die Feuerwehr.

Mit dem Einsatz der maschinellen Überdruckbelüftung kann eine schnellere Spülwirkung des Treppenraums erreicht werden, als es durch natürliche Belüftungsmaßnahmen möglich wäre. Eine taktische Ventilation und das Schließen von Fenstern ist zeitlich nicht notwendig.



Abbildung 3: Rauchausbreitung im Brand- und Treppenraum. Dargestellt ist die Brand- und Rauchgassimulation 1 Minute nach Brandausbruch (links), 3 Minuten nach Brandausbruch (mittig) und 5 Minuten nach Brandausbruch (rechts).

Fazit

- Sofort Brandbekämpfungsmaßnahmen einleiten!
- Rauchvorhang auch bei verrauchtem Treppenraum setzen!
- Sofort Fenster im Treppenraum öffnen, nicht auf maschinelle Belüftung warten!
- Treppenraum sichern, dann Personen retten!
= Teil der Menschenrettung → Kann im Einzelfall ein Vorgehen ohne Sicherheitstrupp rechtfertigen!
- Alle Wohnungen kontrollieren, von unten nach oben!

Anlage 5: Tabellarische Darstellung der Simulationsauswertungen

S_1_LEAK_1_REAC_1

Zeit in s	Zeit in min	Auswertung der Nachweiskriterien
0	0:00:00	Start der Simulation, Brandausbruch
56	0:00:56	Auslösung Rauchwarnmelder, TR UG
132	0:02:12	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
159	0:02:39	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P EG, Höhe 2 m
191	0:03:11	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
209	0:03:29	Gastemperatur T > 50 °C, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
209	0:03:29	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 und 2,0 m
213	0:03:33	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 1.OG, Höhe 1,5 m
230	0:03:50	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P EG, Höhe 2 m
232	0:03:52	Auslösung Rauchwarnmelder, WE EG
240	0:04:00	Gastemperatur T > 50 °C, P EG, Höhe 2 m
240	0:04:00	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
260	0:04:20	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
267	0:04:27	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 2.OG, Höhe 1,5 m
288	0:04:48	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 1.OG, Höhe 2 m
289	0:04:49	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
295	0:04:55	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 1.OG
295	0:04:55	Gastemperatur T > 50 °C, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
312	0:05:12	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
316	0:05:16	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 3.OG, Höhe 2 m
334	0:05:34	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 2 m
340	0:05:40	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 2.OG, Höhe 2 m
360	0:06:00	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 2.OG
375	0:06:15	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
392	0:06:32	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 4.OG, Höhe 1,5 m
392	0:06:32	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
398	0:06:38	Gastemperatur T > 50 °C, P 1.OG, Höhe 2 m
411	0:06:51	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 3.OG, Höhe 2 m
415	0:06:55	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 1.OG, Höhe 2 m
453	0:07:33	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 3.OG
488	0:08:08	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 4.OG
489	0:08:09	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 4.OG, Höhe 2 m
489	0:08:09	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
508	0:08:28	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 2.OG, Höhe 2 m
543	0:09:03	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 2 m
566	0:09:26	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 2 m
572	0:09:32	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 0,5 m
592	0:09:52	Gastemperatur T > 50 °C, P 2.OG, Höhe 2 m

605	0:10:05	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 3.OG, Höhe 2 m
632	0:10:32	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
654	0:10:54	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
671	0:11:11	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 2 m
682	0:11:22	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 4.OG, Höhe 2 m
692	0:11:32	Gastemperatur T > 50 °C, P 3.OG, Höhe 2 m
727	0:12:07	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
735	0:12:15	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 0,5 m
738	0:12:18	Gastemperatur T > 50 °C, P 4.OG, Höhe 2 m
756	0:12:36	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 2 m
758	0:12:38	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
815	0:13:35	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
821	0:13:41	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 4.OG, Höhe 0,5 m
827	0:13:47	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 2 m
851	0:14:11	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
885	0:14:45	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
926	0:15:26	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 2 m
958	0:15:58	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 2 m
967	0:16:07	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 2 m
1015	0:16:55	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
1037	0:17:17	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 0,5 m
1102	0:18:22	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 2 m
1197	0:19:57	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
1227	0:20:27	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 0,5 m
1311	0:21:51	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 2 m
1433	0:23:53	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
1492	0:24:52	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
1500	0:25:00	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 2 m
1800	0:30:00	Ende der Simulation
n/a	n/a	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 0,5 m

