

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER

DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

**Auswirkungen aktivierter ortsfester Wasserlöschanlagen auf die
Wirkung natürlicher Rauchabzüge**

von

Dr.-Ing. Ilian Dinkov

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik



165

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,
Katastrophenschutz und Zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 165

**Auswirkungen aktivierter ortsfester Wasserlöschanlagen auf die
Wirkung natürlicher Rauchabzüge**

von

Dr.-Ing. Ilian Dinkov

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Dezember 2019

FA. Nr. 215 (3/2010)

ISSN 0170-0060

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: <p style="text-align: center;">165</p>	Titel des Berichtes: Auswirkungen aktivierter ortsfester Wasserlöschanlagen auf die Wirkung natürlicher Rauchabzüge		ISSN: <p style="text-align: center;">0170-0060</p>
Autor: Dr.-Ing. Ilian Dinkov		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: FA. Nr. 215 (3/2010)		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: Dezember 2019			
Seitenzahl: 86	Bilder: 75	Tabellen: 4	Literaturverweise: 33
Kurzfassung: <p>In dem vorliegenden Forschungsbericht wurde die Wechselwirkung zwischen aktivierten, ortsfesten Wasserlöschanlagen (Sprinkler- und Hochdruck-Wasserebel-Löschanlage) und natürlichen Rauchabzügen (NRA) experimentell sowie mit Hilfe von dreidimensionalen numerischen Simulationen untersucht. Um die Grundlagen und Phänomene dieser Wechselwirkung besser zu verstehen, wurde zusätzlich der Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchschiicht experimentell untersucht. Für die Untersuchungen wurden ein Sprinkler und eine Hochdruck-Wasserebel-Löschanlage (HDWN) eingesetzt. Die Sprinklerauslösung bewirkte ein Auswaschen des Rauchgases bedingt durch den großen Wirkungsbereich und die horizontal großflächige Verteilung von Tröpfchen. Nach der Auslösung einer Hochdruck-Wasserebel-Löschanlage wurden hingegen die Rauchgase durch den hohen Tropfenimpuls mitgezogen und im Brandraum rezirkuliert. Schließlich wären bei beiden Versuchen die Flucht- und Rettungswege infolge der Auslösung der Löschanlagen stark verraucht und für ungeschützte Personen unpassierbar geworden. Die experimentell beobachtete Wechselwirkung wurde auch numerisch nachgerechnet. Entsprechend beiden Untersuchungsmethoden kann festgehalten werden, dass das Wasser-Sprühbild (Tropfengröße, Geschwindigkeit, Düsengeometrie etc.) eine nicht vernachlässigbare Rolle auf die lokale und globale Verrauchung der Flucht- und Rettungswege hat. Anschließend wurde die Wechselwirkung zwischen Wasserlöschanlagen und natürlichen Rauchabzügen in Form einer numerischen Studie untersucht. Die Interpretation der Ergebnisse der numerischen Simulation ergab, dass die NRA in Nähe zum oder direkt über den Brand zu keiner oder im günstigsten Fall, je nach Rauchgastemperaturen, zu einer verzögerten Auslösung der Sprinkler führt.</p>			
Schlagwörter: Modellierung, Brandsimulation, CFD, NRA-Sprinkler-Interaktion, Feldmodell, Brandszenarien, Brände			

Inhaltsverzeichnis

Berichtskennblatt	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung.....	1
1.2 Aufbau und Struktur.....	2
2 Stand des Wissens / Literaturrecherche.....	3
3 Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchsicht bei bekanntem Brandverhalten von Jacken/Bekleidung.....	4
3.1 Versuchsaufbau.....	5
3.1.1 Probekörper und Zündquelle.....	5
3.1.2 Aufbau und Messtechnik.....	5
3.2 Versuchsdurchführung	9
3.3 Versuchsergebnisse	10
3.3.1 Sprinkler mit Niederdruck.....	10
3.3.2 Standard-Sprinkler	12
3.3.3 Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage	17
3.3.4 Vergleichende Betrachtung.....	21
3.4 Zusammenfassung (experimentelle Untersuchungen)	22
4 Numerische Untersuchungen.....	23
4.1 Motivation und Zielsetzung.....	23
4.2 Stand des Wissens / Literaturrecherche.....	25
4.3 Validierung der Simulationsmethodik mit Hilfe von Modellexperimenten.....	26
4.3.1 „Flow induced by fire in a compartment“ Steckler et al. [28]	26
4.3.2 FDS-Studie von Zhang and Chow [25]	33

5	Numerische Untersuchung zum Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchschrift bei bekanntem Brandverhalten von Jacken/Bekleidung.....	40
5.1	Numerisches Setup (numerische und physikalische Randbedingungen)....	40
5.2	Ergebnisse der Simulation.....	42
5.2.1	Instationäre Berechnung der Rauchausbreitung.....	43
5.2.2	Numerische Simulation der „Standard-Sprinkler“-Auslösung.....	47
5.2.3	Numerische Simulation der HDWN-Auslösung.....	50
5.3	Zusammenfassung (numerische Untersuchungen).....	52
6	Numerische Studie: NRA-Sprinkler-Rauchschrift-Brand Interaktion	54
6.1	Ergebnisse	56
6.1.1	Instationäre Berechnung der Rauchausbreitung.....	56
6.1.2	Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschrift und Sprinkler – Sprinkler 1 (Fall 2: zwischen Brand und Ausgang).....	59
6.1.3	Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschrift und zwei Sprinklern – Sprinkler 1 (Fall 2: zwischen Brand und Ausgang) und Sprinkler 2 (Ausgang).....	62
6.1.4	Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschrift und NRA (NRA 1-Brand).....	63
6.1.5	Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschrift und NRA 2 (Ausgang).....	65
6.1.6	Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschrift, Sprinkler und NRA (Sprinkler 1 - zwischen Brand und Ausgang und NRA 1-Brand)	67
6.1.7	Wechselwirkung zwischen Brand, zwei Sprinklern und zwei NRA (Sprinkler 1, Sprinkler 2, NRA 1, NRA 2).....	68
7	Zusammenfassung.....	70
8	Literaturverzeichnis.....	72

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken. Damit ist keine Empfehlung des genannten Produkts durch die Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie verbunden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Versuchstand - Ansicht schräg von oben	7
Abbildung 2: Versuchstand - Draufsicht	7
Abbildung 3: Versuchstand - Foto Seitenansicht (1-Probenkörper auf Waage, 2-drei TE-Bäume, 3-Abgassonde, 4-Extinktionsmessstrecke, 5-Sprinklerkopf bzw. 6-HDWN-Düse).....	8
Abbildung 4: Standard-Sprinkler (EPK15) mit 5mm Glasfässchen (Auslösung bei 68 °C) [8]	8
Abbildung 5: Düsenkopf der HDWN-Löschanlage mit fünf einzelnen Mikrodüsen [9]	8
Abbildung 6: Versuchsverlauf für Sprinkler mit Niederdruck (Zeiten: a-0s, b-50s, c-55s, d bis f-150 bis 310s).....	11
Abbildung 7: Messergebnisse für Sprinkler mit Niederdruck	12
Abbildung 8: Versuchsverlauf für Standard-Sprinkler (Zeiten: a-0s, b-90s, c-95s, d bis f-97 bis 102s, g-107s, h/i-116 bis 130s, j/k-150 bis 350s, l-430s)	14
Abbildung 9: Messergebnisse für Standard-Sprinkler.....	15
Abbildung 10: Wärmebildaufnahmen für Standard-Sprinkler (a-stabilisierte Rauchsicht ohne Sprinkler, b-Sprinkler nach 76s, c-Sprinkler nach 106s).....	16
Abbildung 11: Versuchsverlauf für HDWN-Löschanlage (Zeiten: a-0s, b-90s, c-95s, d bis h-96 bis 98s, i-101s, j-115s, k/l-160 bis 291s).....	18
Abbildung 12: Messergebnisse für Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN)	19
Abbildung 13: Wärmebildaufnahmen für Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (a-stabilisierte Rauchsicht ohne HDWN, b-HDWN/Rezirkulation für t=99s, c-HDWN t=265s)	21
Abbildung 14: Ablaufschema zur Durchführung einer Brandsimulationsrechnung mit Feldmodellen	24
Abbildung 15: Versuchsanordnung.....	27
Abbildung 16: numerisches Rechengebiet / Versuchsraum Steckler [28]	29
Abbildung 17: Geschwindigkeitsverteilung 62,7 [kW] Steckler [19]	30
Abbildung 18: Temperaturverteilung 62,7 [kW] Steckler [19].....	30
Abbildung 19: Vergleich der berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten (Türöffnung) 62,7 [kW] Steckler [19].....	31
Abbildung 20: Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen (Türöffnung) 62,7 [kW] Steckler [19].....	31
Abbildung 21: Geschwindigkeitsverteilung 158 [kW] Steckler [19]	32

Abbildung 22: Temperaturverteilung 158 [kW] Steckler [19].....	32
Abbildung 23: Vergleich der berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten (Türöffnung) 158 [kW] Steckler [19].....	33
Abbildung 24: Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen (Türöffnung) 158 [kW] Steckler [19].....	33
Abbildung 25: Geometrie des untersuchten Domains	34
Abbildung 26: Numerische Domain (Rechengebiet).....	36
Abbildung 27: Gitterausschnitt.....	36
Abbildung 28: RANS: Temperaturverteilung vor der Sprinklerauslösung	38
Abbildung 29: RANS: Temperaturverteilung nach der Sprinklerauslösung	38
Abbildung 30: DES: Temperaturverteilung vor der Sprinklerauslösung.....	39
Abbildung 31: DES: Temperaturverteilung nach der Sprinklerauslösung	39
Abbildung 32: DES: Rauchverteilung vor der Sprinklerauslösung	39
Abbildung 33: DES: Rauchverteilung nach der Sprinklerauslösung	39
Abbildung 34: numerisches Rechengebiet	41
Abbildung 35: numerisches Gitter.....	41
Abbildung 36: Rauchausbreitung bis zur Bildung einer stabilen Rauchschrift; a-3s, b-6,5s, c-9,5s, d-100s.....	43
Abbildung 37: Geschwindigkeitsverteilung der stabilen Rauchschrift 104,3 [s].....	44
Abbildung 38: Temperaturverteilung stabile Rauchschrift 104,3 [s]	45
Abbildung 39: Vergleich: stabile Rauchschrift CFD (links); stabile Rauchschrift Experiment (rechts)	45
Abbildung 40: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen der Simulation: a-Brand, b-Legende, c-Raumecke, d-Raummitte (Sprinkler).....	46
Abbildung 41: Rauchverteilung nach Sprinklerauslösung; ; a-105s, b-106s, c-108s, d- 124,5s.....	47
Abbildung 42: Temperaturverteilung nach Sprinklerauslösung.....	48
Abbildung 43: Temperaturverteilung nach Sprinklerauslösung 300 - 500K	49
Abbildung 44: Temperaturverteilung nach Sprinklerauslösung in einer Ebene mittig, senkrecht zum Brandereignis 300 - 500K.....	49
Abbildung 45: Vergleich: Rauchverteilung nach Sprinklerauslösung CFD (links) und Experiment (rechts)	49
Abbildung 46: Rauchverteilung nach HDWN-Auslösung; a-105,5s, b-107,5s, c-113s, d-115,5s.....	50

Abbildung 47: Temperaturverteilung nach HDWN-Auslösung 300 - 500K	51
Abbildung 48: Temperaturverteilung nach HDWN-Auslösung mittig in einer Ebene, senkrecht zum Brandereignis 300 - 500K.....	52
Abbildung 49: Vergleich: Rauchverteilung nach HDWN-Auslösung CFD (links) und Experiment (rechts)	52
Abbildung 50: Vergleich der Rauchverteilung; a-stabile Rauchschiicht (Simulation), b- stabile Rauchschiicht (Experiment), c- Sprinkler (Simulation), d- Sprinkler (Experiment), e-HDWN (Simulation), f- HDWN (Experiment)	53
Abbildung 51: numerisches Rechengebiet sowie Positionierung der NRA, Sprinkler, Brandquelle und Öffnungen.....	54
Abbildung 52: numerisches Gitter für die Berechnungen	55
Abbildung 53: Rauchausbreitung bis zur Bildung einer stabilen Rauchschiicht; a-5s, b-12s, c-75s, d-200s	57
Abbildung 54: Geschwindigkeitsverteilung der stabilen Rauchschiicht 200 [s].....	58
Abbildung 55: Temperaturverteilung der stabilen Rauchschiicht 200 [s]	58
Abbildung 56: Temperaturverteilung der stabilen Rauchschiicht 200 [s]: 300 bis 400 [K], Isolinie der Temperatur bei 358K	59
Abbildung 57: Rauchverteilung vor (links) und nach Sprinklerauslösung (rechts)	59
Abbildung 58: Geschwindigkeitsverteilung nach Sprinkler-Auslösung (Sprinkler 1) .	60
Abbildung 59: Temperaturverteilung nach Sprinkler-Auslösung (Sprinkler 1), 300 bis 400 [K]	61
Abbildung 60: CO-Massenfraktion nach Sprinkler-Auslösung (Sprinkler 1).....	61
Abbildung 61: Geschwindigkeitsverteilung nach Auslösung von zwei Sprinklern	62
Abbildung 62: Temperaturverteilung nach Auslösung von zwei Sprinklern, 300 bis 400 [K]	62
Abbildung 63: CO-Massenfraktion nach Auslösung von zwei Sprinklern	63
Abbildung 64: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneten NRA 1 (Brand)	64
Abbildung 65: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand)	65
Abbildung 66: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand).....	65
Abbildung 67: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneter NRA 2 (Ausgang).....	66
Abbildung 68: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 2 (Ausgang).....	66
Abbildung 69: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 2 (Ausgang)	66
Abbildung 70: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand) und Sprinkler 1	67

VIII

Abbildung 71: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand) und Sprinkler 1	68
Abbildung 72: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand) und Sprinkler 1.....	68
Abbildung 73: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand), Sprinkler 1 und Sprinkler 2	68
Abbildung 74: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand), Sprinkler 1 und Sprinkler 2	69
Abbildung 75: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand), Sprinkler 1 und Sprinkler 2	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Spezifikationen zu den eingesetzten Löschanlagen	9
Tabelle 2: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Sprühbilder	21
Tabelle 3: Sprinklerparameter	35
Tabelle 4: Fälle	56

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die gezielte Rauchabführung aus Gebäuden ist insbesondere bei baulichen Anlagen besonderer Art oder Nutzung (Sonderbauten) eine häufig geforderte Maßnahme, um damit sowohl die Selbstrettung der im Gebäude befindlichen Nutzer als auch die Fremdrettung und den Löschangriff durch die Feuerwehr durch hinreichende Sicht in den Flucht- und Rettungswegen zu unterstützen.

Die Auftriebsströmung über Bränden wird bei natürlichen Rauchabzügen (NRA) ausgenutzt, um den sich unter einer Raumdecke bildenden Auftriebsdruck in einen Rauchvolumenstrom umzusetzen, der den Raum durch die natürlichen Rauchabzüge nach außen verlassen kann. So wird die Bildung raucharmer Schichten am Boden und damit ausreichende Sicht in Flucht- und Rettungswegen ermöglicht. Dies wird durch bodennahe Öffnungen unterstützt, welche die erforderliche Umgebungsluft über den Druckausgleich nachströmen lassen.

Für die in die Rauchsicht transportierte Rauchmenge sind die Brandleistung und die Aufstiegshöhe der ungestörten Auftriebsströmung maßgebend. Bei der Anwendung von Handrechenverfahren und Mehrraum-Zonenmodellen zur Beschreibung der strömenden Rauchmasse werden aus Versuchsreihen entwickelte und in der Literatur beschriebene Gleichungen (Plume-Formeln) verwendet. Bei Feldmodellen finden Mischungsansätze Verwendung.

Eine Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen der aufsteigenden Rauchströmung (dem „Plume“) und dem entgegen strömenden Löschwasser in Form eines die Strömung beeinflussenden Tropfenschwarms aus Sprinkler-, Sprühflut- oder Wassernebelanlagen (Niederdruck, Hochdruck) findet hierbei jedoch nicht statt. Phänomenologisch führt die Gegenströmung dazu, dass der Rauch bis auf den Boden gedrückt und zur Seite abgelenkt sowie intensiv verwirbelt wird, des Weiteren abgekühlt und mit Wasserdampf / Rauchaerosol / Wassertropfen angereichert wird sowie, dass die aufgrund des zuvor beschriebenen Mechanismus mitgerissenen Rauchpartikel die Sicht im Bereich der Flucht- und Rettungswege erheblich beeinträchtigen können.

Gleichzeitig wird hierdurch, anders als bei der Annahme einer alleinigen Reduktion bzw. eines „Einfrierens“ der Brandleistung ohne Auswirkung auf die Strömungsform der aufsteigenden Rauchsäule, die Effizienz der natürlichen Rauchabführung beeinflusst. Aus diesem Grund ist zu untersuchen, ob es weiterhin zulässig ist, im Rahmen brandschutztechnischer Nachweise die Auswirkungen der strömungstechnischen Wechselwirkung im oben beschriebenen Sinne zu vernachlässigen.

1.2 Aufbau und Struktur

Der vorliegende Forschungsbericht gliedert sich in folgende vier Hauptabschnitte:

- Kapitel 2: Stand des Wissens / Literaturrecherche
- Kapitel 3: Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchsicht bei bekanntem Brandverhalten von Jacken/Bekleidung
- Kapitel 4: Numerische Untersuchungen
- Kapitel 5: Numerische Untersuchung zum Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchsicht bei bekanntem Brandverhalten von Jacken/Bekleidung
- Kapitel 6: Numerische Studie: NRA-Sprinkler-Rauchsicht-Brand Interaktion

Aus der Gliederung kann abgeleitet werden, dass sich die Arbeit in experimentelle und numerische Untersuchungen aufteilt. In Kapitel 3 werden, nach einer kurzen Literaturrecherche zum Wissenstand, die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Auslösung eines Sprinkler und einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN) auf die stabile Rauchsicht vorgestellt. Aufgrund des Einsatzes von numerisch gestützten Berechnungsverfahren beschäftigt sich Kapitel 4 mit der Motivation, Vorstellung und Validierung der numerischen Ansätze. Anschließend werden in Kapitel 5 die experimentell ermittelten Ergebnisse mit numerischen Methoden verglichen und diskutiert. In Kapitel 6 wird eine Studie zur Wechselwirkung zwischen NRA, Sprinkler und Rauchsicht mittels numerischen Simulationen durchgeführt.

2 Stand des Wissens / Literaturrecherche

Mittels 39 Großversuchen bei Underwriters Laboratories (UL) in Northbrook/Illinois wurde die Beeinflussung des Auslöseverhaltens der Sprinkler durch NRA und Rauchschrzen und umgekehrt, die der RWA-Funktion durch Sprinkler und Rauchschrzen untersucht [1], [2]. Ziel war auch die Entwicklung eines Computer-Modells zur Vorausberechnung des Sprinklerverhaltens und der Wärmefreisetzung, sowohl vor als auch nach der Aktivierung der Sprinkler. Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse kann festgestellt werden, dass nur RWA direkt über dem Brandherd temperatur-gesteuert aktiviert werden und sich nur in diesem Fall der Sprinkler-Auslösezeitpunkt verzögert und die Gesamtzahl der ausgelösten Sprinkler verringert. Dass schon in geringer und erst recht in größerer Entfernung vom Brand die RWA-Auslöseelemente nicht mehr ansprechen, wird auf die Kühlwirkung der Sprinkler zurückgeführt, nicht auf eine mangelhafte RWA-Konzeption. Die Effektivität einer von aktiven Sprinklern umringten RWA bleibt weiterhin ungeklärt.

Eine begrenzte Anzahl von experimentellen Studien wurde durchgeführt, um die Abkühlung von Rauch durch Sprinklersprays zu untersuchen. Liu [3] untersuchte diese anhand einer Korridor-Sprinkleranlage. Während dieser Experimente gab es keine Sprinkler im Brennraum. Die Untersuchungen zeigten, dass das Sprinklersystem eine Kühlung des Heißgasstroms bewirkte. Dies resultierte in einer Zerstörung der stabilen Rauchschrzt.

Morgan und Baines [4] führten Experimente in einer Großversuchsanlage, einem Teil eines überdachten Einkaufszentrums durch. Der Raum für die Experimente umfasste ein Geschäft als Brandraum und einen Abschnitt des angrenzenden Einkaufszentrums, in dem die Sprinkleranlage installiert wurde. Wie in [3] quantifizierten diese Experimente den Wärmeübergang zwischen Sprinklerspray und dem heißen Rauchgasstrom. Die Ergebnisse bestätigen die Aussage, dass Sprinkler dem Rauchgas eine erhebliche Menge an Wärme entziehen können.

Hinsichtlich des Einflusses auf die Stabilität der Rauchschrzt gibt es auch Untersuchungen, in denen keine gravierende Zerstörung erkennbar ist, selbst wenn die Rauchgase gekühlt werden. So behauptet Heskestad [5], dass die Stabilität der Rauchschrzt erst zerstört wird, wenn der Brand durch den Sprinkler unterdrückt wird. Erst in diesem fortgeschrittenen Stadium stellte er eine globale Verrauchung im Raum fest.

Einige Forscher [6] kamen zu dem Ergebnis, dass die Temperatur des Rauches außerhalb der Brandzone von einer Kombination von Parametern, wie der Wärmefreisetzungsrate des Feuers und dem Sprühbild des Sprinklersprays, abhängig ist. Es gibt jedoch eine sehr begrenzte Anzahl an Daten zur Bestimmung des konvektiven Wärmeanteils und damit der Rauchttemperatur nach Verlassen des Sprinkler-Wirkungsbereiches.

3 Experimentelle Untersuchung zum Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchschiicht bei bekanntem Brandverhalten von Jacken/Bekleidung

Ortsfeste automatische Wasserlöschanlagen, oftmals kurz Sprinkleranlagen, werden im öffentlichen und industriellen Bereich in unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt, um Gebäude und die darin befindlichen Personen und Sachgüter zu schützen. Dazu greifen diese die Flammen und das Brandgut in der Regel direkt an, um den Brand zu unterdrücken, einzudämmen oder zu löschen.

Die strömungstechnischen Folgen der Wechselwirkung zwischen der über dem Brandgeschehen aufsteigenden Rauchströmung und dem aus den Düsen der ortsfesten Löschanlage eingebrachten Wasser, in Form von Tropfen oder Nebel, werden meistens nicht berücksichtigt. Wächst die resultierende Rauchschiicht während des Brandverlaufes ungestört von der Decke nach unten, verbleibt in Bodennähe für eine gewisse Dauer noch eine ausreichend sichtfreie Schicht, die die Personenflucht sowie ein schnelles Vorrücken der Feuerwehreinsatzkräfte ermöglicht. Bekannt sind die unerwünschten Auswirkungen infolge der Auslösung von ortsfesten Wasserlöschanlagen. Die Einsatzkräfte berichten über schlechte Sichtbedingungen sowie schlagartiges Verqualmen im Wirkungsbereich von ausgelösten Sprinkleranlagen. Eine Störung der stabilen Rauchschiicht hätte daher mitunter negative Auswirkungen für die Personensicherheit auf den Flucht- und Rettungswegen.

In Erweiterung der Untersuchungen des VIB¹ im Frühjahr 2018 zum „Brandverhalten von Jacken/Bekleidung“ [7] wurde der Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile

¹ Verein zur Förderung von Ingenieurmethoden im Brandschutz

Rauchsicht in mehreren Versuchen vom 09. bis 14. November 2018 an der FFB² experimentell untersucht.

Als Brandszenario wurde ein brennender Kleiderständer an einer Wand, wie er beispielsweise in einem Kaufhaus stehen könnte, angenommen. Eine feuerfeste Einhausung wurde errichtet und mit Rauchschrzen, die für die Ausbildung einer stabilen Rauchsicht erforderlich sind, sowie einem Sprinkler versehen. Im Laufe der Untersuchungen wurde das Sprinkler-Sprühbild mittels Durchflussmenge beziehungsweise Vordruck variiert und es kam eine Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN) zum Einsatz. Dadurch konnte schließlich der Einfluss der Tropfengröße und -geschwindigkeit auf die Stabilität der Rauchsicht und die nachfolgende Verrauchung der Flucht- und Rettungswege untersucht werden.

3.1 Versuchsaufbau

3.1.1 Probekörper und Zündquelle

Als Probe wurden 15 Arbeitsjacken aus 100% Polyamid (Handelsname: Nylon) verwendet, die gleichen wie in den Versuchen des VIB zum Brandverhalten [7]. Daraus ergab sich eine Brandlast von etwa 20 kg. Die Jacken wurden mit nichtbrennbaren Kleiderbügeln in einem gleichmäßigen Abstand von 10 cm einem metallischen Gestell aufgehängt.

Mittig unterhalb der Jacken wurde als Zündinitial eine Wanne mit 500 ml n-Heptan platziert.

3.1.2 Aufbau und Messtechnik

Die Abbildung 1 bis Abbildung 3 zeigen den allgemeinen Versuchsaufbau, bestehend aus:

- einer mit Gipsfaser-Platten bekleideten (6 x 6 x 4) m³ Holz-/Stahlkonstruktion als feuerhemmende Einhausung, mit einer umfassenden Rauchschrze von 1 m Höhe,
- dem Probekörper einschließlich Gestell und Zündwanne, platziert auf einer Waage,

² Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

- drei Thermoelementbäumen (über dem Brandherd, in Raummitte/Sprinkler, in der Raumecke) mit einer höheren Dichte an Thermoelementen (d. h. kürzeren Abständen zwischen diesen) im Bereich der zu erwartenden Rauch-Grenzschicht,
- einer Messsonde mit Abgasmessgerät³ (O₂, CO, CO₂) in der Rauchschiicht,
- einem Extinktionslasermessgerät in der Rauchschiicht,
- und einem in der Raummitte an der Decke montierten Sprinklerkopf (Abbildung 4) bzw. einer auf einem Stativ montierten Hochdruck-Wassernebeldüse (Abbildung 5).