S_2_LEAK_1_REAC_1_FW

Zeit in s	Zeit in min	Auswertung der Nachweiskriterien
900	0:15:00	Öffnen der Gebäudeeingangstür
900	0:15:00	Start der einsatztaktischen Auswertung
960	0:16:00	Setzen des Mobilten Rauchverschlusses
1140	0:19:00	Erlöschen des Brandes
1140	0:19:00	Öffnen des Treppenraumfensters EG-1.OG
1170	0:19:30	Öffnen des Kellerlichtschachtes
1170	0:19:30	Öffnen des Treppenraumfensters 1.OG-2.OG
1200	0:20:00	Öffnen des Treppenraumfensters 2.OG-3.OG
1230	0:20:30	Öffnen des Treppenraumfensters 3.OG-4.OG
1290	0:21:30	Start der Überdruckbelüftung
1296	0:21:36	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 m
1296	0:21:36	Gastemperatur T < 50 °C, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 m
1300	0:21:40	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 m
1301	0:21:41	Gastemperatur T < 50 °C, P EG, Höhe 2 m
1302	0:21:42	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, P EG, Höhe 2 m
1307	0:21:47	Gastemperatur T < 50 °C, ZP EG zu 1.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
1309	0:21:49	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, ZP EG zu 1.OG, Höhe 1,5 m
1311	0:21:51	Gastemperatur T < 50 °C, P 1.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
1315	0:21:55	Gastemperatur T < 50 °C, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
1318	0:21:58	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, P 1.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
1320	0:22:00	Gastemperatur T < 50 °C, P 2.OG, Höhe 1,5 m
1322	0:22:02	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
1328	0:22:08	Gastemperatur T < 50 °C, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
1331	0:22:11	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, P 2.OG, Höhe 1,5 m
1334	0:22:14	Gastemperatur T < 50 °C, P 3.OG, Höhe 1,5 m
1340	0:22:20	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 m
1340	0:22:20	Gastemperatur T < 50 °C, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 1,5 m
1353	0:22:33	Gastemperatur T < 50 °C, P 4.OG, Höhe 1,5 m
1360	0:22:40	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, P 3.OG, Höhe 1,5 m
1361	0:22:41	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, P EG, Höhe 2 m
1366	0:22:46	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, ZP EG zu 1.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
1380	0:23:00	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, P 1.OG, Höhe 1,5 m
1391	0:23:11	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
1404	0:23:24	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 1,5 m
1405	0:23:25	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, P 2.OG, Höhe 1,5 m
1421	0:23:41	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 m
1458	0:24:18	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, P 3.OG, Höhe 1,5 m
1513	0:25:13	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 1,5 m
1800	0:30:00	Ende der Simulation
n/a	n/a	Gaskonzentration cCO < 500 ppm, P 4.OG
n/a	n/a	Optische Dichte DL < 0,2 m-1, P 4.OG