Der Versuchsverlauf wurde von den drei offenen Seiten der Einhausung aus mit Videokameras aufgezeichnet. Ergänzend wurde eine Wärmebildkamera auf einer Seite positioniert.

Der gesamte Versuchstand befand sich in einer geschlossenen Brandversuchshalle mit ausreichend Freivolumen und einer leistungsfähigen Hallenabsauganlage (max. 50 000 m³/h) mit nachgeschalteter Rauchgaswäsche. Die Halle ist nicht beheizt und die Temperatur lag je nach Tages- und Wetterlage zur Zeit der Versuchsdurchführungen zwischen 12 und 18 °C. Eine Beeinflussung von außen auf den Versuchstand wurde damit weitestgehend ausgeschlossen.

Folgende Messgrößen wurden während der Versuche zeitgleich erfasst:

- Massenverlust (beziehungsweise Massenverlustrate) des Probenkörpers
- Temperaturen an drei Messachsen in festgelegten Höhenschritten (Abbildung 1)
- Abgaskomponenten (O₂, CO, CO₂) schräg oberhalb der Brandstelle
- Optische Dichte (Transmission) in der Rauchschiicht
- Video- und Wärmebilddokumentation

³ Reaktionszeit 30 s

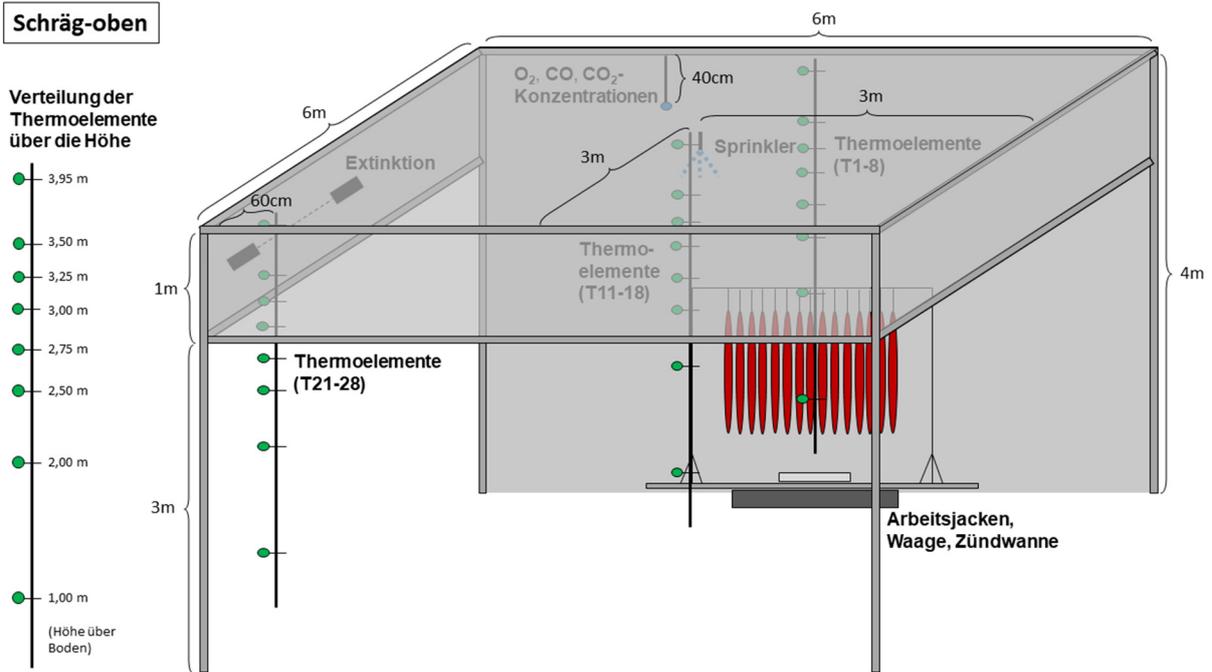


Abbildung 1: Versuchstand - Ansicht schräg von oben

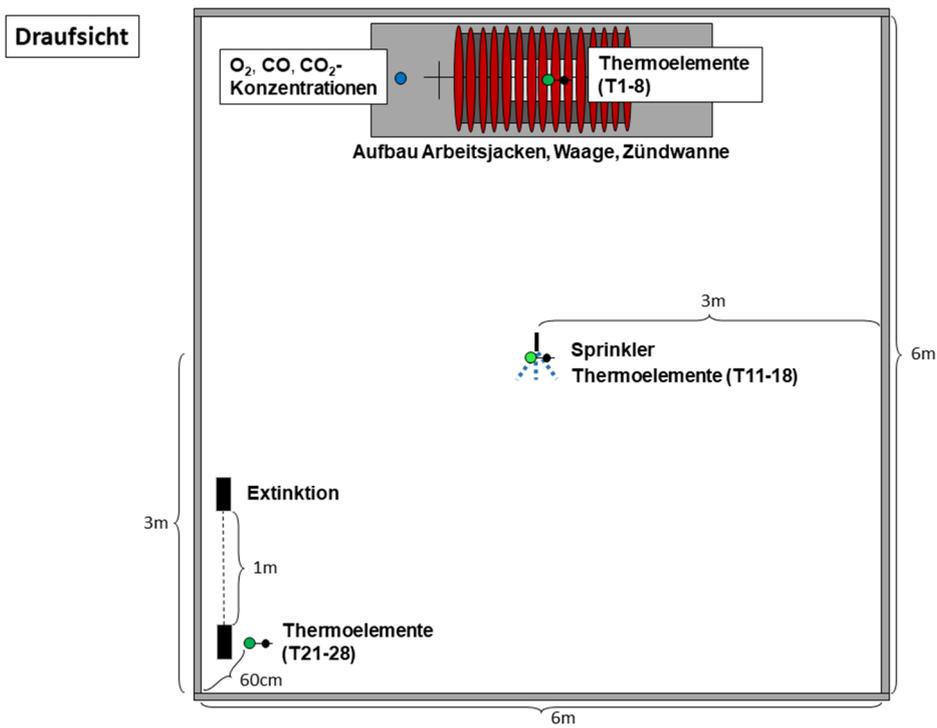


Abbildung 2: Versuchstand - Draufsicht



Abbildung 3: Versuchstand - Foto Seitenansicht (1-Probenkörper auf Waage, 2-drei TE-Bäume, 3-Abgassonde, 4-Extinktionsmessstrecke, 5-Sprinklerkopf bzw. 6-HDWN-Düse)



Abbildung 4: Standard-Sprinkler (EPK15) mit 5mm Glasfässchen (Auslösung bei 68 °C) [8]



Abbildung 5: Düsenkopf der HDWN-Löschanlage mit fünf einzelnen Mikrodüsen [9]

3.2 Versuchsdurchführung

Zum Vergleich der Wechselwirkung der stabilen Rauchschiicht mit verschiedenen Sprühbildern wurden drei Versuche mit verschiedenen Parametern für die Wasserlöschanlagen nach Tabelle 1 durchgeführt. Diese stammen aus vorangegangenen Versuchen zur jeweiligen Spraycharakterisierung sowie aus Herstellerangaben [8, 9].

Tabelle 1: Spezifikationen zu den eingesetzten Löschanlagen

#	Typ	Durchfluss	Druck**	k-Wert***	Spraywinkel	Tropfenspektrum
1	Sprinkler mit Niederdruck*	ca. 20 l/min	Unbekannt****	80	30 - 60 °	2000 - 5000 µm
2	Standard-Sprinkler	130 l/min	ca. 6 bar	80	80 - 110 °	500 - 1000 µm
3	Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage	11,9 l/min	110 bar	1,19	45 - 90 °	20 - 100 µm

* Niederdruck bedeutet hier, dass der vorhandene Wasser-Hausanschluss (ca. 4 bar) verwendet wurde

** gemeint ist der Ausgangsdruck an der Wasserentnahmestelle (z. B. Pumpenausgang)

*** nach Ausflussgesetz: $\dot{Q} [l/min] = k \cdot \sqrt{p [bar]}$

****der Druckverlust von der Zuleitung war unbekannt

Nach einer definierten Vorlaufzeit für das Messsystem wurde die Zündung der n-Heptan-Wanne (500 ml) mittels einer Zündlanze als Startzeit ($t = 0$) vereinbart. Bereits nach etwa einer halben Minute wurde ein eigenständiges Abbrennen der Jacken erreicht.

Die Sprinklerauslösung beim ersten Versuch (mit Niederdruck-Sprinkler, siehe Tabelle 1) erfolgte automatisch durch ein am Sprinklerkopf vorhandenes 5 mm Glasfässchen (siehe Abbildung 4), welches bei einer Auslösetemperatur von 68 °C den Wasserdurchfluss durch Bersten freigibt. Dies erfolgte im Versuch etwa 55 Sekunden nach Zündung.

Um eine möglichst stabilisierte Rauchschiicht zu erhalten, wurde die manuelle Wasserauslösung in den beiden anderen Versuchen auf 90 Sekunden nach Zündung gelegt. Hinzuzurechnen waren hier etwa 5 Sekunden Anlaufzeit der Pumpensysteme.

Als Randbedingung sollten zu diesem Zeitpunkt zudem die maximale Wärmefreisetzungsrate sowie die maximale Verrauchung im Hinblick auf die Brandverlaufskurve bereits erreicht worden sein.

Sobald sich der Brandrauch weitgehend gelichtet hatte, wurde die Löschanlage beziehungsweise die Wasserzufuhr abgestellt. Für alle Versuche erfolgte dies im Bereich zwischen fünf und fünfzehn Minuten nach Zündung, da in dieser Zeit die Probe auch schon zum Großteil oder vollständig abgebrannt war.

3.3 Versuchsergebnisse

3.3.1 Sprinkler mit Niederdruck

Die Sprinklerauslösung in der Niederdruck-Variante, das heißt, angeschlossen am Hausanschluss, zeigte allgemein sehr wenig Einfluss auf die Rauchsicht und den Brandverlauf. Wie beabsichtigt wurde der Brandherd durch den in der Raummitte positionierten Sprühkegel kaum erreicht, was für einen nahezu ungestörten Abbrand sorgte. In Abbildung 6 ist der Versuchsverlauf schrittweise dargestellt. Von der Zündung (Abbildung 6a) bis zum Erreichen der Auslösetemperatur am Sprinkler (68°C) und damit dem Platzen des Glasfässchens (Abbildung 6c) brauchte es etwa 55 Sekunden. Kurz vorher hatte sich die Rauchsicht jedoch noch nicht vollends stabilisiert (Abbildung 6b). In den folgenden Abbildung 6d-f erkennt man das Hindurchtreten des Sprühkegels durch die Rauchsicht, jedoch bleibt die Rauchgrenzsicht horizontal nahezu planar und tritt mit fortschreitendem Brand weiter in Richtung Boden. Eine Wechselwirkung der großen, trägen Tropfen niedriger Geschwindigkeit (Impuls) mit der Rauchsicht sowie eine Abnahme der Rauchdichte war visuell nicht zu beobachten. Nach Ausbrand der Jacken ($t > 10$ min) lichtete sich der Rauch schließlich von alleine. Über den gesamten Versuch hinweg blieb in Bodennähe eine ausreichend große, etwa zwei Meter hohe, rauchfreie Schicht erhalten, dies jedoch ohne Zutun der geringen Tropfenmenge aus dem Niederdruck-Sprinkler.

Betrachtet man die gemessenen Temperaturverläufe in Abbildung 7, erkennt man anfangs den raschen Anstieg der Temperaturen in Brandnähe bis zu einem Maximum, das die Sprinklerauslösung ($t = 55$ s) kennzeichnet. Die Verläufe sind gut erkennbar nach der Höhe über dem Boden gestaffelt, für die Brandquelle mit der Höhe und damit wachsender Entfernung von dieser abnehmend, für die beiden entfernten Messachsen

mit der Höhe über dem Boden zunehmend, da sich die heißen Brandgase an der Decke sammeln, während in Bodennähe weiterhin fast Raumtemperaturen herrschen. In Brandnähe⁴ wurde eine maximale Temperatur von etwa 900 °C und in der heißen Rauchschiicht abseits des Brandherdes zwischen 150 und 180 °C gemessen.

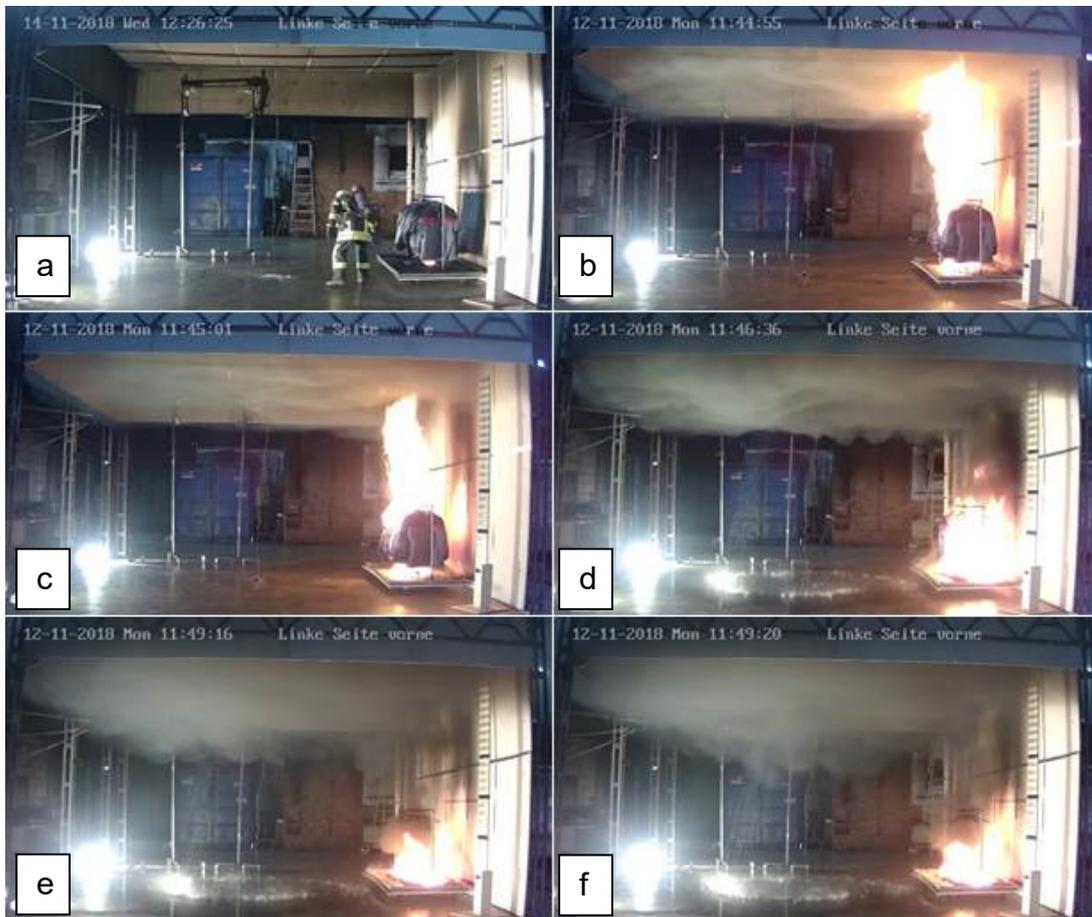


Abbildung 6: Versuchsverlauf für Sprinkler mit Niederdruck (Zeiten: a-0s, b-50s, c-55s, d bis f-150 bis 310s)

Mit der Sprinklerauslösung nahmen alle Temperaturen stetig ab, mit Ausnahme der Temperaturen an der Rauchgrenzschicht in der Raumecke (Abbildung 7, siehe „Raumecke T5“), die erst weiter anstiegen und dann deutlich verzögert, vermutlich infolge der globalen Abkühlung der nachkommenden Rauchgase, abnahmen. Zudem ist die Temperaturabnahme direkt an der Brandquelle (Abbildung 7, siehe „Brandquelle T8“) mehr durch den fortgeschrittenen Abbrand der Jacken als durch die Abkühlung der Rauchgase zu erklären, denn die maximale Wärmefreisetzung erfolgte bereits kurz vor der Sprinklerauslösung (deutlich erkennbar für „Brandquelle T7“) und die anschließende Temperaturabnahme verlief etwas flacher als für die darüber liegenden

⁴ Aufgrund von Flackern kann man hier nicht wirklich von Flammentemperatur sprechen.

Messstellen. Die stetige Temperaturabnahme erfolgte hier synchron mit der stetigen Massenabnahme bis knapp über 50 % Massenabbrand⁵ (Abbildung 7, unten rechts). Am Versuchsende (15-20 min) lagen alle Temperaturen ungefähr zwischen 20 und 30 °C.

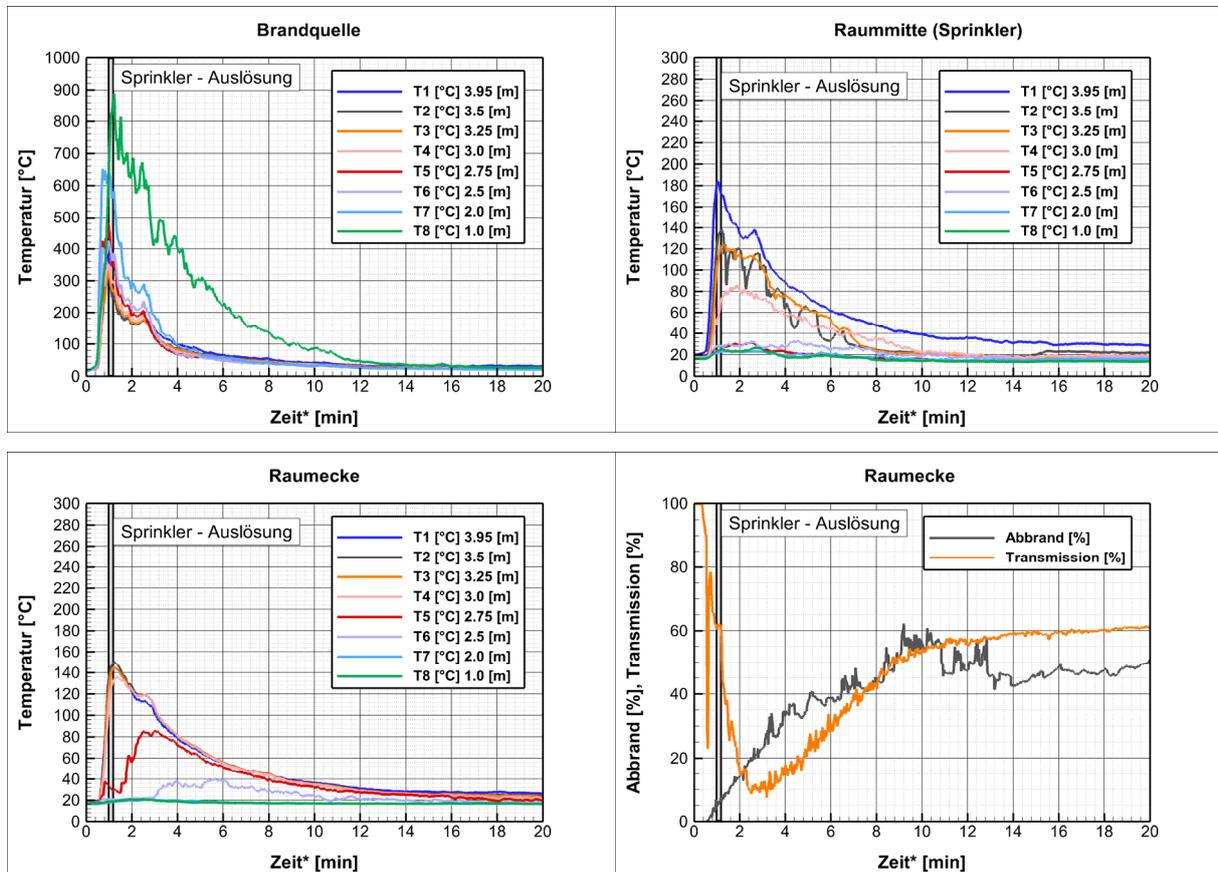


Abbildung 7: Messergebnisse für Sprinkler mit Niederdruck

Die Rauchdichtemessung (Abbildung 7, unten rechts) zeigt eine stetige Abnahme der optischen Transmission über die Sprinklerauslösung hinaus. Erst ab etwa drei Minuten nach Zündung lichtete sich der Rauch langsam, während auch die „Brandtemperatur“ (Abbildung 7, siehe „Brandquelle T8“) langsam abnahm. Ähnlich würde vermutlich auch eine Extinktionsmessung ohne Sprinkler aussehen, der Einfluss der Auslösung ist hier sehr gering.

3.3.2 Standard-Sprinkler

Im Versuch mit dem Standard-Sprinkler mit höherem Ausgangsdruck (siehe Tabelle 1) ließ man der Rauchsicht etwas mehr Zeit (90 s), um sich zu stabilisieren. Dadurch ist diese in Abbildung 8b etwas dichter und ausgeprägter als in Abbildung 6b. Die

⁵ Der „negative“ Massenabbrand ab 10 min lässt auf mitgewogenes Löschwasser in der Auffangwanne schließen.

Sprinklerauslösung erfolgte erst bei Erreichen einer stabilen Rauchsicht, in Abbildung 9 (unten rechts) erkennbar am Minimum der Transmissionskurve.



Abbildung 8: Versuchsverlauf für Standard-Sprinkler (Zeiten: a-0s, b-90s, c-95s, d bis f-97 bis 102s, g-107s, h/i-116 bis 130s, j/k-150 bis 350s, l-430s)

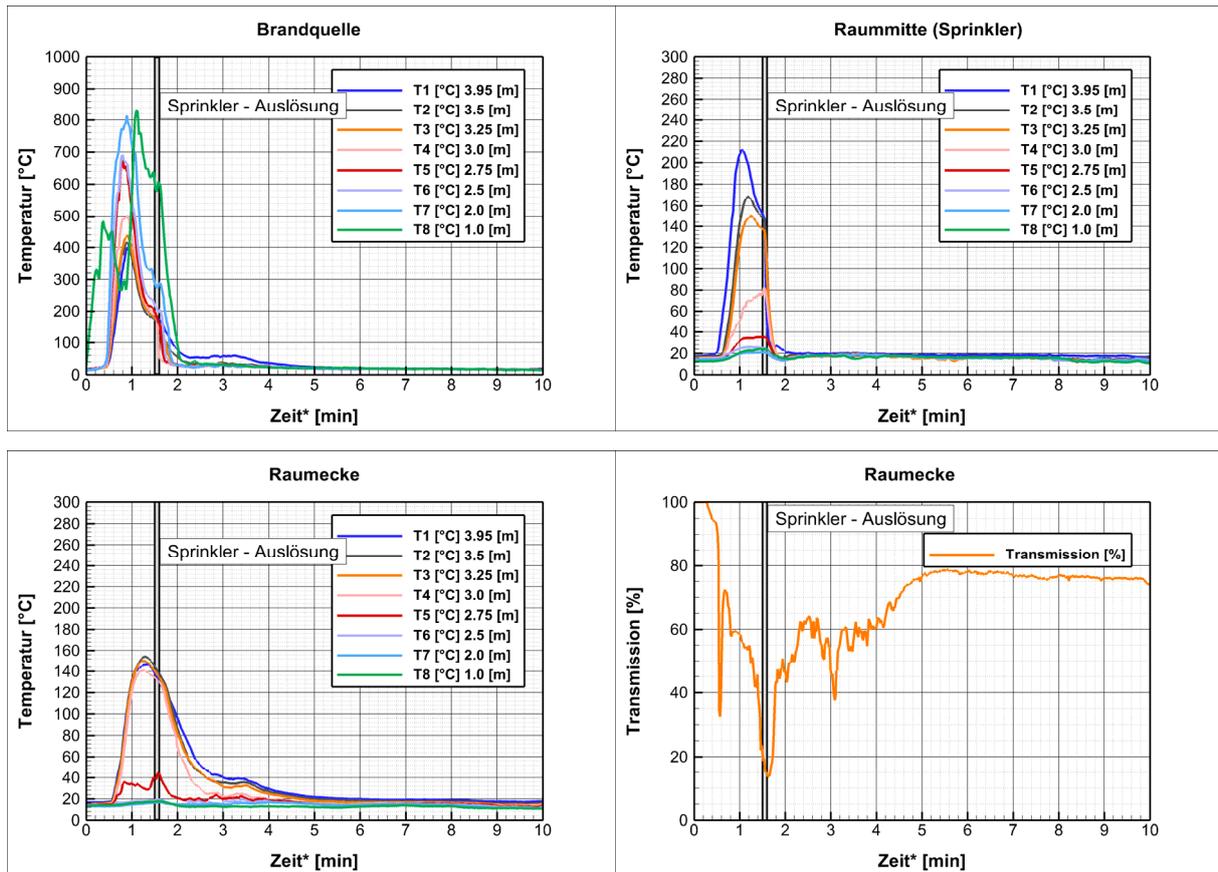


Abbildung 9: Messergebnisse für Standard-Sprinkler

Mit Sprinklerauslösung (Abbildung 8c, $t = 95$ s) löste sich die planare Rauchgrenzschicht allmählich auf. Unter einem großen Spraywinkel von $80-110^\circ$ (Tabelle 1) und damit einem großen Wirkungsbereich wurden viele kleine Tropfen mit einer hohen Geschwindigkeit (Impuls) in der Rauchschicht verteilt. Durch diese hohe spezifische Tropfenbeladung wurde das Rauchgas großflächig „ausgewaschen“ (Rauchgaswäsche) und die klar abgetrennte Rauchschicht damit zerstört (siehe Abbildung 8d-f). Infolge dessen verrauchte allmählich auch der restliche Raum gleichmäßig bis zum Boden (Abbildung 8g-k). Schließlich (Abbildung 8l, $t = 430$ s) war der gesamte Raum, also auch um die Brandquelle herum, so stark verrauchte, dass die Sichtbedingungen für eine selbstständige Personenflucht aus dem Brandraum über die Flucht- und Rettungswege nicht mehr gegeben waren.

Der Sprühkegel war in diesem Versuch so weit aufgespannt, dass die deutlich feineren Wassertropfen (siehe Tabelle 1) sogar den Brandherd erreichten. Dies führte zu einer partiellen Ablöschung der Arbeitsjacken und damit zu einer signifikanten Beeinflussung des Brandverlaufes, ebenfalls erkennbar in den gemessenen Temperaturverläufen. Die Temperatur direkt an der Brandquelle (Abbildung 9, siehe

„Brandquelle T8“) reagierte wie die anderen Verläufe schlagartig auf die Sprinklerauslösung mit einer Abnahme bis fast auf Raumtemperatur. Da die Jacken zu dieser Zeit, etwa 2 min nach Zündung, jedoch noch eine leicht flammende Verbrennung aufwiesen, wird das Wasser sicherlich auch die Thermoelemente in Brandnähe benetzt haben.

Die maximal gemessenen Temperaturen betragen etwa 800 °C in Brandnähe und 150 bis 210 °C in der heißen Rauchschiicht abseits des Brandherdes in Deckennähe. Abbildung 9 zeigt den Zeitpunkt der Sprinklerauslösung einige Sekunden nach Auftreten der Maximaltemperaturen. Die Temperaturabnahme kurz vor der Sprinklerauslösung lässt sich mit der Abnahme der Brandintensität über die Zeit erklären. Nach Sprinklerauslösung sind dieser Effekt und die Kühlung durch das Löschwasser überlagert und die Temperaturabnahme verläuft steiler. Auf der Messachse in der Raumecke sank die Temperatur wiederum etwas träger. Das Versuchsende wurde aufgrund des partiellen Abbrandes schon nach etwa zehn Minuten erreicht.

Der Massenabbrand konnte für diesen Versuch nicht zuverlässig bestimmt werden, da das Löschwasser die Wägung des Prüfkörpers zu stark beeinflusste.

Der Verlauf der Rauchdichte (Abbildung 9, unten rechts) wies diesmal einen deutlichen Effekt durch den Sprinkler auf, denn nach einer nahezu stetigen Abnahme der Transmission folgte auf die Sprinklerauslösung wieder eine Zunahme, also ein Lichten der Rauchschiicht. Man muss aber beachten, dass sich die Messstrecke unterhalb der Decke befindet, also keine Aussage über den restlichen Brandraum tätigt. Dies ist kohärent mit der Umverteilung des Brandrauches zu einer gleichmäßigen Verrauchung im Raum (siehe Abbildung 8g-k).

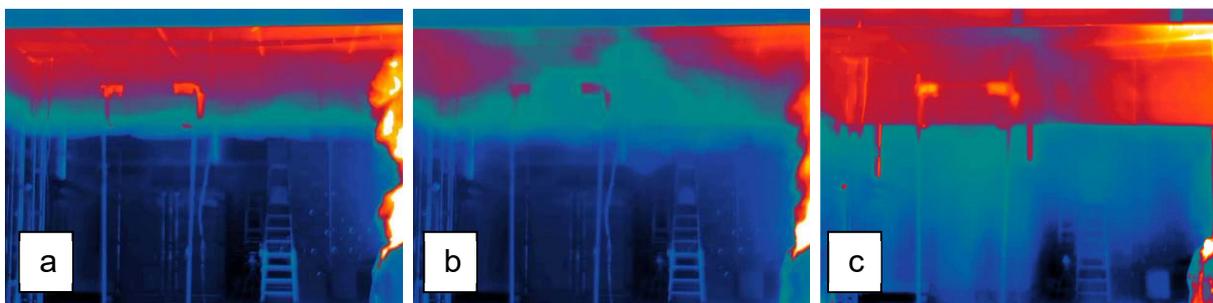


Abbildung 10: Wärmebildaufnahmen für Standard-Sprinkler (a-stabilisierte Rauchschiicht ohne Sprinkler, b-Sprinkler nach 76s, c-Sprinkler nach 106s)

In Abbildung 10 sind Wärmebildaufnahmen der Rauchsicht vor (Abbildung 10a) und 76 s (Abbildung 10b) beziehungsweise 106 s (Abbildung 10c) nach Sprinklerauslösung zu sehen. Man erkennt die kegelförmige Abkühlung in der Rauchsicht durch das Wasserspray, woraus man auch den vorhandenen Spraywinkel ableiten kann (siehe Tabelle 1). Aber auch die Erwärmung der Tröpfchen infolge der Rauchgaswäsche ist sichtbar, da das Sprühbild nur ein bis zwei Meter unterhalb der Decke zu erkennen ist (Abbildung 10b). Nach einiger Zeit haben sich die Temperaturen im Raum angeglichen und zu sehen ist nur noch die Wärmeabstrahlung durch die Decke und Rauchsicht (Abbildung 10c). Hier sieht man zudem die Kühlwirkung des Sprinklers in Richtung der Decke, wenn auch nur in unmittelbarer Nähe zum Sprinklerkopf.

3.3.3 Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage

Nach 90 Sekunden hatte sich eine stabile Rauchsicht ausgebildet und die Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN) wurde aktiviert. Aufgrund des hohen Austrittsimpulses des Wassernebels wurde daraufhin die Rauchsicht im direkten Wirkungsbereich unterhalb der HDWN-Düse durchbrochen und eine gewisse Menge an Rauchgas nach unten „gedrückt“, gut zu erkennen in den Abbildung 11c-g. Am Boden wich dieses zu den Seiten hin aus und wurde durch die Brandthermik auf der einen und durch den statischen Auftrieb auf der anderen Seite nach oben in Richtung noch stabile Rauchsicht rezirkuliert (siehe Abbildung 11h), wobei die Wirkung der Brandthermik dominierte. Ein Gemisch aus Rauchgas, Frischluft und Wassernebel (viele kleinste Tröpfchen hohen Impulses) verdünnte somit nach und nach die abgetrennte Rauchgassicht, was letztendlich zu deren Zerstörung führte.

Durch das Ansaugen der heißen Rauchgase hin zum Brandherd wurde die flammende Verbrennung kurzzeitig gefördert (Abbildung 11i). Mit der Zeit wurde die Flamme jedoch wieder kleiner, da aufgrund der starken Verrauchung weniger Sauerstoff angesaugt wurde, was die Verbrennung letztlich hemmte (Abbildung 11j-k).

Schließlich war der gesamte Brandraum verraucht (Abbildung 11l), wobei der Spraywinkel sowie die Wirbel aus der Rezirkulation schematisch erkennbar blieben und die Verteilung besonders in der vom Brand abgewandten Richtung ungleichmäßig ausfiel. Eine selbstständige Personenflucht über die Flucht- und Rettungswege wäre hier nach Auslösung der Löschanlage nicht mehr möglich.



Abbildung 11: Versuchsverlauf für HDWN-Löschanlage (Zeiten: a-0s, b-90s, c-95s, d bis h-96 bis 98s, i-101s, j-115s, k/l-160 bis 291s)

In Abbildung 12 sind die Temperaturverläufe aus dem Versuch mit der HDWN aufgetragen. Diese waren bis zur Auslösung der Löschanlage ähnlich denen aus dem Standard-Sprinklerversuch (siehe Abschnitt 3.3.2). Nach Erreichen der Maximaltemperatur folgte entsprechend der Brandverlaufskurve wiederum eine Abnahme. Die Unterschiede bei den absoluten Temperaturwerten beruhen hier vermutlich auf der stochastischen Natur der Brandereignisse (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 12).

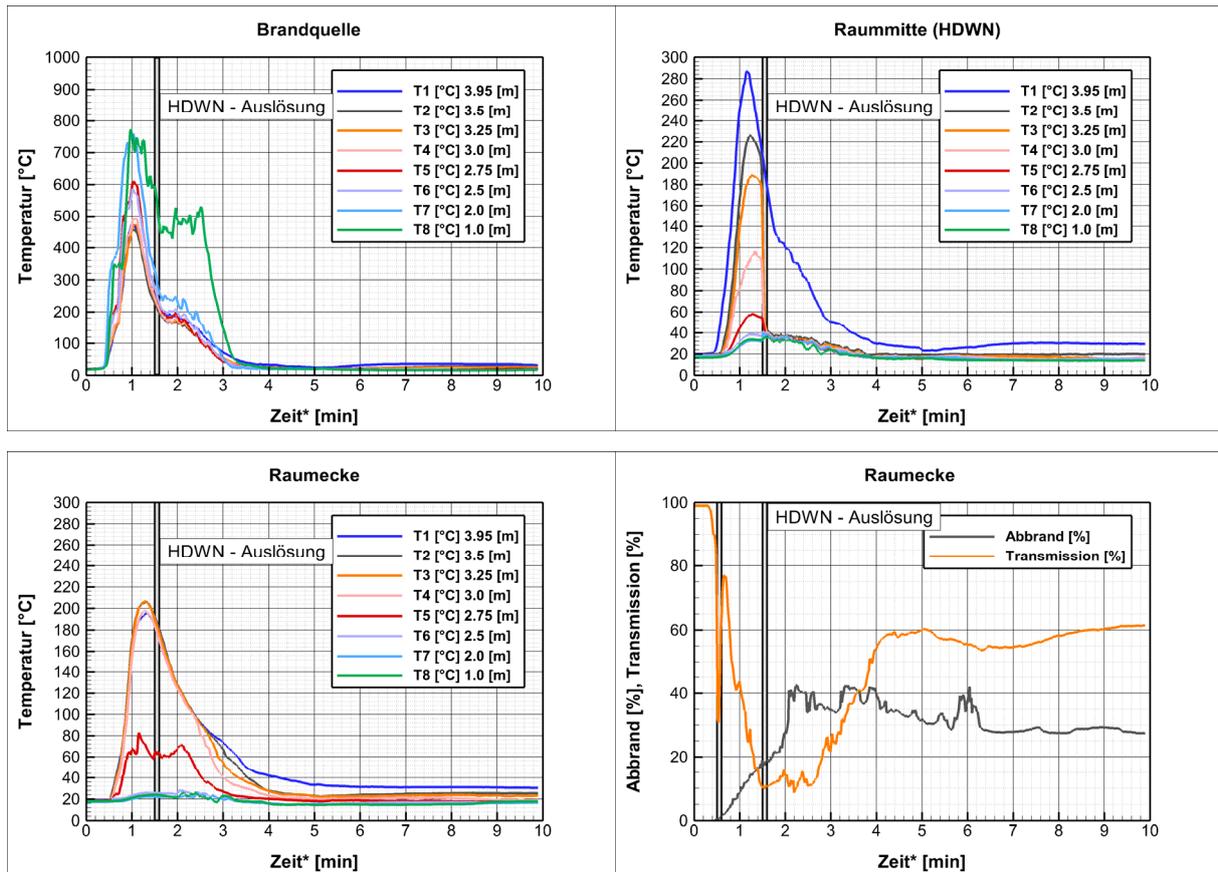


Abbildung 12: Messergebnisse für Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN)

Die Abkühlung infolge der HDWN-Auslösung unterscheidet sich etwas für die drei Temperatur-Messachsen. Über der Brandquelle nahmen alle Messwerte stetig ab, bis auf den Wert direkt über dem Brandherd (Abbildung 12, siehe „Brandquelle T8“), der noch für etwa eine Minute, abgesehen von kleinen Schwankungen, annähernd konstant blieb. Da dieser Effekt mit dem des stetigen Abbrandes überlagert war, kann man dies als eine kurzzeitige Brandförderung interpretieren. Die stimmte auch gut mit der visuellen Beobachtung überein (siehe Abbildung 11i). Danach nahm die Temperatur jedoch schlagartig ab und glich sich den anderen Messwerten an.

In der Raummitte gingen alle Temperaturen schlagartig herunter, nur der Wert direkt unterhalb der Raumdecke sank relativ träge (Abbildung 12, oben rechts). Das liegt vermutlich daran, dass das entsprechende Thermoelement außerhalb des Sprühkegels lag und daher nur durch die globale Abkühlung der nachkommenden Rauchgase beeinflusst wurde.

Die durch die HDWN-Anlage hervorgerufene Rauchgasrezirkulation bewirkte eine langsame Zerstörung der Rauchgasschicht. Daher reagierten die Thermoelemente in der Raumecke entfernt von der Brandquelle relativ träge auf die globale Abkühlung und die Temperaturverläufe nach Auslösen der HDWN-Anlage sind ähnlich denen im Versuch mit dem Standard-Sprinklersystem (siehe Abbildung 9, unten links).

Obwohl der Sprühkegel die Auffangwanne des Prüfkörpers halbwegs traf, wurde die Messung des Massenabbrandes aufgrund der geringen Durchflussmenge nur geringfügig durch den Wassernebel beeinflusst. Nach zwei Minuten wurde so ein Abbrand von etwa 40 % beobachtet. Das ist etwas weniger als im Versuch mit dem Niederdruck-Sprinkler (siehe Abbildung 7, unten rechts) und liegt vermutlich an der brandhemmenden Wirkung der Rauchgasrezirkulation durch den verringerten Sauerstoffeintrag hin zum Brandherd (Teilinertisierung).

Die Rauchdichte blieb nach der HDWN-Auslösung, analog zur Temperatur nahe des Brandherdes, für knapp eine Minute annähernd konstant. Danach nahm sie wie bei den anderen Versuchen stetig ab. Vermutlich lässt sich das damit begründen, dass sich die Messstrecke in der Raumecke und damit außerhalb der direkten Rezirkulationswirbel befand, während der aktivierte HDWN-Sprühkegel die nachkommenden Rauchgase nach unten abführte und die betrachtete Region somit in sich kurzzeitig stationär blieb. Durch weder hinzu- noch abgeführte Rauchmengen lässt sich der annähernd konstante Wert der Transmissionsmessung erklären.

Aufgrund des hohen Bewegungsimpulses des Sprühstrahles bleibt die Temperatur der Tröpfchen relativ niedrig, weshalb man diese mit der Wärmebildkamera (vgl. Abbildung 13) noch gut verfolgen kann, einschließlich des Spraywinkels und der zirkulierenden Bewegung. Man sieht auch, dass mit der HDWN-Anlage die Kühlung der obersten Rauchsicht sowie der umliegenden Deckenregion deutlich geringer ausfällt als mit dem Standard-Sprinkler (vgl. Abbildung 10).

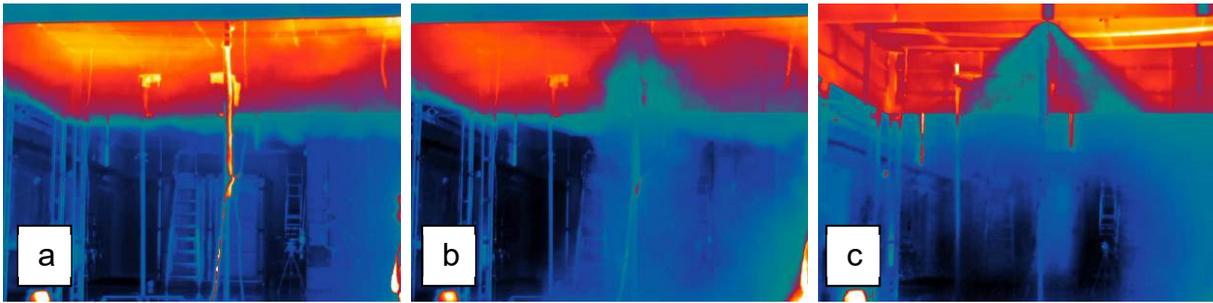


Abbildung 13: Wärmebildaufnahmen für Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (a-stabilisierte Rauchschicht ohne HDWN, b-HDWN/Rezirkulation für $t=99s$, c-HDWN $t=265s$)

3.3.4 Vergleichende Betrachtung

Die wesentlichen Ergebnisse aus den drei Versuchen lassen sich zusammen mit den jeweiligen Spraycharakteristika schematisch wie folgt gegenüberstellen:

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von den Sprühbildern

Löschanlagentyp:	Sprinkler (Niederdruck)	Standard- Sprinkler	Hochdruck- Wassernebel
Wasserdurchfluss:	niedrig	hoch	niedrig
Tropfenimpuls:	niedrig	niedrig	hoch
Spraywinkel:	schmal	weit	schmal
Tropfengröße:	groß	klein	extrem klein
Kühlwirkung und -ort:	kaum, lokal	schlagartig, großflächig	schlagartig, lokal (Teilinertisierung)
Auflösung Rauchschicht:	nein	Auswaschen	Rezirkulation
Verrauchung Bodennähe:	keine	stark	sehr stark

Aus Tabelle 2 sind zum einen bezüglich der Sprinklersystem-Betriebsbedingungen zwei Extrema erkennbar, ein ein minimaler und einmal ein recht hoher Wasserdurchfluss, der das Sprühbild in der Folge stark verändert. Der Sprühkegel bei

Niederdruck fiel sehr schmal und mit großen Tropfen beladen aus; hierdurch minimierten sich die Kühlwirkung sowie der Einflussbereich des Sprühkegels. Im Gegensatz dazu fielen die Tropfengrößen bei höherem Durchfluss deutlich geringer aus und es kam auch horizontal zur großflächigen Verteilung. Dies hatte eine Maximierung der Kühlwirkung zur Folge, die zudem auch global großen Einfluss ausübte. Hier konnte nämlich eine zügige Zerstörung der stabilen Rauchsicht beobachtet werden, während bei geringerem Wasserdurchfluss die Rauchsicht lokal wie global ungestört blieb.

Beide Sprinklersprühbilder wiesen jeweils nur sehr geringe Tropfengeschwindigkeiten auf. Im Versuch mit der HDWN war im Gegensatz dazu der Impuls der viel kleineren Tröpfchen stark erhöht. Auch hier konnte eine Zerstörung der Rauchsicht beobachtet werden, jedoch der zugrundeliegende Effekt war ein anderer: Während der Standardsprinkler die Rauchgase großflächig auswusch und damit niederschlug, was durch viele kleine und langsame Tröpfchen ermöglicht wurde, schob der HDWN-Strahl zunächst eine große Menge Rauchgas vor sich her und zog es danach mit, sodass es im Brandraum über thermische sowie Auftriebseffekte rezirkulierte. Die Rauchgase an sich wurden dabei nur geringfügig ausgewaschen, sondern lediglich umgewälzt. Dadurch fiel die globale Verrauchung im HDWN-Versuch schließlich ausgeprägter aus als im Standard-Sprinkler-Versuch.

3.4 Zusammenfassung (experimentelle Untersuchungen)

Es wurde der Einfluss der Auslösung einer ortsfesten Wasserlöschanlage auf die stabile Rauchsicht in einem Brandraum experimentell untersucht. Dabei konnte für zwei der drei durchgeführten Versuche eine Zerstörung der stabilen Rauchsicht beobachtet werden.

Nach der Sprinklerauslösung mit einer horizontal großflächigen Verteilung von kleinen langsamen Tröpfchen wurde das Rauchgas ausgewaschen und die optische Dichte nahm damit lokal ab. Jedoch wurde die Rauchgrenzsicht in Richtung Boden verschoben, global nahm die Verrauchung damit zu.

Nach der Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN) wurden hingegen die Rauchgase durch den hohen Tropfenimpuls mitgezogen und im Brandraum rezirkuliert. Damit blieb die lokale Rauchdichte ähnlich, jedoch verteilten sich die Rauchgase über den gesamten Brandraum.

Schließlich wurden bei beiden Versuchen die Flucht- und Rettungswege infolge der Auslösung der Löschanlagen stark verraucht und für ungeschützte Personen unpassierbar. Mit einer ungestörten Rauchschiicht, wie sie im Sprinklerversuch mit Niederdruckbedingung beobachtet werden konnte, blieb hingegen eine ausreichend hohe rauchfreie Schicht zur Personenflucht und -rettung erhalten.

Letztlich muss konzeptionell abgewogen werden zwischen der Gewährleistung von rauchfreien Rettungswegen und der effektiven Brandunterdrückung oder -löschung, sodass am Ende die Schutzziele, allem voran der Personenschutz erreicht werden können.

4 Numerische Untersuchungen

4.1 Motivation und Zielsetzung

An die Stelle experimenteller Untersuchungen treten in den letzten Jahren verstärkt dreidimensionale numerische Simulationen, die aufgrund der rasanten Entwicklung bei der Rechnerleistung und der Weiterentwicklung der mathematischen Modelle detaillierte Untersuchungen ermöglichen. Zur Beschreibung der Strömungs- und Transportphänomene stehen mit kommerziellen CFD-Programmen (Computational Fluid Dynamics) leistungsfähige Werkzeuge zur Verfügung, die in weiten Bereichen der Strömungstechnik etabliert sind (Automobiltechnik, Luft- und Raumfahrttechnik etc.). Auch in der Prozesstechnik finden sie mittlerweile verbreitet Einsatz zur Berechnung von Strömungen mit komplexen physikalischen Vorgängen wie Turbulenz, Wärme- und Stofftransport, chemischen Reaktionen und Mehrphasigkeit. Sie erleichtern dem Ingenieur die Analyse komplizierter Zusammenhänge, gewähren Einblick in experimentell nicht zugängliche industrielle Prozesse und ermöglichen eine effiziente Auslegung und Optimierung von Apparaten und Verfahren. Dank des raschen Fortschritts in der Computertechnologie stehen heute Rechnerkapazitäten zur Verfügung, um auch Rechnungen mit komplexen Vorgängen und Geometrien durchzuführen. Experimentelle Untersuchungen sind zwar unbedingt notwendig, um die Ergebnisse der Simulation zu validieren, doch wird aufgrund des enormen Zeitaufwandes beim Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung gerne auf computergestützte Simulationen zurückgegriffen.

Auch für die Klärung sicherheitsrelevanter Fragestellungen im Bereich des Brandschutzes werden in immer stärkerem Umfang numerische Simulationsprogramme

eingesetzt. Diese befassen sich dann mit der Vorhersage der Brand- und Rauchausbreitung in Bauwerken (Fassaden und geschlossene Räume), Verkehrssystemen oder Fahrzeugen. Neben der Strömungssimulation, mit oder ohne detaillierte Auflösung des Brandereignisses, gehören auch brandbedingte Temperaturbelastungen an tragenden Bauteilen sowie beim komplexen Verbrennungsprozess entstehende Schadstoffe mit entsprechender Konzentration im Rauchgas zu den numerischen Aufgaben. Leistungsfähige numerische CFD-Methoden sind in der Lage, sowohl die räumliche Verteilung als auch den zeitlichen Verlauf lokaler dreidimensionaler Größen zu berechnen, benötigen jedoch definierte physikalische sowie numerische Randbedingungen für die jeweilige Problemstellung, welche anhand grundlegender fluiddynamischer Gleichungen zu lösen ist. Eine weitere verbrennungstechnische Eigenschaft, die zusätzlich mathematisch mit Hilfe von Integral- und Differentialgleichungen sowie rein chemisch beschrieben werden soll, ist der komplexe Mischungs- und Verbrennungsprozess, der bei Bränden stattfindende Wärmefreisetzung mit klein- bis großskaliger Turbulenzintensität gekoppelt ist. Die für den Mischungs- und Verbrennungsprozess notwendige Auflösung der Turbulenz (Turbulenzmodellierung) soll mit Skalenunterschieden, die aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Größenordnung der brandinduzierten Strömung (während und nach der Verbrennung) entstehen, verarbeiten können.

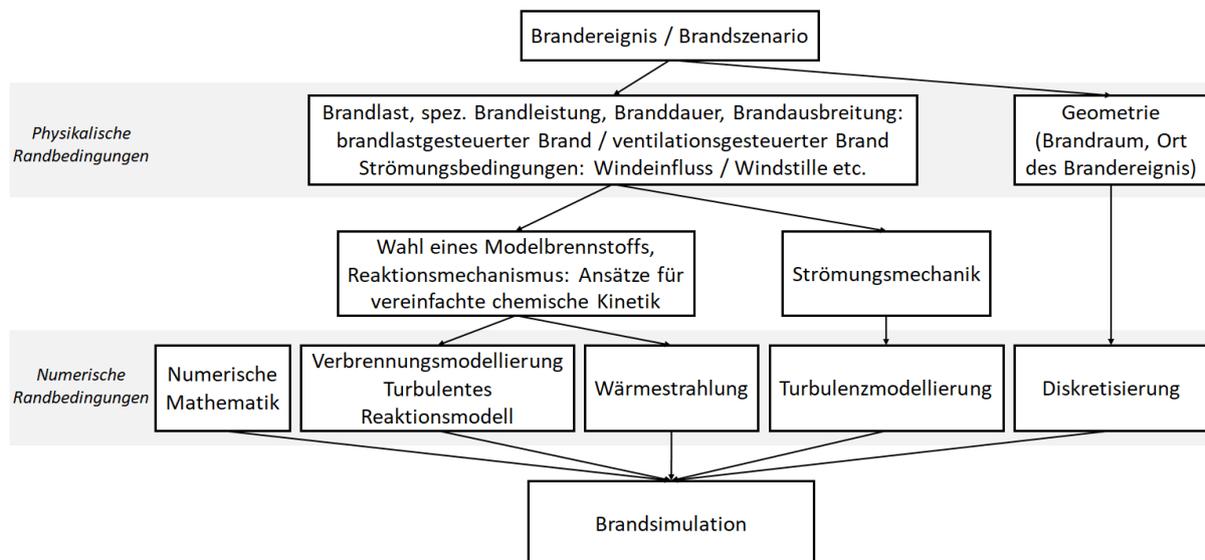


Abbildung 14: Ablaufschema zur Durchführung einer Brandsimulationsrechnung mit Feldmodellen

Die effiziente und genaue Anwendung sowie die Entwicklung numerischer Verfahren zur Simulation von Bränden stellen zusätzlich hohe Anforderungen, die unterschiedliche Forschungsgebiete betreffen. Abbildung 14 stellt die Vorgehensweise bei einer Brandsimulation mit Feldmodellen dar. Ausgehend vom Brandereignis und dessen physikalischen Randbedingungen sind numerische Parameter einzustellen, die miteinander in Wechselwirkung stehen und die Ergebnisse der Brandsimulation stark beeinflussen.