S_3_LEAK_1_REAC_2

Zeit in s	Zeit in min	Auswertung der Nachweiskriterien
0	0:00:00	Start der Simulation, Brandausbruch
56	0:00:56	Auslösung Rauchwarnmelder, TR UG
133	0:02:13	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
156	0:02:36	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P EG, Höhe 1,5 m
184	0:03:04	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 und 2,0 m
191	0:03:11	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
201	0:03:21	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 1.OG, Höhe 2 m
208	0:03:28	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P EG, Höhe 2 m
210	0:03:30	Gastemperatur T > 50 °C, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
227	0:03:47	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 2 m
230	0:03:50	Auslösung Rauchwarnmelder, WE EG
237	0:03:57	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
242	0:04:02	Gastemperatur T > 50 °C, P EG, Höhe 2 m
253	0:04:13	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 2.OG, Höhe 1,5 m
262	0:04:22	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 1.OG, Höhe 2 m
276	0:04:36	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
291	0:04:51	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 1.OG
292	0:04:52	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 2 m
302	0:05:02	Gastemperatur T > 50 °C, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
307	0:05:07	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 3.OG, Höhe 2 m
317	0:05:17	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 2.OG, Höhe 2 m
329	0:05:29	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 2 m
345	0:05:45	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
353	0:05:53	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 2.OG
367	0:06:07	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 4.OG, Höhe 1,5 m
379	0:06:19	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
388	0:06:28	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 3.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
393	0:06:33	Gastemperatur T > 50 °C, P 1.OG, Höhe 2 m
407	0:06:47	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 1.OG, Höhe 2 m
445	0:07:25	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 4.OG, Höhe 2 m
446	0:07:26	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 3.OG
463	0:07:43	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
479	0:07:59	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 2 m
483	0:08:03	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 4.OG
485	0:08:05	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 2.OG, Höhe 2 m
539	0:08:59	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 2 m
573	0:09:33	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 0,5 m
576	0:09:36	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 3.OG, Höhe 2 m
579	0:09:39	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 4.OG, Höhe 2 m
589	0:09:49	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 2 m
596	0:09:56	Gastemperatur T > 50 °C, P 2.OG, Höhe 2 m
619	0:10:19	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 1.OG, Höhe 0,5 m

651	0:10:51	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
651	0:10:51	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 0,5 m
681	0:11:21	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 2 m
687	0:11:27	Gastemperatur T > 50 °C, P 3.OG, Höhe 2 m
699	0:11:39	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 2.OG, Höhe 0,5 m
734	0:12:14	Gastemperatur T > 50 °C, P 4.OG, Höhe 2 m
744	0:12:24	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
785	0:13:05	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 3.OG, Höhe 0,5 m
791	0:13:11	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 2 m
792	0:13:12	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
796	0:13:16	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 4.OG, Höhe 0,5 m
831	0:13:51	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 2 m
848	0:14:08	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 2 m
854	0:14:14	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
955	0:15:55	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 2 m
962	0:16:02	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
1000	0:16:40	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 0,5 m
1102	0:18:22	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 2 m
1233	0:20:33	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 0,5 m
1282	0:21:22	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
1321	0:22:01	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 2 m
1475	0:24:35	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
1502	0:25:02	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
1505	0:25:05	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 2 m
1800	0:30:00	Ende der Simulation
n/a	n/a	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 0,5 m

S_4_LEAK_2_REAC_1

Zeit in s	Zeit in min	Auswertung der Nachweiskriterien
0	0:00:00	Start der Simulation, Brandausbruch
56	0:00:56	Auslösung Rauchwarnmelder, TR UG
133	0:02:13	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
160	0:02:40	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P EG, Höhe 2 m
192	0:03:12	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP EG zu 1.OG, Höhe 1,5 m
197	0:03:17	Gastemperatur T > 50 °C, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
205	0:03:25	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
206	0:03:26	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 1.OG, Höhe 2 m
215	0:03:35	Auslösung Rauchwarnmelder, WE EG
226	0:03:46	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P EG, Höhe 1,5 m
241	0:04:01	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
243	0:04:03	Gastemperatur T > 50 °C, P EG, Höhe 2 m
255	0:04:15	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
263	0:04:23	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 2.OG, Höhe 1,5 m
278	0:04:38	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 1.OG
278	0:04:38	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
279	0:04:39	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 1.OG, Höhe 2 m
285	0:04:45	Gastemperatur T > 50 °C, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
297	0:04:57	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 2 m
314	0:05:14	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
317	0:05:17	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 3.OG, Höhe 2 m
340	0:05:40	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 2.OG
341	0:05:41	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 2.OG, Höhe 2 m
361	0:06:01	Gastemperatur T > 50 °C, P 1.OG, Höhe 2 m
367	0:06:07	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
372	0:06:12	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 4.OG, Höhe 2 m
388	0:06:28	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 1.OG, Höhe 2 m
391	0:06:31	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
418	0:06:58	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 3.OG, Höhe 2 m
428	0:07:08	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 3.OG
453	0:07:33	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 2 m
471	0:07:51	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 4.OG
475	0:07:55	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 2.OG, Höhe 2 m
476	0:07:56	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 0,5 m
478	0:07:58	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 4.OG, Höhe 2 m
497	0:08:17	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
525	0:08:45	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 2 m
550	0:09:10	Gastemperatur T > 50 °C, P 2.OG, Höhe 2 m
571	0:09:31	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 0,5 m
574	0:09:34	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 3.OG, Höhe 2 m