4.2 Stand des Wissens / Literaturrecherche

Es gibt viele numerische Untersuchungen (hauptsächlich mit dem FDS solver) bzgl. der Wechselwirkung zwischen Brand und Sprinkler-Spray, jedoch beschäftigen sich diese hauptsächlich mit der Wechselwirkung zwischen Feuerplume und Spray [10], [11], [12]. Harish und Venkatasubbaiah ([12]) untersuchten mit dem FDS-Solver unter Anwendung der LES Berechnungsmethode die Wechselwirkung zwischen Feuerplume und Wassertropfen numerisch. Dabei wurde der Kühl- bzw. Mitreißeffect mit und ohne Ventilation verglichen. Es wurden nur Andeutungen über die Verrauchung der Rettungswege gemacht. White et al. ([10]) untersuchten mit FireFoam eine turbulente Methan-Flamme und daneben strömende Verbrennungsluft, beladen mit Wassernebeltropfen. Ziel war dabei hauptsächlich die Untersuchung des Löscheffektes auf die Flamme. Die Löschwirkung unterschiedlich großer Tropfen wurde numerisch auch in [13], [14], [15] und [16] untersucht. Hauptaussage war, dass die Tropfengröße einen großen Einfluss auf die Löschwirkung bzw. Brandunterdrückung hat. Laut [16] verringert sich die Löschzeit mit abnehmender Tröpfchengröße, im Falle einer Wassernebellöschanlage mit sehr feinen Tröpfchen, da sowohl die Kühlung durch den Verdampfungsprozess als auch die Sauerstoffreduktion die dominierenden Mechanismen sind. Bei einem Nebel mit größeren Tröpfchen ist dieser Trend jedoch umgekehrt, da die direkte Abkühlung der Flamme der Hauptunterdrückungsmechanismus ist. Diese Schlussfolgerungen werden auch durch den Vergleich mit numerisch ermittelten Verteilungen der Gastemperatur, der Sauerstoffkonzentration und der Dampfkonzentration nach der Auslösung der Löschanlage und kurz vor Löschen des Brandes bestätigt.

Sowohl mit Versuchen im Großmaßstab als auch mit mathematischen Modellrechnungen wird seit Jahren versucht, das Zusammenwirken von Sprinkler-Systemen und Rauch-Wärme-Abzugsanlagen zu klären [17]. Bekannt ist, dass Zonen-

Modelle [18] die Komplexität der Problemstellung, insbesondere in unmittelbarer Nähe zu den Abzugsöffnungen, nicht detailliert behandeln können [19], [17]. Da sich die Computertechnologie in den letzten Jahren weiterentwickelt hat, stehen heute Rechnerkapazitäten zur Verfügung, um auch komplexe Rechnungen, die die Wechselwirkung zwischen Rauch-Wärme-Abzugsanlagen und Sprinkler-Systemen behandeln, durchzuführen. Die Stabilität der Rauchschiicht und die Auswirkungen auf RWAs wurden selten detailliert numerisch untersucht [20]. Hinkley [21], [22] und Beyler et al. [23] beschäftigten sich mit der Wechselwirkung zwischen Sprinkler und RWA, wobei der Einfluss auf die Aktivierung der ersten Sprinkler im Fokus stand.

Die Auswirkung der Sprinkler-Auslösung auf die Stabilität der Rauchschiicht wurde meistens mit mathematischen 1D-Modellen oder mit FDS-Berechnungen untersucht [20] [24] [25] [26], [27]. In [20] wurde ein mathematisches Modell entwickelt, um die Zerstörung der Rauchschiicht, ein sog. „smoke logging“, im Wirkungsbereich des Sprinklerspays vorherzusagen. Zhang und Chow ([25]) führten eine FDS-Studie durch, die eine lineare Abhängigkeit zwischen Temperaturabnahme und Sprinklerdruck feststellte.

4.3 Validierung der Simulationsmethodik mit Hilfe von Modellexperimenten

4.3.1 „Flow induced by fire in a compartment“ Steckler et al. [28]

Um die in dieser Arbeit angewandte Methodik bzw. die Berechnungsmethoden zu verwenden und die Interaktion zwischen NRA, Sprinkler, Rauchschiicht und Brand numerisch zu untersuchen, ist es notwendig, die Ergebnisse der numerischen Simulation zu validieren. Die Validierung stellt einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der numerischen Simulation und den experimentellen Ergebnissen dar. Dafür wurden hier Messergebnisse einer Studie, durchgeführt und veröffentlicht von Steckler et al. [28] im Jahre 1982, verwendet. In dieser Studie waren insgesamt 55 Großversuche durchgeführt worden, mit dem Ziel, die Brandausbreitung in geschlossenen Räumen bei unterschiedlichen thermischen Leistungen (Brandleistungen) und Ventilationsbedingungen zu untersuchen.

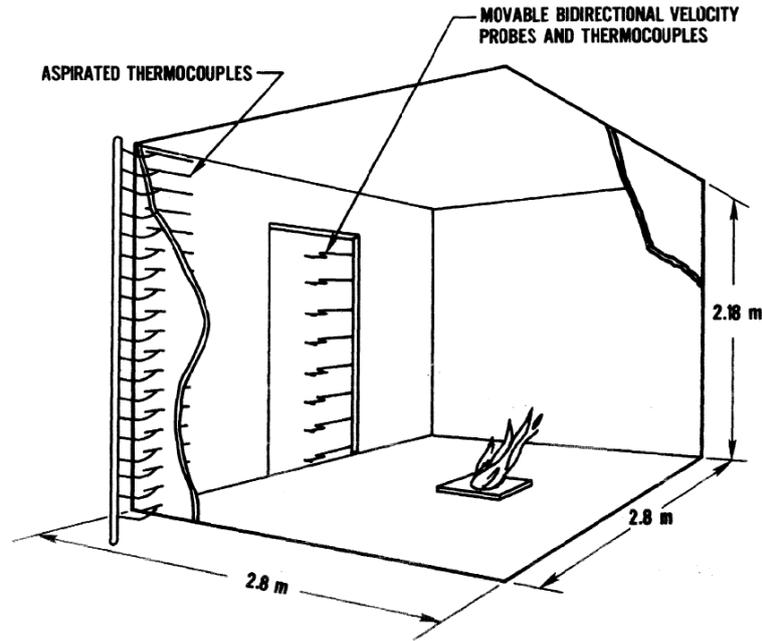


Abbildung 15: Versuchsanordnung . [28]

Der Raum für die Experimente ist in Abbildung 15 dargestellt. Es wurden mehrere Thermoketten im Raum verteilt, um den Temperaturanstieg zu erfassen und Messungen bzgl. der Rauchgeschwindigkeiten im Raum durchgeführt. Die Massenströme durch die Tür- und Fensteröffnung sowie an den Grenzen zum Brand wurden als Funktion der Geometrie der Öffnungen, der Brandfläche und Brandleistung dargestellt. Die Messergebnisse wurden mit den gängigen Plumen Modellen verglichen und es zeigte sich eine gute Übereinstimmung.

Für die Validierung der CFD-Methodik wurden zwei Brandleistungen aus dieser Studie ausgewählt: 62,6 kW und 158 kW.

Zur numerischen Berechnung einer Strömung mit oder ohne Wärmefreisetzung ist es notwendig, die zu untersuchende Geometrie zu diskretisieren. Hierbei wird der kontinuierliche Raum in endlich viele Elemente unterteilt. Ziel der Geometrie-Diskretisierung ist es, ein Rechengitter zu erstellen, mit dessen Hilfe alle notwendigen Details der zu untersuchenden Problemstellung physikalisch sinnvoll und geometrisch angemessen genau aufgelöst werden können. Für die Gittergenerierung wurde das Programm ANSYS Icem CFD verwendet. Das resultierende numerische Rechengitter wurde lokal an der Grenzschicht zum Brandereignis verfeinert. Das gesamte Verfahren ergab ein diskretisiertes numerisches Gebiet mit 2,1 Mio. Tetraeder-elementen

(435507 Knoten). Abbildung 16 zeigt das numerische Rechengebiet, die Position der Brandquelle und die geöffnete Tür.

Die numerischen Simulationen wurden mit dem Strömungslöser Ansys CFX durchgeführt. Als Methode für die Rechnungen wurde die Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS)-Berechnungsmethode gewählt. Diese Methode basiert auf der Mittelung der Erhaltungsgleichungen. Im Falle einer Strömungssimulation bedeutet dies das Lösen der Navier-Stokes-Gleichungen, nachdem die Strömungsgrößen in eine zeitlich gemittelte und eine zeitlich fluktuierende Größe aufgespalten wurden. Die fluktuierende Größe beschreibt dabei die Abweichung vom Mittelwert. Somit werden alle turbulenten Fluktuationen durch diese Mittelung vernachlässigt, welche durch Turbulenzmodelle wieder hinzugefügt werden müssen. Der Gedanke hinter der Verwendung der RANS-Berechnungsmethode ist, turbulente Strömungen mit einem vertretbaren rechnerischen Aufwand numerisch zu lösen. Um die reaktionsbedingte Wärmefreisetzung nachzubilden, wurde das PDF Flamelet Verbrennungsmodell für die Methan-Luft-Reaktion angewandt.

Die geometrischen Abmessungen des Rechengebietes und die physikalischen und numerischen Randbedingungen für die zwei Rechnungen sind:

Geometrie

- Domain Größe 2,8m x 2,8m x 2,18m
- Türöffnung 0,74m x 1,83m
- Brandquelle 0,3m x 0,3m (Boden)
- Brandleistung 62,6kW/158kW
- Brennstoff Methan

Numerische Randbedingungen

- Instationär zeitlich aufgelöste Rechnung (5 Minuten)
- Gasphase: CH₄/O₂/N₂
- Berechnungsmethode RANS (stationär)
- Turbulenzmodell k-ε
- Verbrennungsmodell PDF Flamelet – Methane Air FLL STP
- Strahlungsmodell Discrete Transfer (6 Strahlen, Grau)
- Druck atmosphärisch
- Wandrandbedingung adiabat

- Diskretisierungs-Schema High Resolution
- Transient Schema Second Order Backward Euler

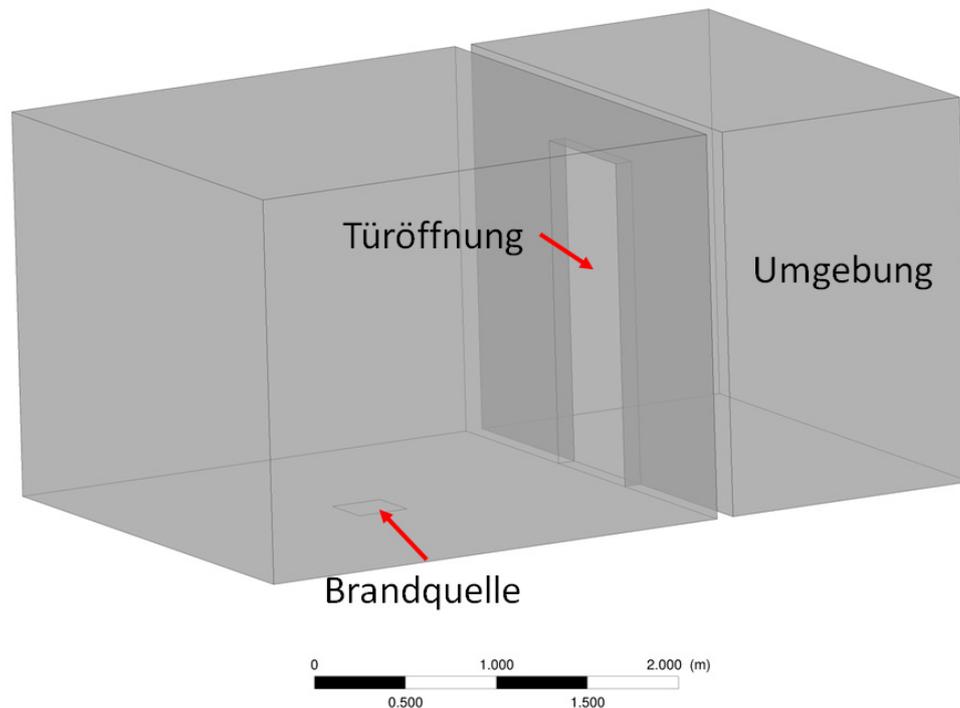


Abbildung 16: numerisches Rechengebiet / Versuchsraum Steckler [28]

4.3.1.1 Ergebnisse 62,7 [kW]

In Abbildung 17 ist, um einen Eindruck für die berechneten Strömungsfelder zu geben, das Geschwindigkeitsfeld in einer Ebene in der Mitte des Rechengebietes dargestellt. Die Farbkodierung zeigt dabei den Betrag der Geschwindigkeit und die schwarzen Pfeile veranschaulichen die Richtung des Vektors. Erkennbar ist die Beschleunigung der Strömung durch die Dichteänderung bei der Verbrennung. Diese resultiert in maximale Werte von ca. 4 [m/s]. Die Abgase werden durch die Türöffnung in die Umgebung geleitet, gleichzeitig strömt im unteren Bereich der Tür frische Verbrennungsluft ein. Dies führt dazu, dass sich die Flamme an die Wand anlegt.

Dieses Anlegen ist auch in Abbildung 18, wo die Temperaturverteilung dargestellt ist, gut zu erkennen. Ersichtlich sind dort die maximalen Temperaturen der Flamme (ca. 1600 [K]) im Bereich der Reaktionszone.

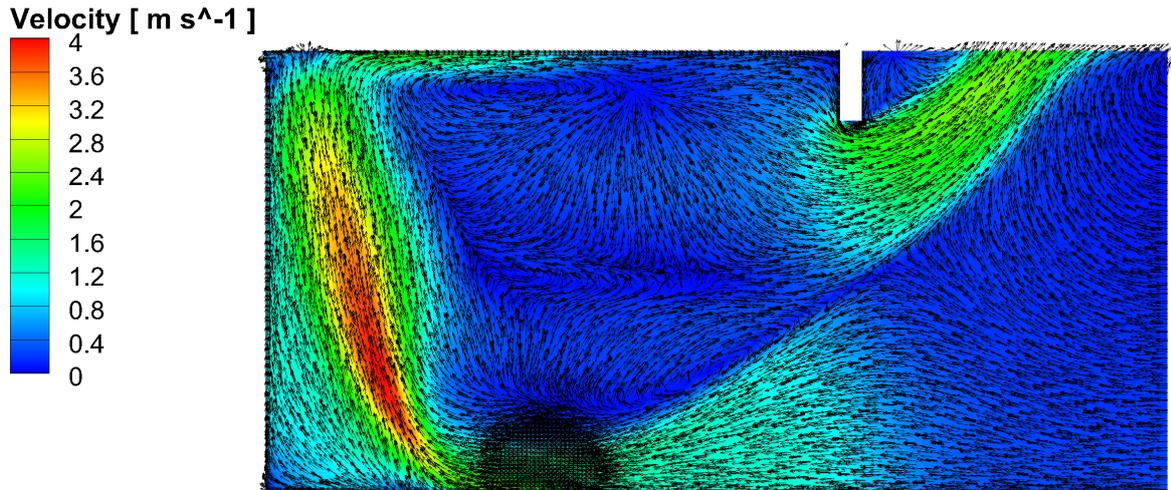


Abbildung 17: Geschwindigkeitsverteilung 62,7 [kW] Steckler [28]

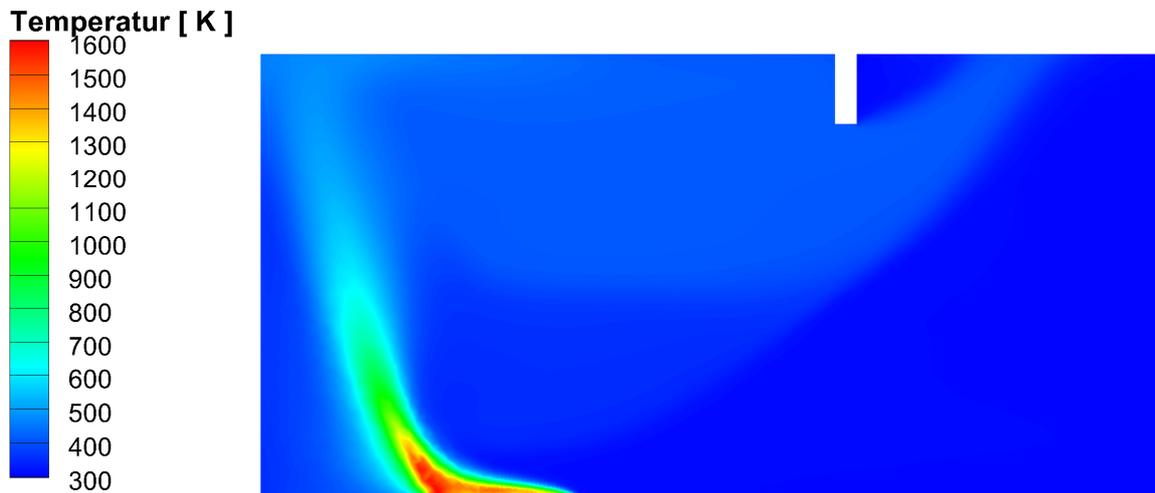


Abbildung 18: Temperaturverteilung 62,7 [kW] Steckler [28]

Abbildung 19 und Abbildung 20 vergleichen die numerisch und experimentell ermittelten Geschwindigkeiten und Temperaturen mittig zur Türöffnung. Die vertikale Verteilung der Geschwindigkeit bzw. die Temperatur im Experiment ist mit Hilfe von Viereck-Symbolen dargestellt, die vertikalen Geschwindigkeits- sowie Temperaturverläufe in der Rechnung mit Linien. Beim Vergleich zwischen Simulation und Experiment fällt zunächst die gute Übereinstimmung auf, wobei die Temperatur in Bereich der austretenden Rauchströmung leicht überschätzt wurde.

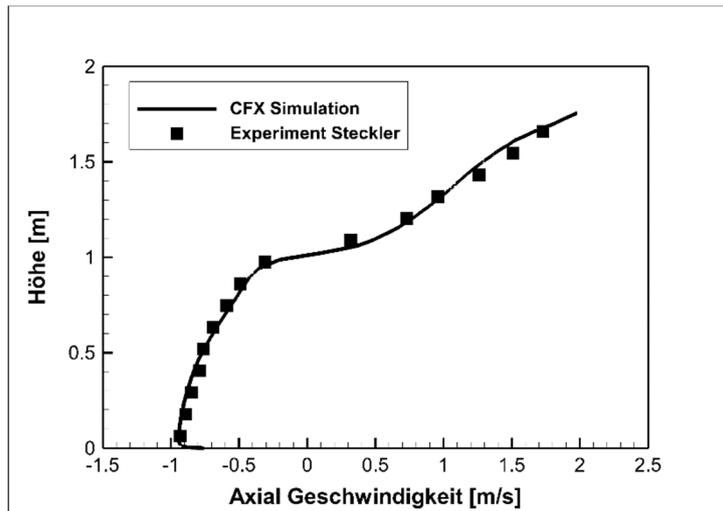


Abbildung 19: Vergleich der berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten (Türöffnung) 62,7 [kW] Steckler [28]

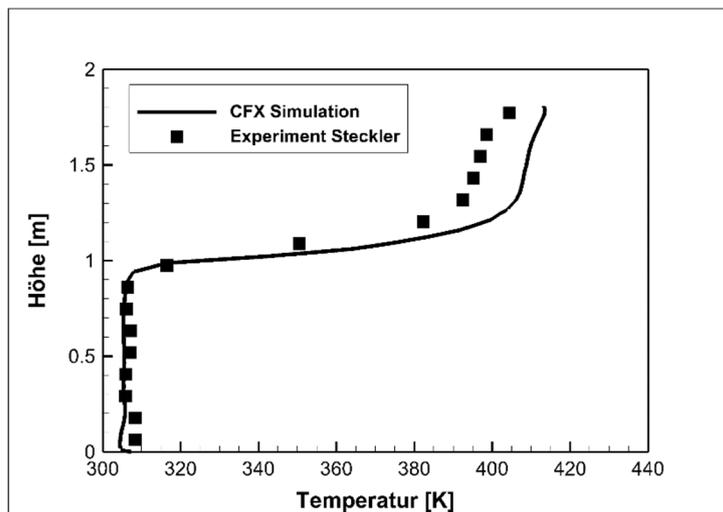


Abbildung 20: Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen (Türöffnung) 62,7 [kW] Steckler [28]

4.3.1.2 Ergebnisse 158 [kW]

Abbildung 21, Abbildung 22 zeigen analog zum 4.3.1.1 die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in einer Ebene in der Mitte des Rechengebietes im Falle einer etwas höheren thermischen Leistung (158 [kW]). Die damit verbundenen höheren Massenströme von Brennstoff und Verbrennungsluft führen zu höheren Geschwindigkeiten bei der Verbrennung.

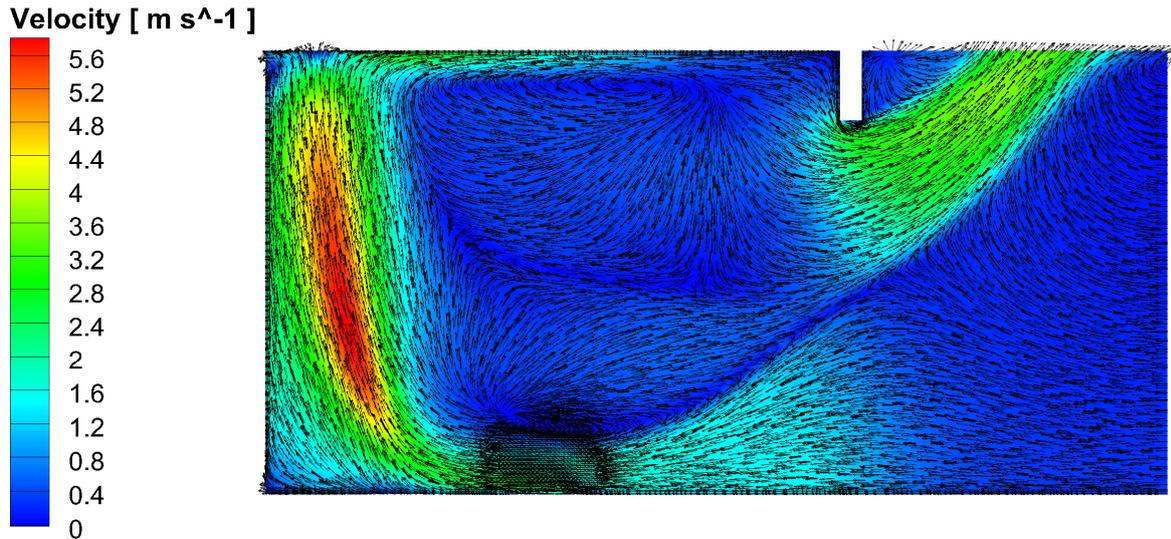


Abbildung 21: Geschwindigkeitsverteilung 158 [kW] Steckler [28]

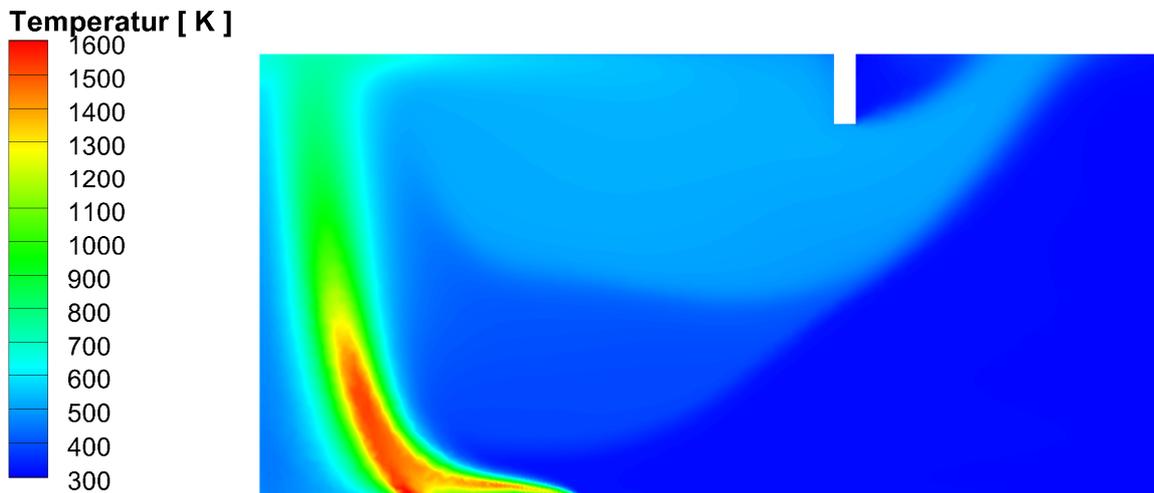


Abbildung 22: Temperaturverteilung 158 [kW] Steckler [28]

Abbildung 23 zeigt die gemessenen (dargestellt mittels Viereck-Symbolen) und berechneten Geschwindigkeiten (dargestellt mittels Linien) in der Mitte der Türöffnung. Die negativen Geschwindigkeiten bis zu -1 [m/s] (unterhalb 1 [m], also untere Türhälfte) weisen darauf hin, dass Frischluft durch das untere Teil der Türöffnung in dem Brandraum einströmt.

Die besonders gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten vertikalen Geschwindigkeits- bzw. Temperaturverläufen in Abbildung 23 und Abbildung 24 bestätigen die Tatsache, dass die hier ausgewählte Simulationsmethodik

in der Lage ist, die Temperaturen und die Geschwindigkeiten während eines Brandes akkurat wiederzugeben.

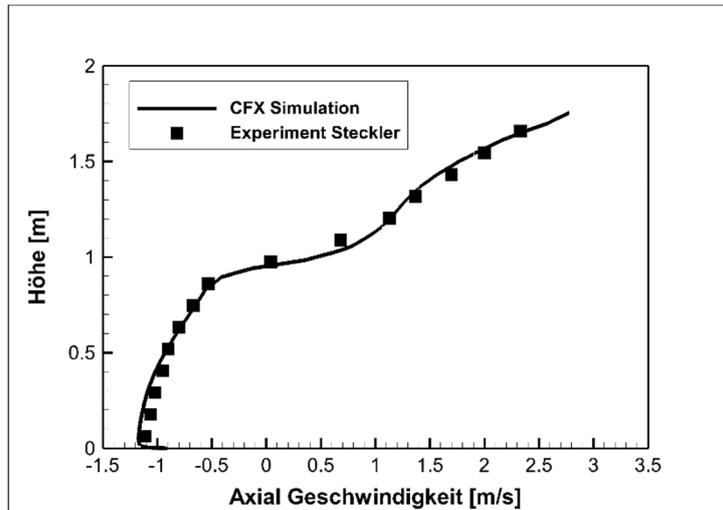


Abbildung 23: Vergleich der berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten (Türöffnung) 158 [kW] Steckler [28]

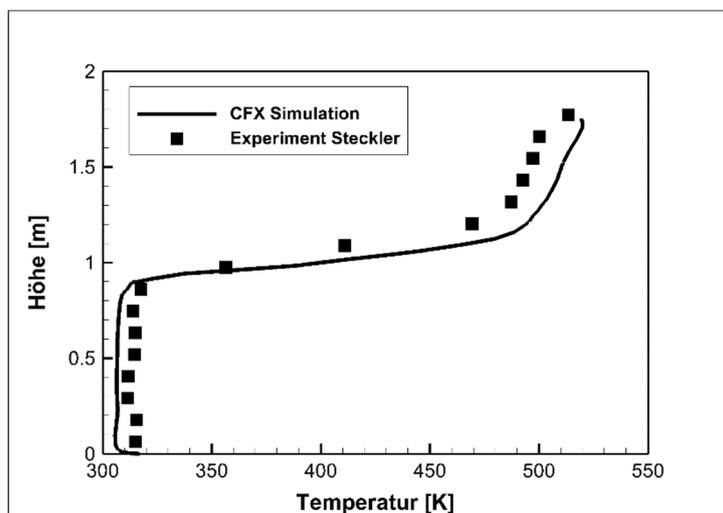


Abbildung 24: Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen (Türöffnung) 158 [kW] Steckler [28]

4.3.2 FDS-Studie von Zhang and Chow [25]

Nachdem die Methodik der numerischen Simulation mit Hilfe von experimentellen Daten validiert ist, können die in dieser Studie verwendeten Einstellungen auch mit einem anderen Simulationsprogramm qualitativ verglichen werden. Für den Vergleich wurde eine Studie gewählt, die eine ähnliche Konfiguration untersucht. Es handelt sich um eine Studie von Zhang und Chow [25], die einen Raum mit zwei Öffnungen, eine Brandquelle und einen Sprinkler behandelt. Hauptfokus dieser Studie ist der Kühleffekt (Kühlwirkung) des Sprinkler-Wasserstrahles auf die stabile Rauchsicht sowie die

von den Wassertropfen ausgeübte Zugkraft (drag force). Beide Phänomene führen zum Verlust der Stabilität der geschichteten Rauchschtichtströmung und zu einer Verrauchung der Rettungswege. Die Interaktion zwischen Brandquelle, Sprinkler und Rauchschticht wurde numerisch mit dem Simulationsprogramm Fire Dynamics Simulator (FDS) [29], basierend auf dem Konzept der Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation), untersucht. Details und geometrische Abmessungen sind in Abbildung 25 dargestellt. Der Raum für die Simulationen hat eine Länge von 12 m, eine Breite von 6 m und eine Höhe von 5 m. Die Zu- und Abfuhr von (Verbrennungs-) Luft (20 °C) erfolgt über zwei Öffnungen für natürliche Entlüftung (natural smoke ventilation), eine in der Nähe der Brandquelle (2 m Breite und 2 m Höhe) und eine Öffnung auf der anderen Seite (2 m Breite und 4 m Höhe).

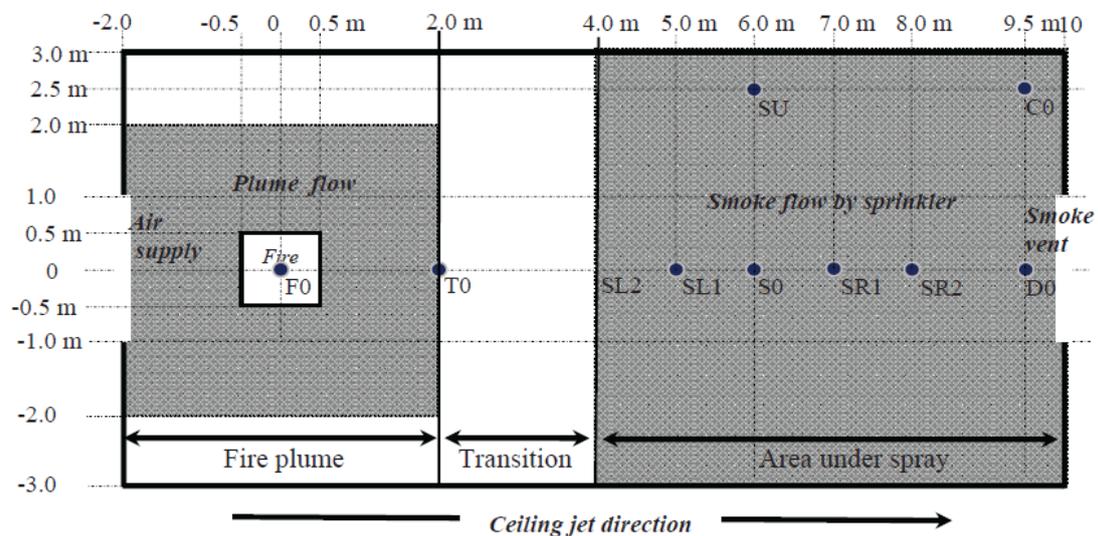


Abbildung 25: Geometrie des untersuchten Domains [25]

Die Brandquelle hat eine viereckige Geometrie mit einer Fläche von 1 m² (1 m x 1 m) auf dem Boden (Position F0). Dort erfolgt das Einströmen von einem gasförmigen Modellbrennstoff mit einer Wärmefreisetzungsrate von 1,0 MW bzw. 1,5 MW. Zwischen Brandquelle und Öffnung (für natürliche Entlüftung) ist der Sprinkler (Position S0) positioniert. Der Abstand zwischen Sprinklerkopf und Decke ist 0,1 m. Es wurde ein Standard-Sprinkler für die Untersuchungen ausgewählt mit einem Nenndurchmesser von 12,7 mm (K-Faktor=80 L/(min bar^{1/2})) und einem Öffnungswinkel zwischen 30° und 80°. Die Sprinkler-Parameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die in rot markierten Einstellungen wurden für die Vergleichsrechnung gewählt.

Der Raum wurde für die numerische Simulation mit ANSYS CFX diskretisiert (s. Abbildung 26). Das resultierende numerische Rechengitter, dargestellt in Abbildung 27, wurde lokal im Bereich der Brandquelle verfeinert, um die Gradienten der reaktiven Strömung genau aufzulösen. Das numerische Gebiet für die Simulationen hat insgesamt ca. 3,7 Mio. Tetraederelemente (ca. 7,5 Knoten).

Tabelle 3: Sprinklerparameter [25]

Sprinkler-Parameter	Wärmefreisetzungsrates= 1/1,5 [MW]				
Druck [bar]	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5
Volumenstrom [L min ⁻¹]	56,57	69,28	80,0	89,44	97,98
Mittlerer Tropfendurchmesser [mm]	1043,22	911,33	828	768,65	723,32
Tropfengeschwindigkeit [m s ⁻¹]	3,95	4,83	5,58	6,24	6,8

Aufgrund deren weiteren Verwendung wurde hier zusätzlich zur RANS Berechnungsmethode die Methode der Detached Eddy Simulation (DES) angewandt. Die DES ist ein Verfahren zur Berechnung von turbulenten Strömungen. Dabei handelt es sich um eine Kombination der gängigen Large-Eddy (LES)- und Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS)-Modelle, wobei je nach Gitterauflösung und Abstand zu den Wänden dynamisch zwischen beiden Modellen gewechselt wird. Die Motivation hierzu liegt im geringeren Rechenaufwand von RANS und in der höheren Genauigkeit von LES. Wänden, das heißt Oberflächen, an denen die Strömungsgeschwindigkeit durch die Haftbedingung null wird, kommt eine besondere Rolle zu, da hier sehr dünne Grenzschichten auftreten, die einen großen Einfluss auf die turbulente Strömung ausüben. Die DES ersetzt den Wandabstand, der als Variable im Spalart-Allmaras-Modell vorkommt, in wandfernen Bereichen durch die größte Weite einer Gitterzelle. Durch diese Formulierung lässt sich in den wandfernen Bereichen ein LES-ähnliches Verhalten der Rechnung erreichen. De facto erhält man so eine RANS-Formulierung in der Grenzschicht an Wänden und eine LES-Formulierung in der freien Strömung,

also das im jeweiligen Bereich am besten geeignete Verfahren (bez. Genauigkeit und Rechenaufwand).

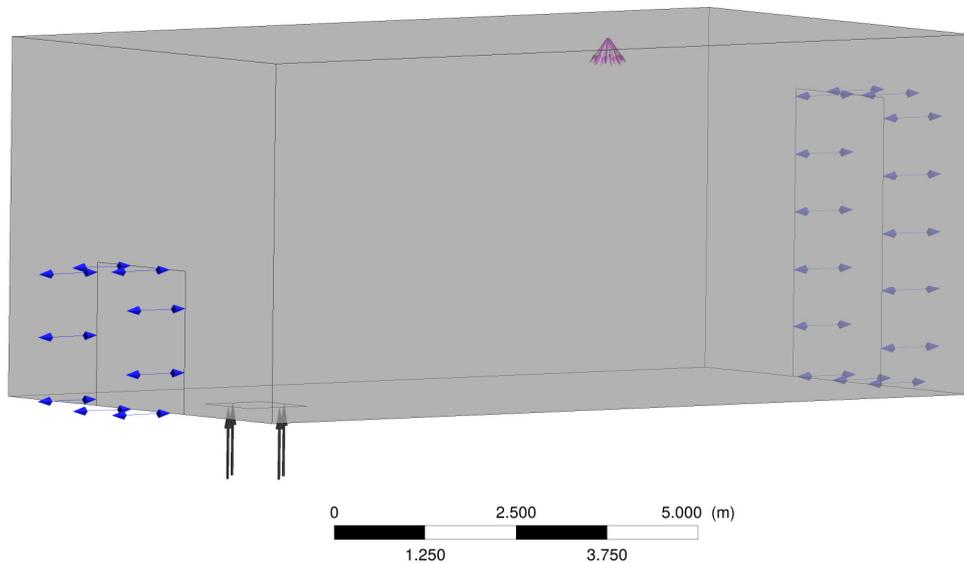


Abbildung 26: Numerische Domain (Rechengebiet)

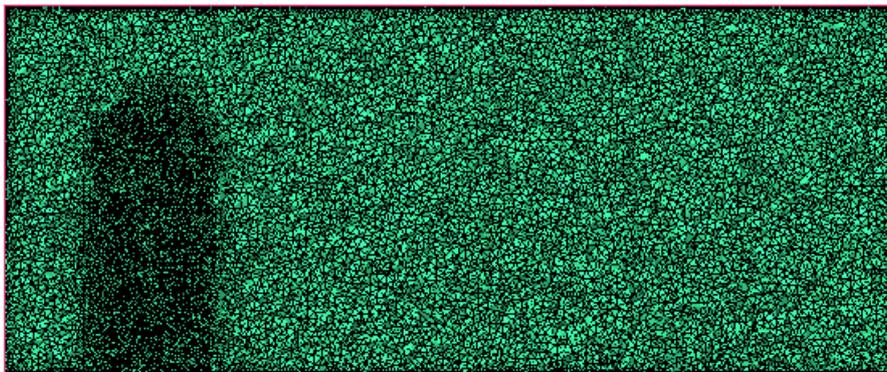


Abbildung 27: Gitterausschnitt

Die wichtigsten physikalischen und numerischen Randbedingungen für die zwei Berechnungsmethoden sind:

RANS - Simulation

- Gasphase: CO/H₂/O₂/N₂
- Flüssigphase: Wassertropfen
- Brandquelle: $Q_{th} = 1$ [MW] (1243,15) / CO

- Sprinkler: $d_{\text{Sprinkler}} = 0,0127 \text{ [m]}$ $u_{\text{Tropfen}} = 5,58 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$
(Halber Sprühkegelwinkel 30°)
- $d_{\text{Tropfen}} = 828 \text{ [mm]}$
- $m = 1,33 \text{ [kg s}^{-1}\text{]}$
- Tropfenzerfall und Koagulation wird nicht berücksichtigt
- Turbulenzmodell: $k-\varepsilon$
- Diskretisierungs-Schema: Upwind
- Wandrandbedingung: adiabatisch, Tropfen haften an der Wand
(Erdbeschleunigung wird berücksichtigt)
- stationär

DES / LES

- Gasphase: $\text{CO}/\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2/\text{N}_2$
- Flüssigphase: Wassertropfen
- Einlass: $Q_{\text{th}} = 1 \text{ [MW]}$ ($1243,15\text{K}$) / CO
- Sprinkler: $d_{\text{Sprinkler}} = 0,0127 \text{ [m]}$ $u_{\text{Tropfen}} = 5,58 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$
(Halber Sprühkegelwinkel 30°)
- $d_{\text{Tropfen}} = 828 \text{ [mm]}$
- $m = 1,33 \text{ [kg s}^{-1}\text{]}$
- Tropfenzerfall und Koagulation wird nicht berücksichtigt
- Turbulenzmodell: Detached Eddy Simulation / LES Smagorinsky
- Diskretisierungs-Schema: Central Difference
- Transient Schema: Second order Backward Euler
- Wandrandbedingung: adiabatisch, Tropfen haften an der Wand
(Erdbeschleunigung wird berücksichtigt)
- instationär $t = 180 \text{ [s]}$ / $\text{Timesteps} = 0,005\text{[s]}$

Ergebnisse

Abbildung 28 und Abbildung 29 veranschaulichen die Ergebnisse der stationären (RANS) Simulation (linke Seite) und vergleichen die mit den Ergebnissen der FDS-Simulation von Zhang und Chow [25] (rechte Seite). Abbildung 28 zeigt die Temperaturverteilung direkt vor Sprinklerauslösung auf einer Ebene, parallel zur Hauptströmungsrichtung in der Mitte der numerischen Domain. Zusätzlich ist die Höhe der stabilen Rauchsicht mittels einer Linie (Isolinie) der Temperatur bei 358 K oder

85°C (Richtlinie: gefährliche Temperatur für Menschen ist zw. 80 und 100°C) sichtbar gemacht. Bei Betrachtung der beiden Simulationen fällt die gute Übereinstimmung bezüglich der Rauchschichtdicke bei beiden Berechnungsmethoden auf. Abbildung 29 zeigt die beiden Temperaturverteilungen nach Sprinklerauslösung. Erkennbar aus den zwei Abbildungen (Abbildung 28 und Abbildung 29) ist die bessere Auflösung im brandnahen Bereich durch die LES-Simulation (rechte Seite). Die RANS-Berechnungsmethode liefert eine etwas „verschmierte“ Darstellung der Ergebnisse und gibt ein erstes, gemitteltetes Ergebnis (gemittelte Werte aller physikalischen Größen) der Änderung des Temperaturfeldes nach Sprinklerauslösung.

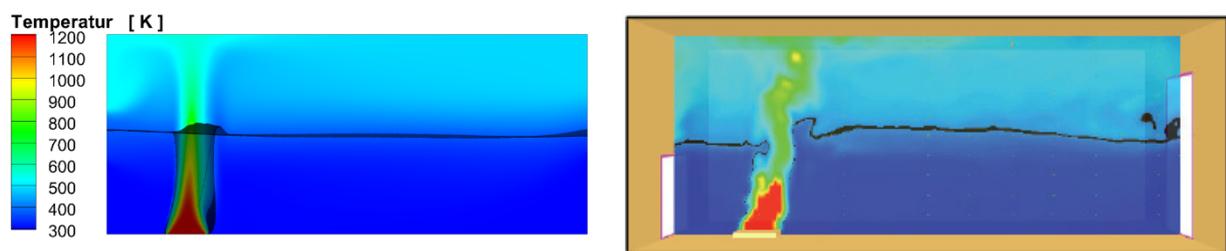


Abbildung 28: RANS: Temperaturverteilung vor der Sprinklerauslösung

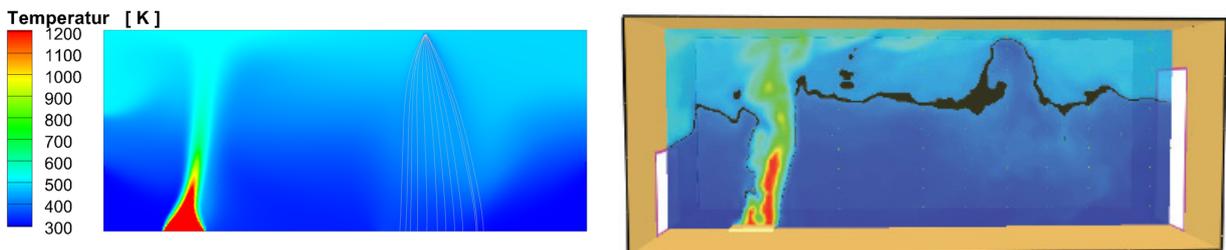


Abbildung 29: RANS: Temperaturverteilung nach der Sprinklerauslösung

In einem nächsten Schritt wurde die Rauchschichtbildung und die nachfolgende Sprinklerauslösung instationär mit der DES-Methode berechnet. Die Abbildungen Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen analog zur RANS-Berechnung die Temperaturverteilung der stabilen Rauchgasschicht und anschließend die Folgen der Sprinkler-Auslösung (Abbildung 31). In beiden Abbildungen ist die Temperaturschichtung des Rauchgases vor und nach der Sprinkler-Auslösung deutlich genauer dargestellt. Die Höhe der Rauchschicht stimmt bei der DES-Methode (ANSYS CFX) und der LES-Methode (FDS) gut überein.

Ersichtlich aus den zwei Abbildungen ist, dass die hier durchgeführte Berechnung (DES) aufgrund der räumliche Auflösung deutlich detaillierte Ergebnisse liefert.

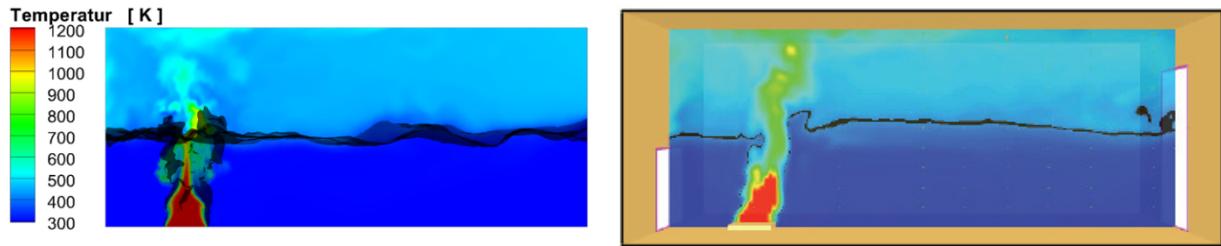


Abbildung 30: DES: Temperaturverteilung vor der Sprinklerauslösung

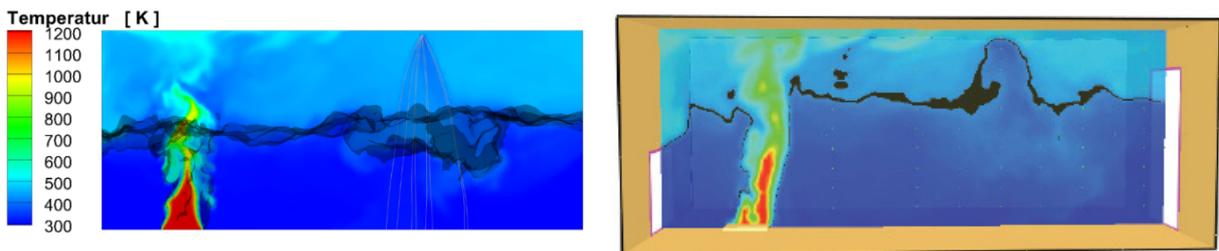


Abbildung 31: DES: Temperaturverteilung nach der Sprinklerauslösung

Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die Rauchverteilung im Raum vor (Abbildung 32) und nach (Abbildung 33) der Sprinkler-Auslösung. Gut zu erkennen ist, dass die Grenzschicht zwischen Rauch und Umgebungsluft bei der DES-Berechnungsmethode deutlich präziser aufgelöst wurde.



Abbildung 32: DES: Rauchverteilung vor der Sprinklerauslösung



Abbildung 33: DES: Rauchverteilung nach der Sprinklerauslösung

5 Numerische Untersuchung zum Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchschrift bei bekanntem Brandverhalten von Jacken/Bekleidung

Nachdem die Ergebnisse und die Methodik der hier eingesetzten numerischen Simulationen validiert worden ist, kann in einen nächsten Schritt die Wechselwirkung zwischen NRA, Sprinkleranlagen, Rauchschrift und Brand mittels numerischer Methoden (Simulationen) untersucht werden. Um diese realitätsnah darzustellen, ist eine repräsentative Geometrie notwendig, in der die zu untersuchenden Lös- bzw. Entlüftungsanlagen normgemäß verteilt und positioniert sind.

In diesem Abschnitt wird die experimentell untersuchte Konfiguration (s. Abschnitt 3) hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen ausgelösten, ortsfesten Wasserlöschanlagen und einer stabilen Rauchschrift numerisch abgebildet.

5.1 Numerisches Setup (numerische und physikalische Randbedingungen)

Um die Wechselwirkung zwischen Sprinkler/HDWN, Rauchschrift und Brand numerisch zu untersuchen ist es notwendig, das Brandszenario und dessen Peripherie, also die gesamte Geometrie des Versuchstands, zu diskretisieren. Hierbei wird der kontinuierliche Raum in endlich viele Elemente unterteilt. Ziel der Geometrie-Diskretisierung ist es, ein Rechengitter zu erstellen, mit dessen Hilfe alle notwendigen Details der zu untersuchenden Problemstellung physikalisch sinnvoll und geometrisch angemessen genau aufgelöst werden können. Für die Gittergenerierung wurde das Programm ANSYS Icem CFD verwendet. Das Rechengebiet ist in Abbildung 34 dargestellt. Erkennbar sind die Details, also die geometrischen Randbedingungen für die Berechnung. Das sind zum einen die Brandquelle (Kleiderständer) und Sprinkler bzw. HDWN und zum anderen die Wand und die Rauchschränke. Ein Teil der Umgebung, jeweils zwei Meter seitlich und oberhalb der Decke, wurde auch für die numerische Berechnung eingeschlossen, um das Ausströmen der heißen Abgase aufzulösen. Das resultierende numerische Rechengitter wurde lokal an der Grenzschicht zum Brandereignis sowie am Übergang zwischen Rauchschrift und Umgebungsluft und im Wirkungsbereich der Sprinkler bzw. HDWN verfeinert, wie in Abbildung 35 erkennbar ist. Das gesamte Verfahren ergibt ein diskretisiertes, numerisches Gebiet mit ca. 53 Millionen Tetraederelementen (8,8 Millionen Knoten).

Für die numerischen Simulationen wurde eine instationäre Berechnungsmethode angewandt, nämlich die Detached-Eddy-Simulation. Wie schon erwähnt (4.3.2), ist die Detached-Eddy-Simulation (DES) ein Verfahren zur Berechnung von turbulenten Strömungen und stellt eine Kombination der gängigen Large-Eddy-Simulation (LES) und Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Modelle dar. Je nach Gitterauflösung und Abstand zu den Wänden wird dynamisch zwischen beiden Modellen gewechselt.