586	0:09:46	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 2 m
591	0:09:51	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 1.OG, Höhe 0,5 m
597	0:09:57	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
632	0:10:32	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 2.OG, Höhe 0,5 m
633	0:10:33	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 2 m
642	0:10:42	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 4.OG, Höhe 2 m
654	0:10:54	Gastemperatur T > 50 °C, P 3.OG, Höhe 2 m
705	0:11:45	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
707	0:11:47	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 2 m
711	0:11:51	Gastemperatur T > 50 °C, P 4.OG, Höhe 2 m
726	0:12:06	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
736	0:12:16	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 3.OG, Höhe 0,5 m
750	0:12:30	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 2 m
756	0:12:36	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 4.OG, Höhe 0,5 m
779	0:12:59	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
790	0:13:10	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 2 m
920	0:15:20	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
920	0:15:20	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 2 m
965	0:16:05	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 2 m
970	0:16:10	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 0,5 m
1141	0:19:01	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 0,5 m
1183	0:19:43	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
1318	0:21:58	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 2 m
1375	0:22:55	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
1400	0:23:20	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 2 m
1453	0:24:13	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
1594	0:26:34	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 0,5 m
1800	0:30:00	Ende der Simulation

S_5_LEAK_2_REAC_1_FW

Zeit in s	Zeit in min	Auswertung der Nachweiskriterien
900	0:15:00	Start der einsatztaktischen Auswertung
900	0:15:00	Öffnen der Gebäudeeingangstüre
960	0:16:00	Setzen des Mobilten Rauchverschlusses
1140	0:19:00	Erlöschen des Brandes
1140	0:19:00	Öffnen des Treppenraumfensters EG-1.OG
1170	0:19:30	Öffnen des Kellerlichtschachtes
1170	0:19:30	Öffnen des Treppenraumfensters 1.OG-2.OG
1200	0:20:00	Öffnen des Treppenraumfensters 2.OG-3.OG
1230	0:20:30	Öffnen des Treppenraumfensters 3.OG-4.OG
1290	0:21:30	Start der Überdruckbelüftung
1299	0:21:39	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
1303	0:21:43	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, P EG, Höhe 2 m
1306	0:21:46	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
1312	0:21:52	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, P 1.OG, Höhe 2 m
1318	0:21:58	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 2 m
1322	0:22:02	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, P 2.OG, Höhe 2 m
1325	0:22:05	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
1325	0:22:05	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 m
1328	0:22:08	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 m
1329	0:22:09	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, P EG, Höhe 1,5 m
1329	0:22:09	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, ZP EG zu 1.OG, Höhe 1,5 m
1335	0:22:15	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, P 1.OG, Höhe 1,5 m
1337	0:22:17	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, P 3.OG, Höhe 2 m
1342	0:22:22	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, P EG, Höhe 1,5 m
1342	0:22:22	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
1343	0:22:23	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
1349	0:22:29	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, P 2.OG, Höhe 1,5 m
1351	0:22:31	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, ZP EG zu 1.OG, Höhe 1,5 m
1358	0:22:38	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 m
1359	0:22:39	Gastemperatur $T < 50\text{ °C}$, P 4.OG, Höhe 2 m
1366	0:22:46	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, P 1.OG, Höhe 1,5 m
1373	0:22:53	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
1388	0:23:08	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, P 2.OG, Höhe 1,5 m
1396	0:23:16	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, P 3.OG, Höhe 1,5 m
1416	0:23:36	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 m
1453	0:24:13	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, P 3.OG, Höhe 1,5 m
1468	0:24:28	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, P 4.OG, Höhe 1,5 m
1800	0:30:00	Ende der Simulation
n/a	n/a	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, P 4.OG, Höhe 1,5 m
n/a	n/a	Optische Dichte $DL < 0,2\text{ m}^{-1}$, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 1,5 m
n/a	n/a	Gaskonzentration $c_{CO} < 500\text{ ppm}$, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 1,5 m