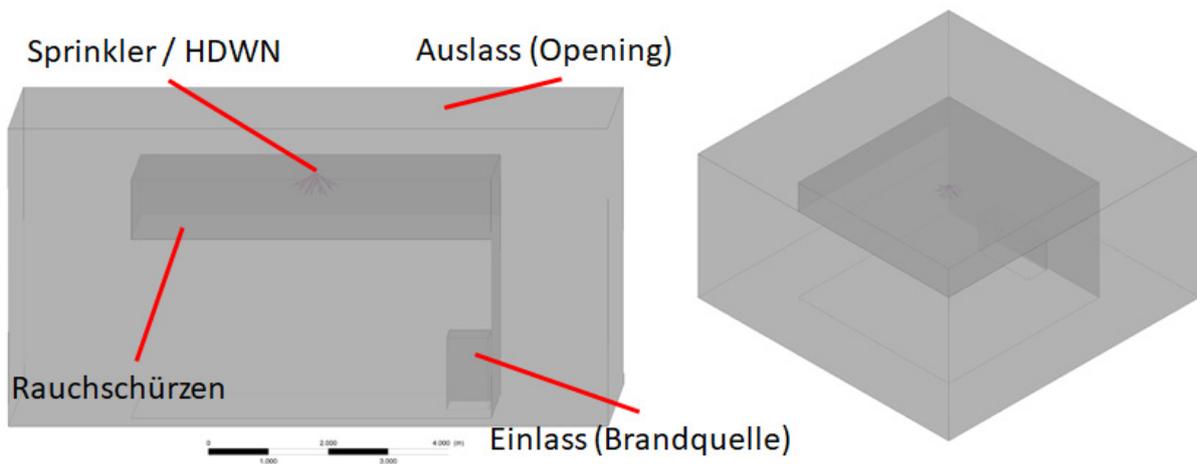


Abbildung 34: numerisches Rechengebiet

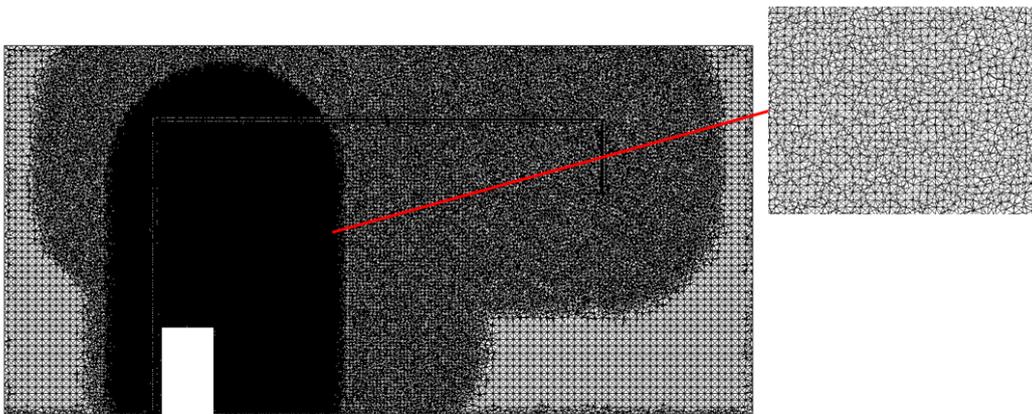


Abbildung 35: numerisches Gitter

Die geometrischen Abmessungen des Rechengebietes und die physikalischen und numerischen Randbedingungen für die Rechnungen sind:

- Rechengebiet Größe: Länge = 6 [m], Breite = 6 [m], Höhe = 4 [m], Rauchschürzen = 1 [m], Umgebung = 2 [m]
- Brandquelle: Länge = 2 [m], Breite = 0,75 [m], Höhe = 1,25 [m]
- Gasphase: $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$
- Flüssigphase: Wassertropfen

- Einlass Brandquelle: $Q_{th}=1$ [MW], Brennstoff: CH₄, 0,019966 [kg/s], 25 [°C]
- Reaktionsmechanismus: 1-Schritt nach Westbrook and Dryer [30]
- Verbrennung: Eddy Dissipation
- Strahlung: P1
- Sprinkler: $d_{Sprinkler}=0,0127$ [m] $u_{Tropfen}=8,82$ [m s⁻¹] (Halber Sprühkegelwinkel 80°) $d_{Tropfen}=610$ [μm], 2.1019 [kg/s], Form: Cone (Full cone)
- HDWN: $d_{Sprinkler}=0.0127$ [m] $u_{Tropfen}=55.8$ [m/s] (Halber Sprühkegelwinkel 45°), $d_{Tropfen}=80$ [μm], $m = 0.1977$ [kg/s], Form: Cone (Hollow cone)
- Tropfenzerfall und Koagulation wird nicht berücksichtigt
- Wandrandbedingung: adiabat, Tropfen haften an der Wand (Erdbeschleunigung wird berücksichtigt)
- Diskretisierungs-Schema: Upwind
- Turbulenzmodell: Detached Eddy Simulation
- Transient Schema: Second Order Backward Euler
- Instationär $t=104,3$ [s] (Rauchausbreitung) / 169 [s] Sprinkler / 126 [s] HDWN
- Rechenzeit: 5 Tage auf 16 CPUs (Rauchschicht) / 15 Tage auf 16 CPUs (Sprinkler) / 30 Tage auf 16 CPUs (HDWN)

Festzuhalten ist, dass die Berechnungszeit für die Rauchausbreitung bis zur Ausbildung einer stabilen Rauchschicht ausreichend ist, da die Stationarität laut Experiment und Rechnung nach 90 s gegeben ist. Das Gleiche gilt auch für die Berechnungszeit der Sprinkler bzw. HDWN-Auslösung. Aufgrund der hohen Austrittsgeschwindigkeit (kurze Reaktionszeit) des HDWN-Strahls ist für die numerische Abbildung der HDWN-Auslösung ein Drittel der Zeit für die Sprinklerberechnung ausreichend.

5.2 Ergebnisse der Simulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der numerischen Berechnungen vorgestellt. Das ist an erster Stelle die Berechnung der instationären Rauchausbreitung bis zur Bildung einer stationären Rauchschicht, und anschließend dazu die nachfolgende Sprinkler- bzw. HDWN-Auslösung. Für die Sprinkler-Auslösung wurde der „Standard-Sprinkler“-Fall aus dem Experiment (s. Abschnitt 3.3.2) gewählt.

stabilen Rauchschrift (Abbildung 36-d). Ähnlich zum Experiment erfolgt dies nach etwa 90s.

Um einen Eindruck für die berechneten Strömungsfelder zu geben, ist in Abbildung 37 das Geschwindigkeitsfeld in einer Ebene in der Mitte des Rechengebiets dargestellt. Die Farbkodierung zeigt dabei den Betrag der Geschwindigkeit. Die Beschleunigung des Gases aufgrund der Dichteänderung bei der Verbrennung wird durch die maximalen Werte der Geschwindigkeit ersichtlich. Die maximale, mittlere Geschwindigkeit beträgt 9,8 [m/s]. Nach Erreichen der Decke wird die heiße Rauchströmung, wie zuvor erwähnt, umgelenkt und entlang der Decke beschleunigt, wie in Abbildung 37 erkennbar ist. Die letzte Beschleunigung der Strömung erfolgt am Ende der Decke, nachdem die Rauchgase auftriebsbedingt entlang des Randes der Rauchschrzen wieder in die Umgebung befördert werden.

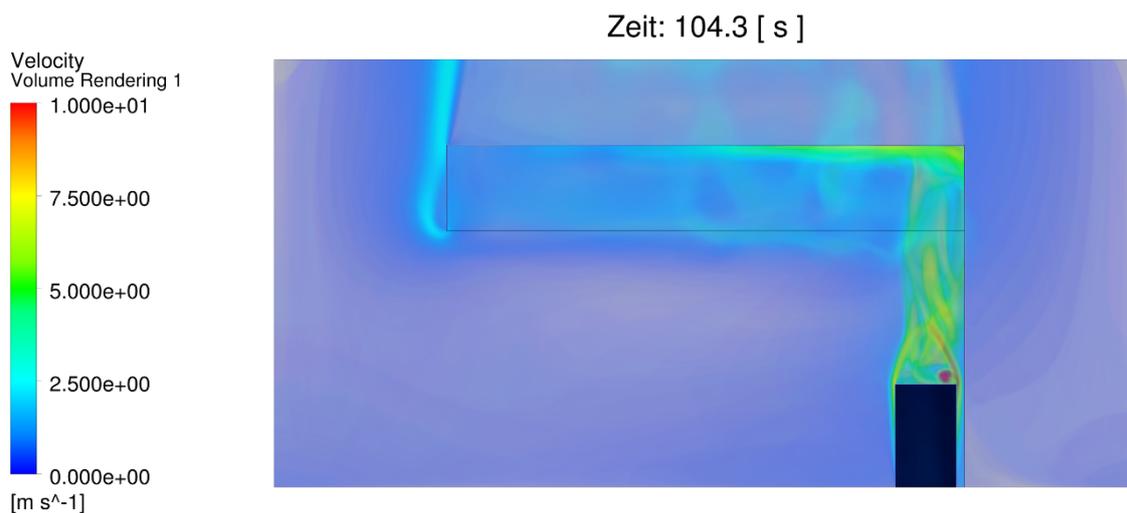


Abbildung 37: Geschwindigkeitsverteilung der stabilen Rauchschrift 104,3 [s]

Die Temperaturverteilung auf dieser Ebene, dargestellt in Abbildung 38, verdeutlicht die Wärmefreisetzung infolge der Verbrennungsreaktion von Methan und Luft. Festzuhalten ist hier, dass in den numerischen Simulationen keine zeitliche Änderung der Wärmeabgabe berücksichtigt wird. Die maximalen Temperaturen (ca. 1700 [K]) treten im Bereich des ausströmenden Methans auf, wo auch die Verbrennungsreaktion aufrechterhalten wird. Direkt oberhalb der Brandquelle, erreicht die heiße Strömung die Decke; hier ist eine weitere, wenn auch mit niedrigeren Temperaturen verbundene Temperaturerhöhung erkennbar. Grund dafür ist das Aufprallen und Abbremsen der heißen Strömung. Unterhalb der Decke, begrenzt durch die Rauchschrzen, ist die

Temperaturschichtung der Rauchschrift erkennbar. Es findet eine klare Abtrennung (Schichttrennung) gegen die Umgebungsluft unterhalb der Rauchschrift statt.

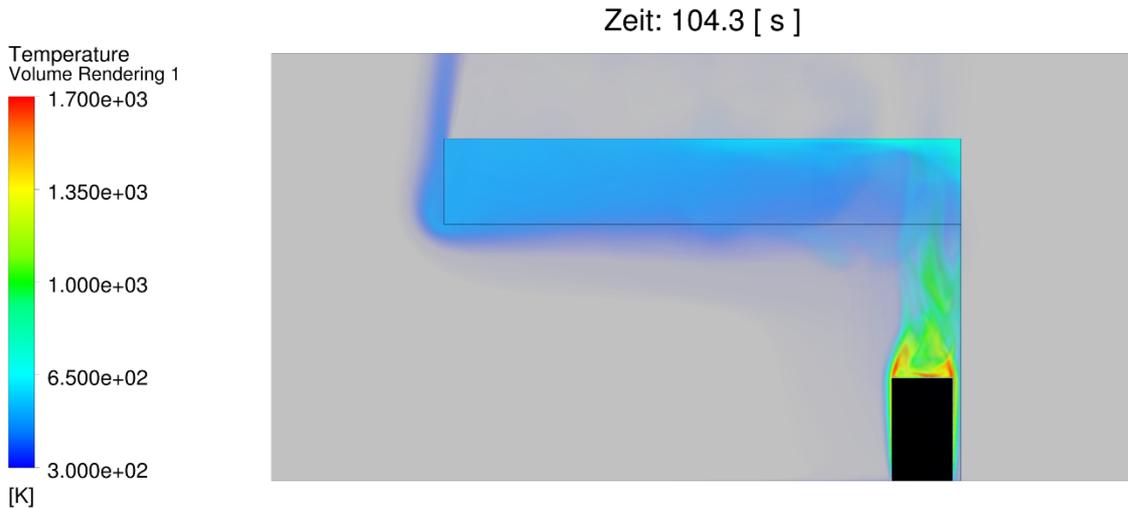


Abbildung 38: Temperaturverteilung stabile Rauchschrift 104,3 [s]

Abbildung 39 zeigt einem ersten (qualitativen) Vergleich der stationären Rauchschrift zwischen Simulation und Experiment. Links dargestellt ist die Rauchschrift (H_2O -Massenanteil) der Simulation, rechts eine Aufnahme der Rauchschrift im Experiment. Dieser erste Vergleich zeigt eine gute, wenn auch nur visuelle Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.

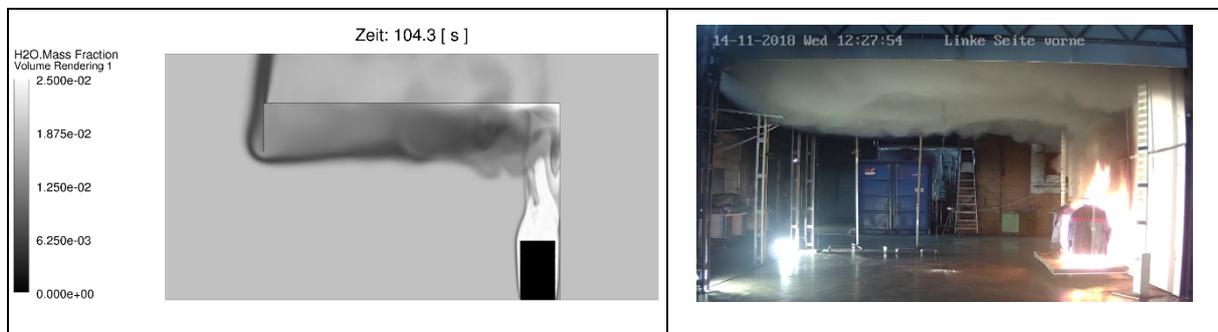


Abbildung 39: Vergleich: stabile Rauchschrift CFD (links); stabile Rauchschrift Experiment (rechts)

Wie schon in Kap. 3.1.2 erwähnt wurden im Experiment drei Thermoelementbäume (über dem Brandherd, in Raummitte/Sprinkler, in der Raumecke) mit einer höheren Dichte an Thermoelementen (d. h. kürzeren Abständen zwischen diesen) im Bereich der zu erwartenden Rauch-Grenzschicht installiert. Dies ermöglicht nicht nur eine Dokumentation der Temperaturen im Raum, sondern auch einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen der numerischen Simulation. Abbildung 40 zeigt die gemessenen und berechneten Temperaturen an den drei Positionen im Raum. Die Temperaturen entlang der Thermoketten sind mit Hilfe von Dreieck-Symbolen dargestellt, die

vertikalen Temperaturverläufe in der Rechnung mittels durchgezogene Linien. Beim Vergleich zwischen Simulation und Experiment fällt zunächst die gute Übereinstimmung bei allen drei Positionen auf. Unterschiede gibt es nur im Kernbereich der Brandquelle, an der die Simulation deutlich höhere Temperaturen aufweist. Festzuhalten ist hier, dass zum einen die detaillierte Geometrie der Brandquelle (Kleiderständer und Jacken) nicht direkt aufgelöst wurde und zum anderen die Auflösung der Thermokette im Kernbereich des Brandes zu gering war. In der Raummitte, mit Sprinkler bzw. HDWN-Düsen, liefert die DES-Berechnungsmethode eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Temperaturen. Allgemein kann festgehalten werden, dass die numerischen Rechnungen in dieser Arbeit in der Lage sind, das Temperaturniveau und den Temperaturgradienten bei der Verbrennung und die Schichtung des Rauches wiederzugeben.

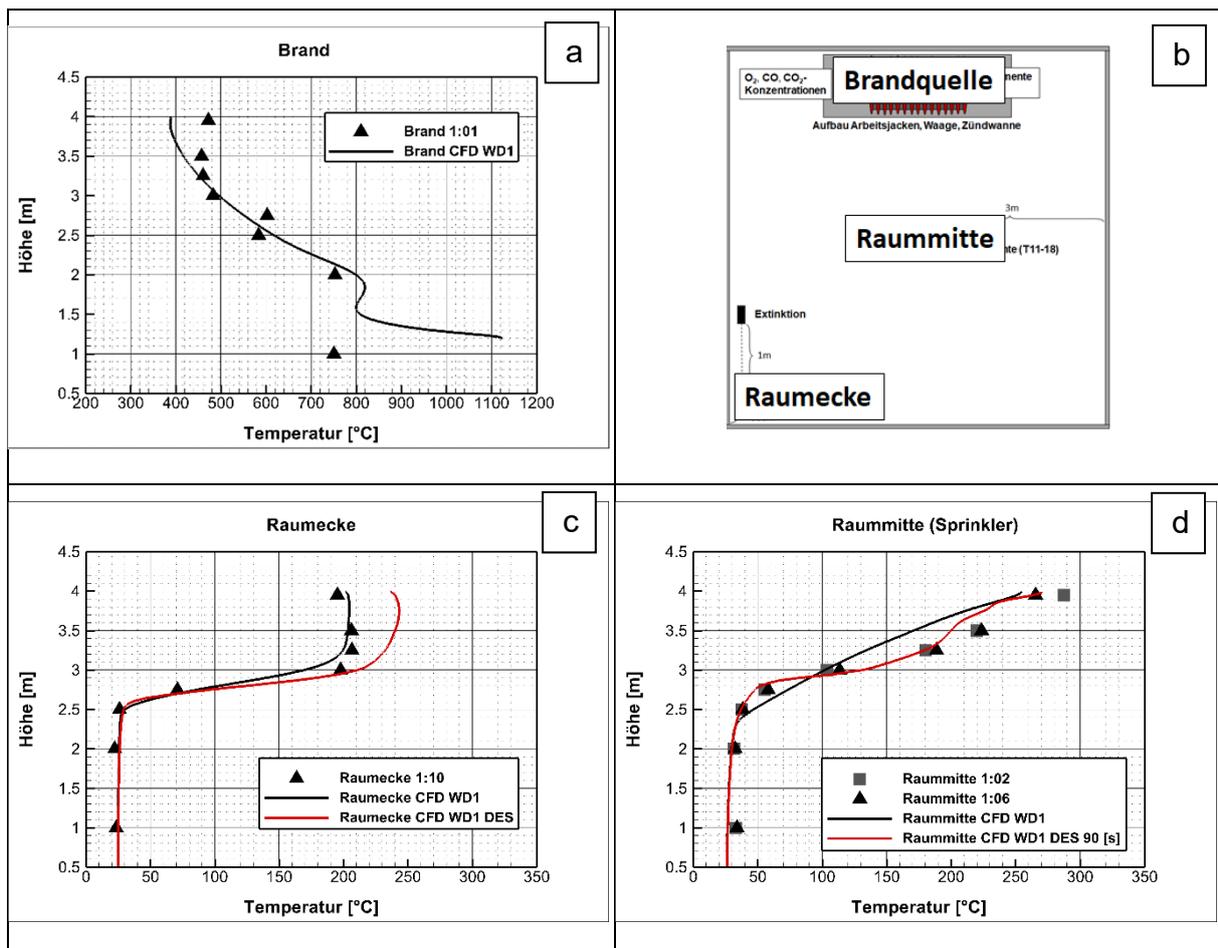


Abbildung 40: Vergleich der gemessenen Temperaturen mit den Ergebnissen der Simulation: a-Brand, b-Legende, c-Raumecke, d-Raummitte (Sprinkler)

5.2.2 Numerische Simulation der „Standard-Sprinkler“-Auslösung

Nachdem die Rauchschichtbildung numerisch abgebildet wurde, wird in einem nächsten Schritt die Sprinklerauslösung und deren Auswirkungen auf die Stabilität der Rauchschicht numerisch untersucht.

Analog zu Abbildung 8 zeigt Abbildung 41 vier ausgewählte Zeitschritte der Simulation. Die Sprinklerauslösung in der Simulation erfolgte erst bei Erreichen einer stabilen Rauchschicht bei 104,3 [s]. Aufgrund des großen Spraywinkels (80°) umfasst der Wirkungsbereich nahezu zwei Drittel der gesamten Rauchschichtfläche. Dies macht sich schon 1 [s] nach der Aktivierung bemerkbar, die Tropfen durchstoßen die Rauchschicht, verdampfen teilweise, aber der größte Anteil des Strahles erreicht den Boden bei gleichzeitiger Mitführung von Rauchpartikeln (s. Abbildung 41-a, b).

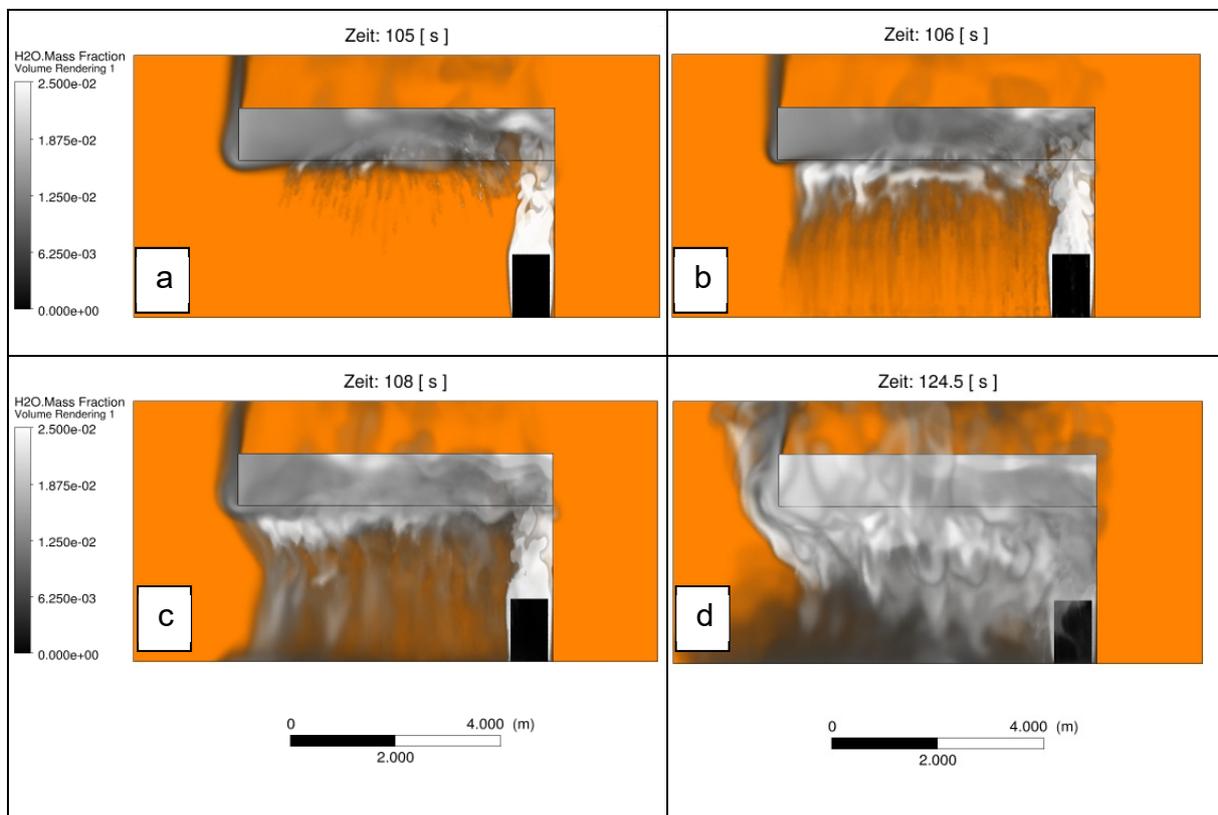


Abbildung 41: Rauchverteilung nach Sprinklerauslösung; ; a-105s, b-106s, c-108s, d-124,5s

Die hohe spezifische Tropfenbeladung mit einer, im Vergleich zur HDWN deutlich niedrigeren Geschwindigkeit (lange Aufenthaltszeiten) startet einen Prozess, der einer Rauchgaswäsche gleichkommt. Daraus resultiert eine langsame Zerstörung der Rauchschicht und die Rauchkonzentration in Bodennähe steigt nahezu linear mit der Zeit an (s. Abbildung 41-b, c). Abbildung 41-d zeigt analog zum Experiment nach etwa 20 [s] eine vollständige, großflächige Verrauchung des gesamten Versuchsstandes.

Auch wenn die Wassertropfen den Brand erreichen, ist keine Berücksichtigung von Quench- bzw. Löschprozessen möglich, da diese mit einem globalen (Ein-Schritt) Reaktionsmechanismus in der Simulation nicht wiedergegeben werden können.

Die Abbildungen Abbildung 42, Abbildung 43 und Abbildung 44 veranschaulichen die Temperaturverteilung etwa 65 [s] nach der Sprinklerauslösung. Abbildung 42 und Abbildung 43 verdeutlichen die Zerstörung der Temperaturschichtung des Rauchgases mittels Volumen-Rendering-Methode, also die dreidimensionale Temperaturverteilung im Raum. Um die Temperaturunterschiede besser hervorzuheben, ist erstmals die globale Temperaturverteilung dargestellt, in Abbildung 43 ist die Temperatur der Rauchschiicht auf 500 [K] begrenzt. Entsprechend der Verrauchung im Bodennähe ist auch eine großflächige Erhöhung der Temperatur erkennbar.

Abbildung 44 zeigt die Temperaturverteilung (bis 500 [K]) in einer Ebene senkrecht zur Brandquelle in der Mitte des Rechengebiets. Erkennbar ist neben dem Sprinklers-Öffnungswinkel auch die Abkühlung der Rauchschiicht und der Wärmestau in der Nähe der Rauchschrzen. Das sind die Gebiete außerhalb des Wirkungsbereiches des Sprinklers, in denen sich das Rauchgas staut.

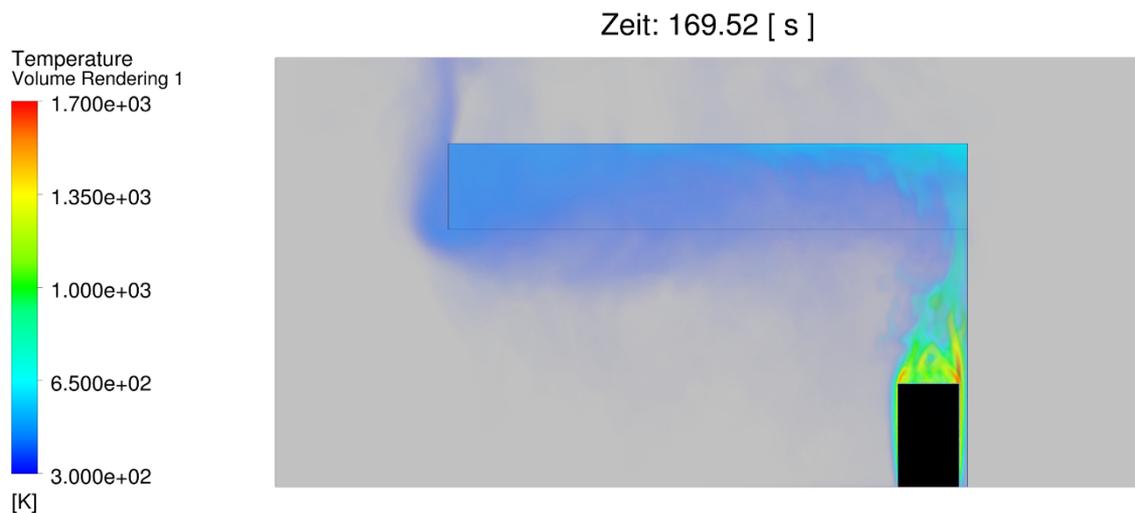


Abbildung 42: Temperaturverteilung nach Sprinklerauslösung

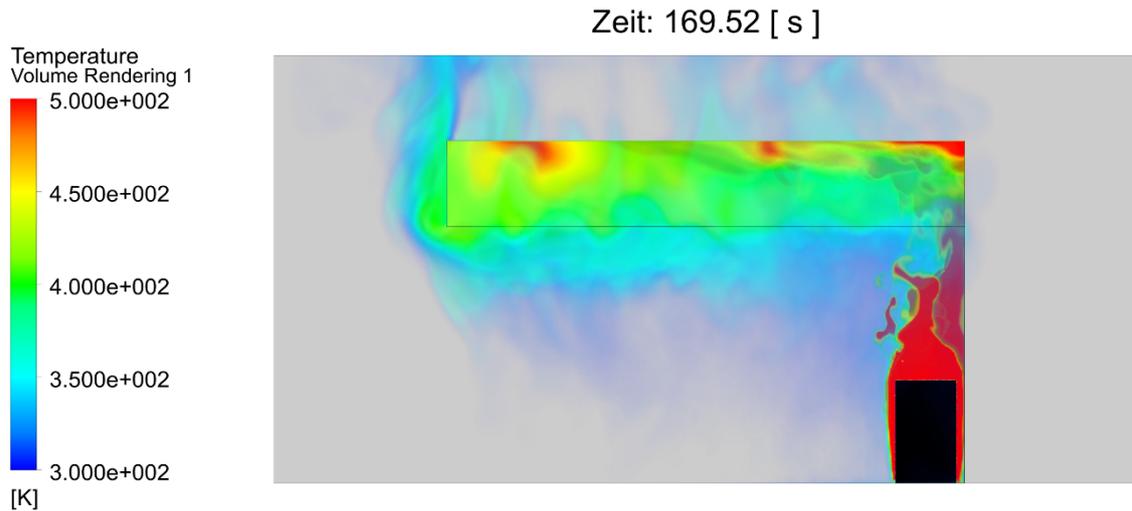


Abbildung 43: Temperaturverteilung nach Sprinklerauslösung 300 - 500K

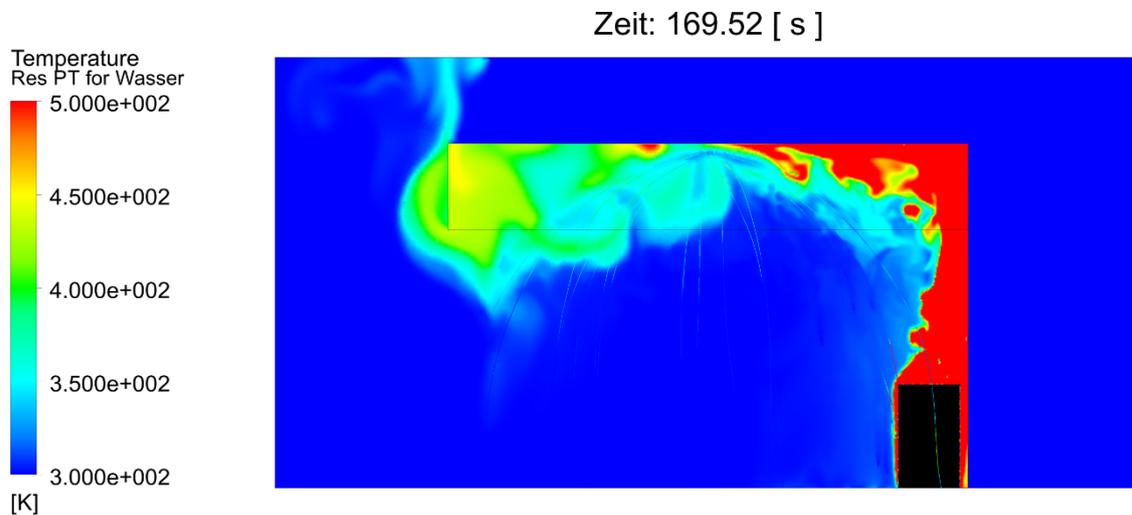


Abbildung 44: Temperaturverteilung nach Sprinklerauslösung in einer Ebene mittig, senkrecht zum Brandereignis 300 - 500K

Abbildung 45 vergleicht visuell Simulation und Experiment 65 [s] nach Sprinkler-Auslösung.

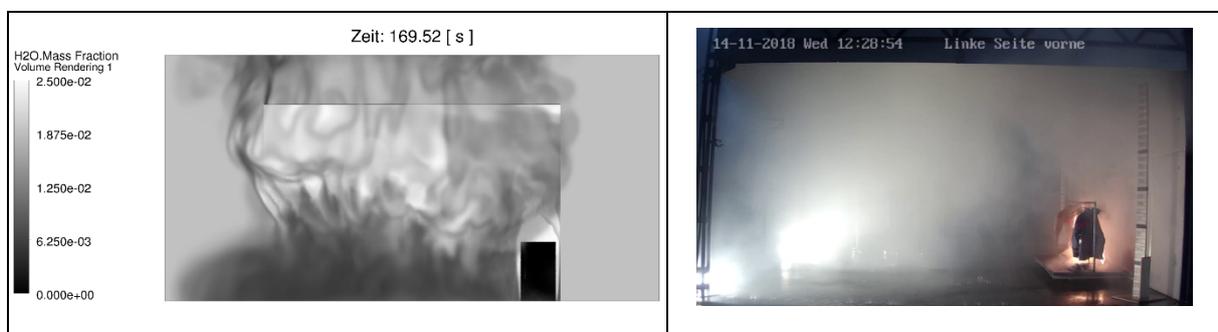


Abbildung 45: Vergleich: Rauchverteilung nach Sprinklerauslösung CFD (links) und Experiment (rechts)

5.2.3 Numerische Simulation der HDWN-Auslösung

Im Gegensatz zum Sprinkler gelten für die HDWN-Anlage (Düse) deutlich unterschiedliche Betriebsbedingungen. Die meisten Hochdruckdüsen kommen aus der Brenntechnik. Diese sind so konzipiert, dass ein Strahl mit einem relativ großen Entrainment, eine optimale Zerstäubung zielgerichtet in einen Verbrennungsprozess einleitet wird. Die HDWN-Düsen erzeugen mittels sehr hohem Vordruck (hier 110 [bar]) eine sehr feine (hier 80 [μm]) und monomodale Tropfenverteilung mit hoher Geschwindigkeit (hier 55,8 [m/s]).

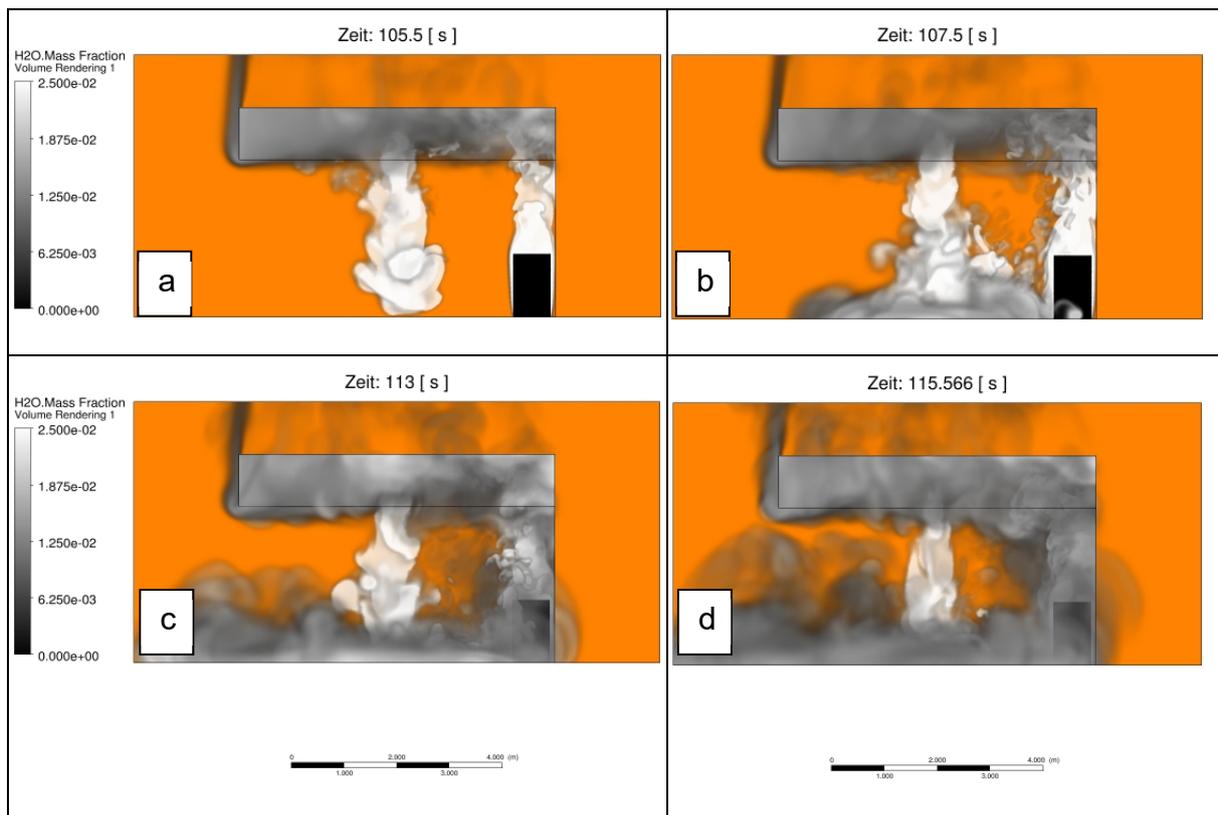


Abbildung 46: Rauchverteilung nach HDWN-Auslösung; a-105,5s, b-107,5s, c-113s, d-115,5s

In Abbildung 46 sind vier ausgewählte Zeitschritte (a-105,5s, b-107,5s, c-113s, d-115,5s) der Simulation dargestellt, die einige wichtige Phänomene der HDWN-Auslösung hervorheben. Abbildung 46-a veranschaulicht das Durchbrechen des HDWN-Strahls, der bedingt durch den hohen Austrittsimpuls schon nach ca. 1 [s] den Boden erreicht. Sofort erkennbar ist der schmale Strahl mit einem relativ kleinen Wirkungsbereich. Grund dafür ist die Düsengeometrie. Die feinen Wassertropfen dringen mit einer großen Geschwindigkeit in die Rauchschiicht ein. Begünstigt durch die hohe Dichte der Tropfen wird eine gewisse Menge an Rauchgas schlagartig nach unten beschleunigt. Am Boden wird das Wassernebel-Rauchgas-Gemisch

abgebremst, zu den Seiten umgelenkt (Abbildung 46-b) und durch die Brandthermik auf der einen und durch den statischen Auftrieb auf der anderen Seite nach oben in Richtung noch stabile Rauchschicht rezirkuliert (s. Abbildung 46-c, d). Das ganze Prozess der Rezirkulation ist mit Abkühlung und Verdünnung des Strahls mit Umgebungsluft verbunden. So wird ein teilweise gekühltes und mit Luft verdünntes Wassernebel-Rauchgas-Gemisch in die Rauchschicht zurückgefördert, was nach und nach zu deren Zerstörung führt.

Das Ganze spiegelt sich im Temperaturfeld, dargestellt in Abbildung 47, wieder. Erkennbar ist die gestörte Temperaturschichtung der Rauchschicht, aber auch die Erwärmung des Bereichs unmittelbar unterhalb der Wassernebeldüse. Die am Boden umgelenkten Rauchgase sind durch die höheren Temperaturen direkt im Bodennahbereich ebenfalls gut zu erkennen.

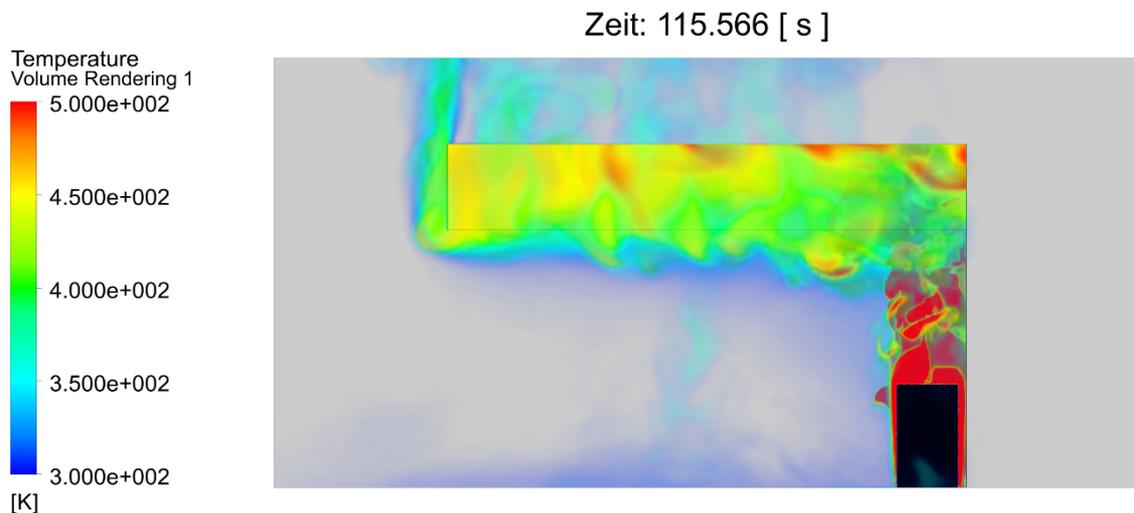


Abbildung 47: Temperaturverteilung nach HDWN-Auslösung 300 - 500K

Die Mitnahme von heißem Rauchgas und die Abkühlung der Rauchschicht ist in Abbildung 48 mit Hilfe der Temperaturverteilung (bis 500 [K]) in einer Ebene senkrecht zur Brandquelle in der Mitte des Rechengebiets verdeutlicht. Im Vergleich zum Sprinkler, durch welchen eine großflächige Rauchgaswäsche erfolgt, bewirkt die hohe Wassernebeldecke eine konzentrische Mitführung vom Rauchgas direkt unterhalb der Düse. Dies bedeutet, dass nach der Aktivierung einer HDWN-Anlage der Bereich direkt unterhalb der HDWN-Düse (Wirkungsbereich der HDWN-Anlage) schlagartig verrauchte und in Bodennähe Temperaturen bis zu 373 [K] (100°C) herrschen. Der Einfluss der Düsengeometrie ist dabei nicht zu vernachlässigen.

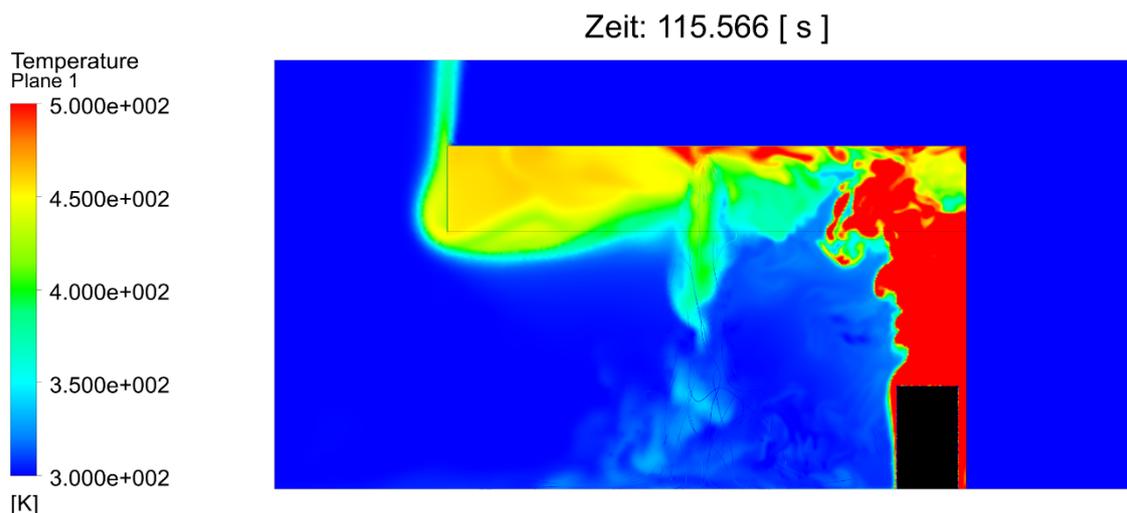


Abbildung 48: Temperaturverteilung nach HDWN-Auslösung mittig in einer Ebene, senkrecht zum Brandereignis 300 - 500K

Abbildung 49: Vergleich: Rauchverteilung nach HDWN-Auslösung CFD (links) und Experiment (rechts) zeigt einen visuellen Vergleich eines ausgewählten Zeitschrittes der Simulation und des Experimentes. Es kann festgehalten werden, dass die Rauchgasrezirkulation in Folge der HDWN-Auslösung von der Simulation zeitgleich wiedergegeben wurde.

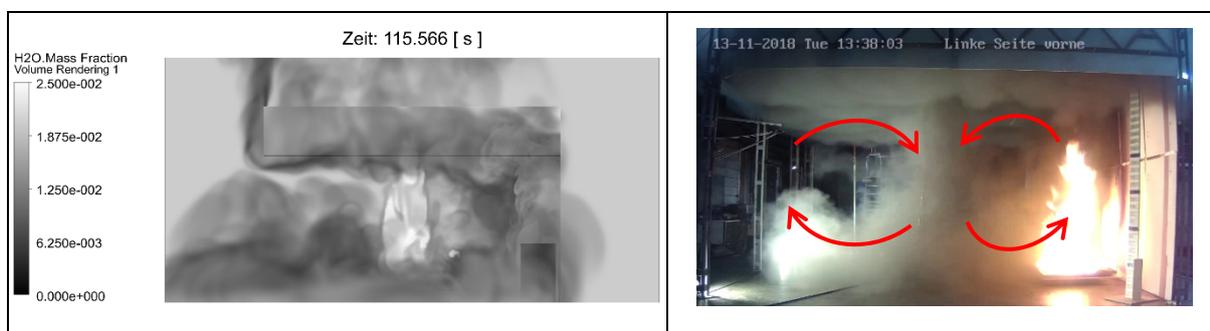


Abbildung 49: Vergleich: Rauchverteilung nach HDWN-Auslösung CFD (links) und Experiment (rechts)

5.3 Zusammenfassung (numerische Untersuchungen)

In diesem Abschnitt wurde der Einfluss der Auslösung einer ortsfesten Wasserlöschanlage auf die Stabilität der Rauchsicht in einem Brandraum numerisch untersucht. Ein direkter Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturen im Raum lieferte eine sehr gute Übereinstimmung. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen (DES) bieten eine detaillierte Einsicht in das Strömungs- und Temperaturfeld. Die Rechnungen sind in der Lage, die Wechselwirkung zwischen der Rauchsicht und der Sprinkler- bzw. HDWN-Anlage wiederzugeben.

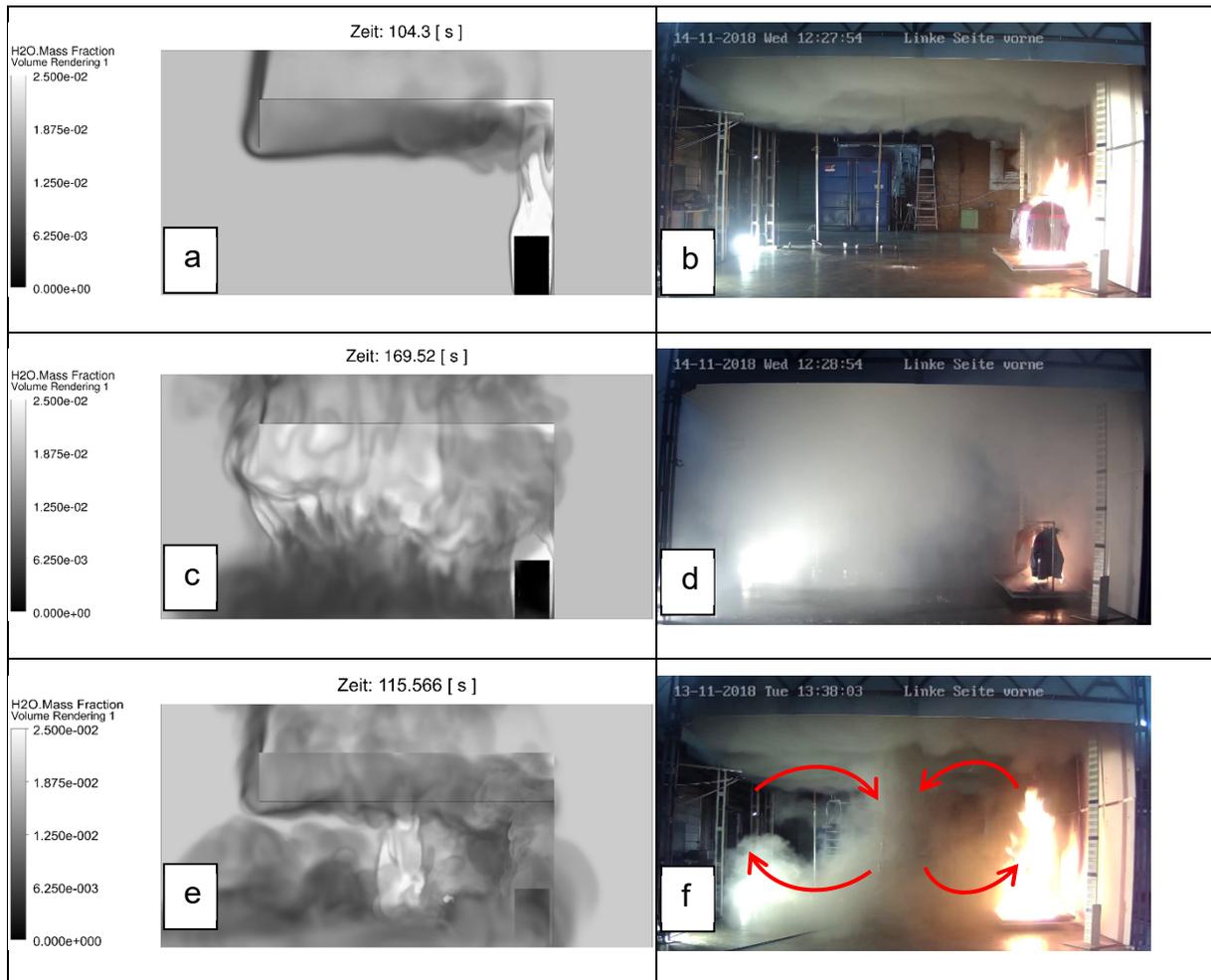


Abbildung 50: Vergleich der Rauchverteilung; a-stabile Rauchschicht (Simulation), b-stabile Rauchschicht (Experiment), c- Sprinkler (Simulation), d- Sprinkler (Experiment), e-HDWN (Simulation), f- HDWN (Experiment)

Es kann festgehalten werden, dass das Sprinklersprühbild eine nicht zu vernachlässigende Rolle auf die Wechselwirkung zwischen Sprinkler und Rauchschicht bzw. auf die aufsteigende Rauchströmung ausübt. Nach Auslösung der Sprinkleranlage findet eine Rauchgaswäsche statt (s. Abbildung 50-c, d), hervorgerufen durch die großflächige horizontale Verteilung von Tropfen mit niedriger Geschwindigkeit. Im Gegensatz dazu bewirkt die HDWN-Auslösung eine starke und deutlich erkennbare Rauchgasrezirkulation (Abbildung 50-e, f) und im Anschluss eine komplette Verrauchung des Raumes. Beiden Fällen kann entnommen werden, dass Tropfenimpuls und Düsengeometrie sowie Tropfengröße sehr großen Einfluss auf die Interaktion zwischen ortsfesten Wasserlöschanlagen und Rauchschichten, und entsprechend auch auf die Verrauchung der Flucht- und Rettungswege, haben.