S_6_LEAK_2_REAC_2

Zeit in s	Zeit in min	Auswertung der Nachweiskriterien
0	0:00:00	Start der Simulation, Brandausbruch
55	0:00:55	Auslösung Rauchwarnmelder, TR UG
128	0:02:08	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
160	0:02:40	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P EG, Höhe 1,5 m
183	0:03:03	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP UG zu EG, Höhe 1,5 und 2,0 m
191	0:03:11	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
191	0:03:11	Gastemperatur T > 50 °C, ZP UG zu EG, Höhe 2 m
206	0:03:26	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 1.OG, Höhe 2 m
209	0:03:29	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P EG, Höhe 2 m
215	0:03:35	Auslösung Rauchwarnmelder, WE EG
233	0:03:53	Gastemperatur T > 50 °C, P EG, Höhe 2 m
239	0:03:59	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
239	0:03:59	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
263	0:04:23	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 2.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
263	0:04:23	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 1.OG, Höhe 2 m
279	0:04:39	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 1.OG
284	0:04:44	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 1,5 und 2,0 m
288	0:04:48	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 1,5 m
290	0:04:50	Gastemperatur T > 50 °C, ZP EG zu 1.OG, Höhe 2 m
295	0:04:55	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 2 m
318	0:05:18	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 3.OG, Höhe 2 m
318	0:05:18	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 2.OG, Höhe 2 m
338	0:05:38	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 2.OG
338	0:05:38	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
359	0:05:59	Gastemperatur T > 50 °C, P 1.OG, Höhe 2 m
369	0:06:09	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, P 4.OG, Höhe 2 m
371	0:06:11	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 1.OG, Höhe 2 m
388	0:06:28	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
393	0:06:33	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 3.OG, Höhe 2 m
399	0:06:39	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 2 m
426	0:07:06	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 3.OG
431	0:07:11	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 2.OG, Höhe 2 m
438	0:07:18	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, P 4.OG, Höhe 2 m
457	0:07:37	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
467	0:07:47	Auslösung Rauchwarnmelder, WE 4.OG
474	0:07:54	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE EG, Höhe 0,5 m
490	0:08:10	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 2 m
539	0:08:59	Optische Dichte DL > 0,2 m-1, WE 3.OG, Höhe 2 m
541	0:09:01	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 1.OG zu 2.OG, Höhe 2 m
565	0:09:25	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE EG, Höhe 0,5 m
577	0:09:37	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 2 m

597	0:09:57	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 1.OG, Höhe 0,5 m
597	0:09:57	Gastemperatur T > 50 °C, P 2.OG, Höhe 2 m
605	0:10:05	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 4.OG, Höhe 2 m
645	0:10:45	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 2.OG, Höhe 0,5 m
645	0:10:45	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 2.OG zu 3.OG, Höhe 2 m
656	0:10:56	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
682	0:11:22	Gastemperatur T > 50 °C, P 3.OG, Höhe 2 m
724	0:12:04	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 2 m
730	0:12:10	Gastemperatur T > 50 °C, P 4.OG, Höhe 2 m
733	0:12:13	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
733	0:12:13	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 2 m
742	0:12:22	Gastemperatur T > 50 °C, ZP 3.OG zu 4.OG, Höhe 2 m
756	0:12:36	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 2 m
760	0:12:40	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 3.OG, Höhe 0,5 m
776	0:12:56	Optische Dichte DL > 0,2 m ⁻¹ , WE 4.OG, Höhe 0,5 m
852	0:14:12	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 2 m
910	0:15:10	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
920	0:15:20	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 2 m
941	0:15:41	Gaskonzentration cCO > 500 ppm, WE 4.OG, Höhe 0,5 m
1068	0:17:48	Gastemperatur T > 50 °C, WE EG, Höhe 0,5 m
1164	0:19:24	Gastemperatur T > 50 °C, WE 1.OG, Höhe 0,5 m
1234	0:20:34	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 2 m
1329	0:22:09	Gastemperatur T > 50 °C, WE 2.OG, Höhe 0,5 m
1347	0:22:27	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 2 m
1380	0:23:00	Gastemperatur T > 50 °C, WE 3.OG, Höhe 0,5 m
1537	0:25:37	Gastemperatur T > 50 °C, WE 4.OG, Höhe 0,5 m
1800	0:30:00	Ende der Simulation