6 Numerische Studie: NRA-Sprinkler-Rauchschicht-Brand Interaktion

In dieser Studie wurden die gegenseitigen Einflüsse zwischen NRA, Sprinkleranlagen, Rauchschicht und Brand in einen Raum mit 200m^2 ($20 \times 10 \times 5\text{m}$) untersucht. Der Raum hat zwei Ausgänge mit jeweils einer Fläche von $2\text{ [m}^2\text{]}$. An der Decke befinden sich zwei NRAs, die für die Studie als geöffnet oder geschlossen angenommen werden können. Die NRA haben eine Fläche von $2,25\text{ [m}^2\text{]}$ ($1,5 \times 1,5$), NRA1 ist direkt oberhalb der Brandquelle (optimale Ausführung, 5m vom Auslass/Ausgang) und NRA2 2 [m] vom Ausgang entfernt. Zusätzlich sind zwei Sprinkler modelliert (ohne Sprinkler-Geometrie) Sprinkler 1 ist zwischen den beiden NRA positioniert, Sprinkler 2 etwa 10 cm unterhalb der zweiten NRA (s. Abbildung 51). Es wurde zusätzlich eine Höhe von 1 [m] für die Umgebung oberhalb der NRA mitberücksichtigt, um das Ausströmen von Rauch über die NRA abzubilden. In Abbildung 51 ist die untersuchte Geometrie sowie die Positionierung der NRA, Sprinkler und Brandquelle dargestellt. In der Mitte des Raumes befindet sich die Brandquelle mit einer Fläche von $6\text{ [m}^2\text{]}$. Diese weist für alle hier durchgeführten Rechnungen eine thermische Leistung von $1,5\text{ [MW]}$ auf.

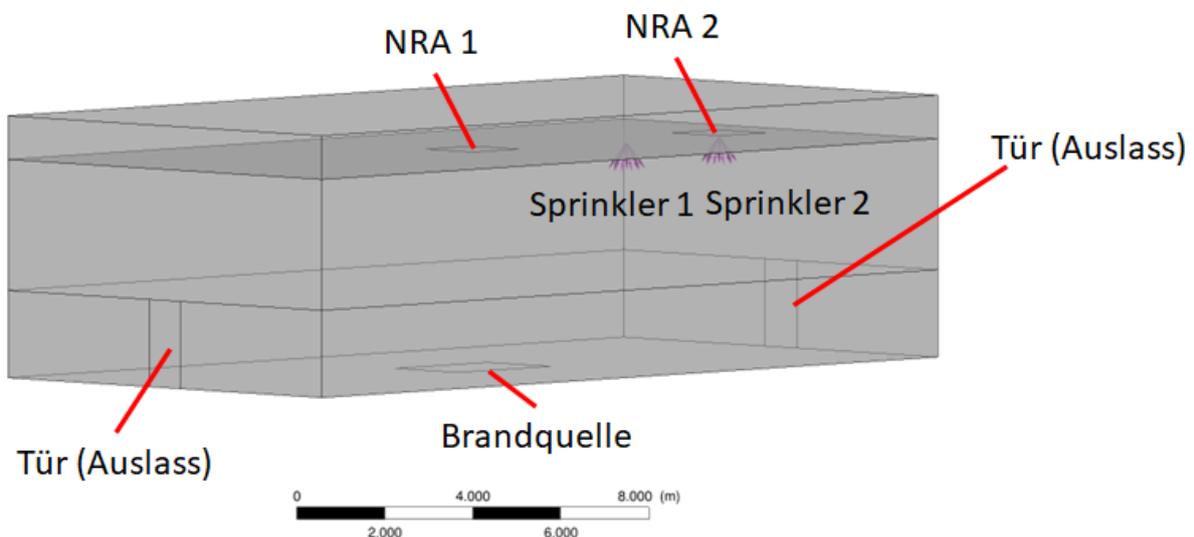


Abbildung 51: numerisches Rechengebiet sowie Positionierung der NRA, Sprinkler, Brandquelle und Öffnungen

Für die Gittergenerierung wurde das Programm ANSYS Icem CFD verwendet. Das resultierende numerische Rechengitter wurde lokal an der Grenzschicht zur Brandquelle verfeinert, wie in Abbildung 52 erkennbar ist. Das gesamte Verfahren ergibt ein diskretisiertes numerisches Gebiet mit ca. 10 Millionen Tetraederelementen (2,2 Millionen Knoten).

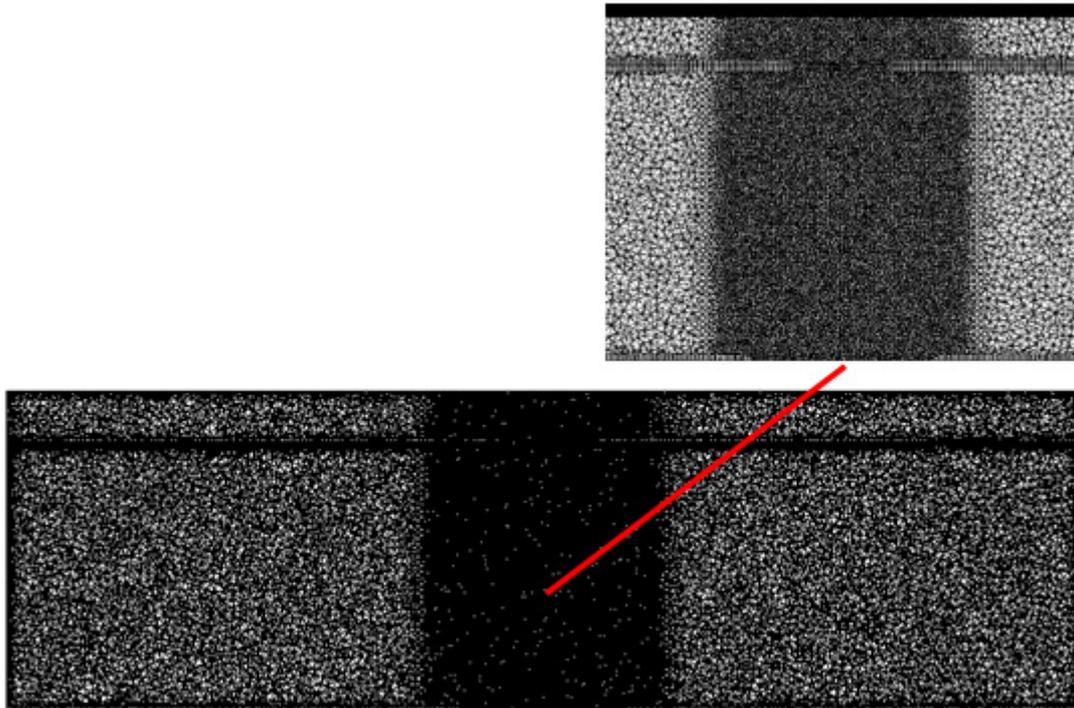


Abbildung 52: numerisches Gitter für die Berechnungen

Die numerischen Simulationen wurden mit dem Strömungslöser Ansys CFX durchgeführt. Als Methode für die Rechnungen wurde die Detached-Eddy-Simulation (DES) gewählt.

Da die Berechnung der Wärmefreisetzung infolge einer chemischen Reaktion nicht unbedingt notwendig war, wurde der Brand in Form eines CO-N₂-Gemischs als sogenannter Tracer modelliert.

Für die hier durchgeführten numerischen Simulationen wurden folgende numerischen und physikalischen Randbedingungen eingestellt:

- Gasphase: CO/O₂/N₂ (CO als Tracer)
- Flüssigphase: Wassertropfen
- Einlass: $Q_{th}=1,5$ [MW], Brandfläche $6m^2/250$ [kW.m⁻²] (1243,15K) / CO/N₂
- NRA =2,25 [m²]
- Sprinkler: $d_{Sprinkler}=0,0127$ [m] $u_{Tropfen}=15,58$ [m s⁻¹]
(Halber Sprühkegelwinkel 30°)
- Sprinklerform (Injektionform): Hollow Cone
- $d_{Tropfen}=828$ [μm]
- $m_{Tropfen}=1,33$ [kg s⁻¹]

- Tropfenzerfall und Koagulation wird nicht berücksichtigt
- Diskretisierungs-Schema: High Resolution
- instationär zeitlich aufgelöste Rechnung (5 Minuten)
- Turbulenzmodell: Detached Eddy Simulation
- Transient-Schema: Second Order Backward Euler
- Wandrandbedingung: adiabat, Tropfen haften an der Wand (Erdbeschleunigung wird berücksichtigt)
- instationär $t=200$ [s] (Rauchausbreitung) / 320 [s] / Timesteps=0,05 [s]
- Rechenzeit: 10 Tage auf 16 CPUs

Tabelle 4 fasst die untersuchten Fälle zusammen.

Tabelle 4: untersuchte Konfigurationen

Sprinkler/NRA	ohne	NRA 1 (Brand)	NRA 2 (Ausgang)	NRA 1 und 2
ohne	x	x	x	x
Sprinkler 1	x	x	x	x
Sprinkler 2	x	x	x	x
Sprinkler 1 und 2	x	x	x	x

6.1 Ergebnisse

6.1.1 Instationäre Berechnung der Rauchausbreitung

Erstmals erfolgte die Berechnung der „Wärmefreisetzung“ in Form eines Einströmens eines heißen Gasgemisches (CO/N₂), das als Tracer für die Rauchsichtbildung verwendet wurde. In Abbildung 53 ist die Ausbildung der stabilen Rauchsicht (ausgewählte Zeitschritte: 5, 12, 75, 200 Sekunden) in einer Ebene senkrecht zur Strömungsrichtung, in der Mitte des numerisches Rechengebiets zu sehen. Diese ist nach 200 [s] in einem stationären Zustand. Dargestellt ist die Tracer-Konzentration in einer dreidimensionalen Darstellung (Volumen-Rendering-Methode). Die maximal ausgewählte Tracer-Konzentration ist 0,014. Dies ist die Konzentration der Tracer bei

einer Temperatur von 358 K oder 85°C (Richtlinie: gefährliche Temperatur für Menschen ist zw. 80 und 100°C).

Nach etwa 5 [s] erreicht die heiße Abgasströmung (1243,15K (970°C)) die Decke, wird umgelenkt und gleitet dort entlang, bis die Strömung durch die Seitenwände abgebremst und nach unten in Richtung Ausgänge umgelenkt wird. Bei 200 [s] wird ein stationärer Zustand erreicht und eine stabile Rauchgasschicht bildet sich aus.

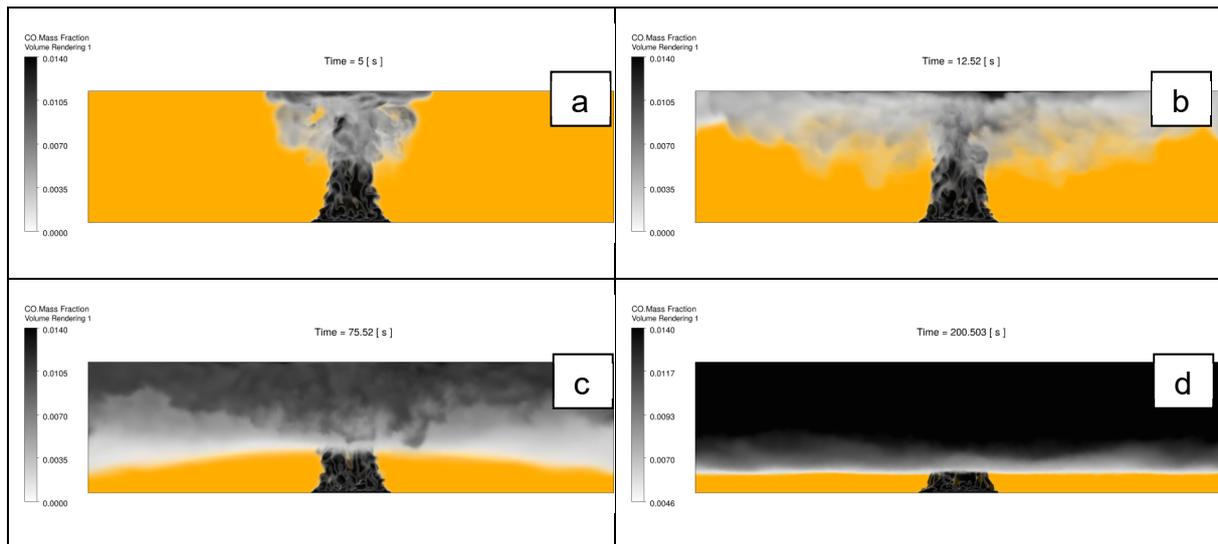


Abbildung 53: Rauchausbreitung bis zur Bildung einer stabilen Rauchschicht; a-5s, b-12s, c-75s, d-200s

Anhand der Strömungs- und Mischungszustände können die in Abbildung 53 dargestellten Zeitschritte in zwei Zonen unterteilt werden. Die erste Zone hat eine Ähnlichkeit zu einem thermischen Plume. Diese ist erkennbar in der Nähe der Brandquelle bzw. der Ausströmsöffnung der heißen Tracer. Dort wird Raumluft eingemischt, die zu einer Temperaturabnahme führt. Außerdem kann Inertisierung durch Verbrennung in den Strom aufgelegenen Plume dazu beitragen, dass hier noch unverbrannte Pyrolysegase nicht mehr verbrennen. Temperatur und Geschwindigkeit nehmen mit der Höhe signifikant ab. Die zweite Zone ist die des thermischen Plumes in der Heißgasschicht, gut erkennbar bei 200 [s]. Der mit Umgebungsluft verdünnte Heißgasstrom erreicht die Decke des Raumes, breitet sich zu den Wänden hinaus und staut sich dort auf, sodass sich eine weitgehend ebene Heißgasschicht ausbildet, deren Temperatur deutlich höher als die im unteren Raumbereich ist. Infolge des geringeren Dichteunterschiedes zwischen dem Plume und seiner Umgebung (in der Rauchschicht) nimmt der Auftrieb, und damit auch die Einmischung von Medium in den Plume, deutlich ab.

Abbildung 54 stellt das Feld der mittleren Geschwindigkeit der Strömung in einer Ebene senkrecht zur Strömungsrichtung in Mitte der numerischen Domain dar. Die Rauchgasströmung erreicht eine Geschwindigkeit von etwa 4,3 [m/s]. Die Maximalwerte treten im Bereich der Brandquelle und kurz vor Aufprall an der Decke auf. Nach diesem Aufprall wird die Strömung umgelenkt und entlang der Decke wieder beschleunigt. Festzuhalten ist, dass sich der Brand in diesem Fall wie ein Freistrahler verhält, d. h. Luft aus der Umgebung wird angesaugt, damit kommt es unmittelbar zur Verdünnung bzw. Abkühlung des Rauchgases (Tracer). Die Luftansaugung erfolgt über die Ein- bzw. Ausgänge. Dort sind zwei Strömungsrichtungen erkennbar, zum einen das austretende Rauchgas und zum anderen die einströmende Frischluft.

Die Abbildung 55 und Abbildung 56 verdeutlichen die Temperaturverteilung im Raum mit der Isofläche der Temperatur bei 358K (85°C). Erkennbar ist die Abkühlung des Rauchgases bedingt durch die Luftermischung und Diffusion. Unterhalb von 1 [m] ist die Raumtemperatur erkennbar, also die Temperatur der einströmenden Luft.

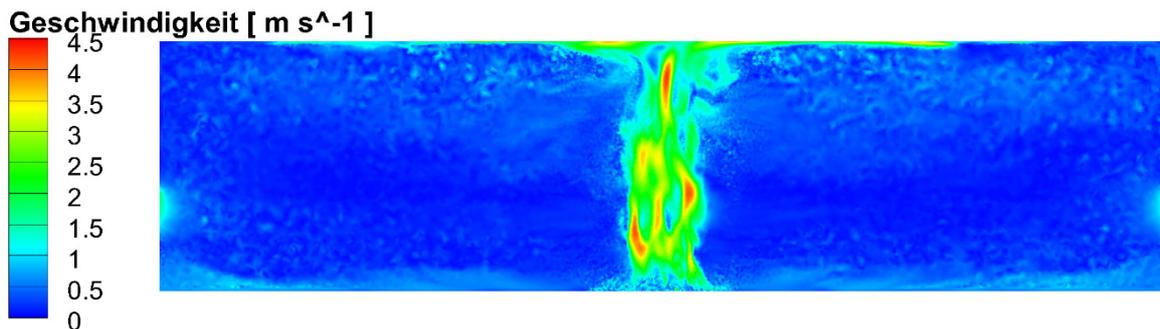


Abbildung 54: Geschwindigkeitsverteilung der stabilen Rauchsicht 200 [s]

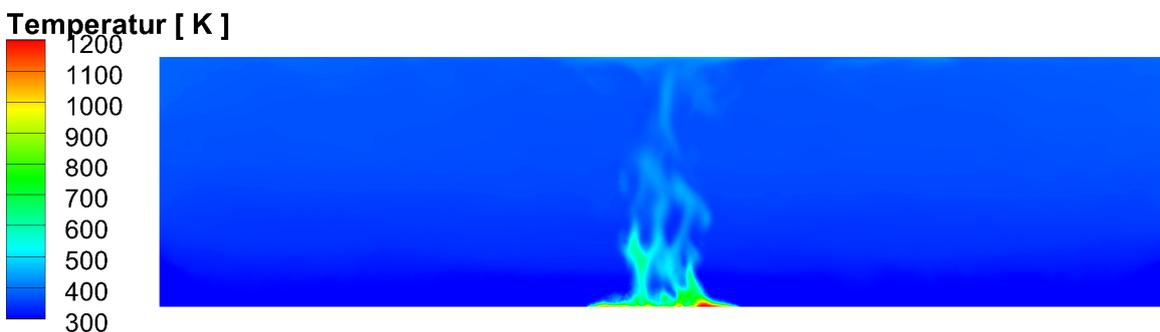


Abbildung 55: Temperaturverteilung der stabilen Rauchsicht 200 [s]

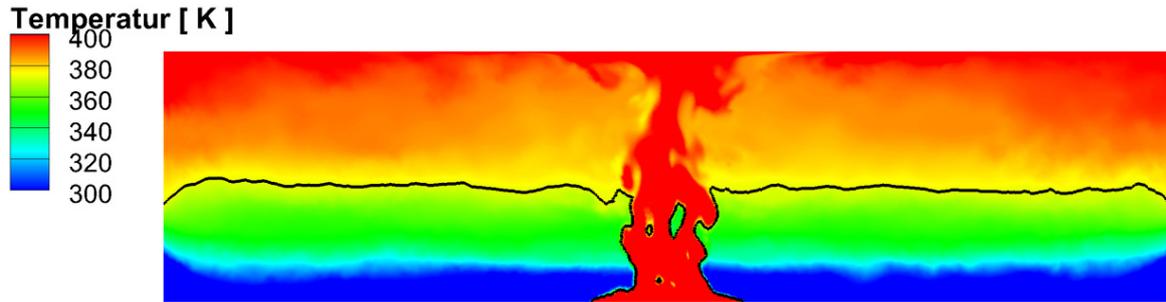


Abbildung 56: Temperaturverteilung der stabilen Rauchschiicht 200 [s]: 300 bis 400 [K], Isolinie der Temperatur bei 358K

6.1.2 Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschiicht und Sprinkler – Sprinkler 1 (Fall 2: zwischen Brand und Ausgang)

Im nächsten Schritt wird die Sprinkleranlage ausgelöst. In der Praxis passiert das meistens automatisch beim Erreichen der Auslösetemperatur am jeweiligen Anbringungsort.

Die erste berechnete Sprinklerposition ist zwischen den zwei NRA. Sprinklereigenschaften mit einem k-Wert von 80 wurden für die numerischen Untersuchungen implementiert.

Die zwei Ergebnisse in Abbildung 57 vergleichen die Rauchschiicht mit (rechte Seite) und ohne Sprinklerauslösung (linke Seite). Deutlich erkennbar ist die großflächige, durch die Sprinklerauslösung verursachte Verrauchung, die zu einer Verschlechterung der Sichtbedingungen auf den Rettungswegen führt.

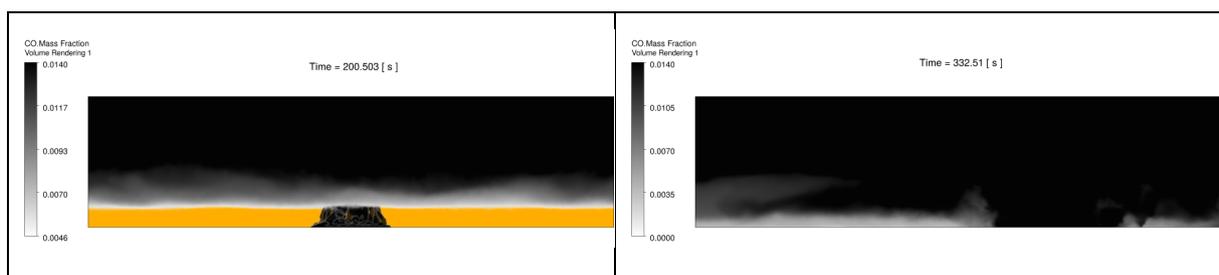


Abbildung 57: Rauchverteilung vor (links) und nach Sprinklerauslösung (rechts)

Bei Auslösungen von Sprinkleranlagen sind zunächst folgende Ursachen für die Verschlechterung der Sichtbedingungen auf den Rettungswegen denkbar:

- der Sprühwassernebel selbst,
- kondensierender Wasserdampf und
- die durch das Wasser verursachte Verteilung der Rauchgase.

Um die Gründe für diese Verrauchung erklären zu können, ist es notwendig, die Änderung des Strömungsfeldes im Raum zu betrachten (s. Abbildung 58).

Nach der Sprinklerauslösung bildet sich eine nahezu senkrechte Strömung (zur Rauchschichtströmung an der Decke) von Tropfen mit einer Geschwindigkeit von 15,58 [m/s]. Die Tropfen durchqueren die an der Decke gleitende Rauchgasströmung. Dadurch kommt es zu einer Störung der stabilen Rauchschicht. Die durch die Wassertropfen verursachte Abkühlung dieser Schicht führt zum Ausgleich des Dichteunterschiedes und damit zum Zusammenbruch der stabilen Schichtung. Durch den Impuls der Tropfenströmung werden Teile dieser Schicht nach unten getrieben, gelangen an den Boden und werden entweder wieder in Richtung Brand oder in Richtung Ausgang bzw. Seitenwand umgelenkt. So bilden sich seitlich vom Sprinkler zwei Wirbel. Lokal in der Nähe zum Sprinkler wird die Sauerstoffzufuhr über die Eingänge verhindert (aber nur über die Eingänge). Im Falle eines Brandes kann dies zum Quenchen der Verbrennung (teilweise Verlöschung, da keine Luftzufuhr) kommen und zur Verdünnung mit inerten Gasen (Rauchgas) durch Abgasrezirkulation führen. Es kann also festgehalten werden, dass sich ein von der Düse „angetriebener“ vertikaler Wirbel ausbildet, der an den Wänden entlang raucharme, kältere Luft in die Heißgasschicht fördert.

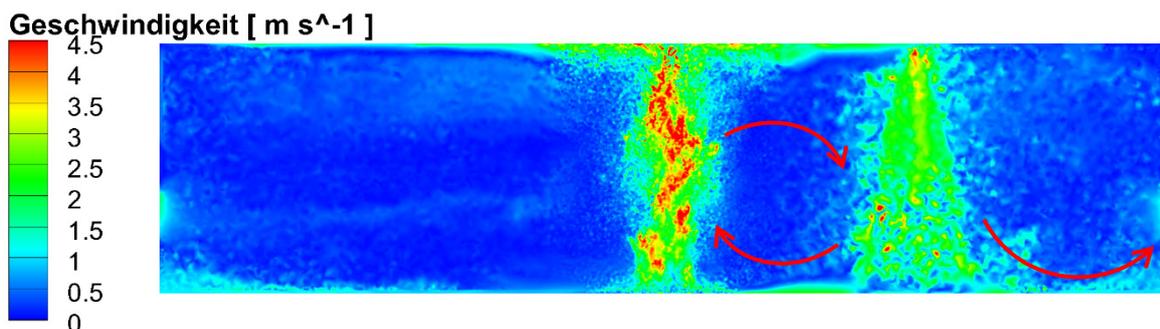


Abbildung 58: Geschwindigkeitsverteilung nach Sprinkler-Auslösung (Sprinkler 1)

Somit ist anzunehmen, dass die Seitenwände einen Einfluss auf die Ausbildung der vertikalen Wirbel ausüben. Man darf annehmen, dass sich der Einfluss bei großem Abstand zwischen Sprinkler und Seitenwand verringern wird. Wie jedoch in Abschnitt 5 bereits diskutiert, hat die Düsengeometrie und insbesondere der Impuls (Vordruck) sowie die Größe der Wassertropfen einen erheblichen Einfluss auf die stattfindende Rauchgasrezirkulation.

Das Ganze spiegelt sich im Temperaturfeld wieder. Abbildung 59 verdeutlicht die Temperaturverteilung im Raum (298-358 [K]) nach der Sprinkler-Auslösung. Zusätzlich ist in Abbildung 59 eine Isolinie der Temperatur bei 358 [K] dargestellt.

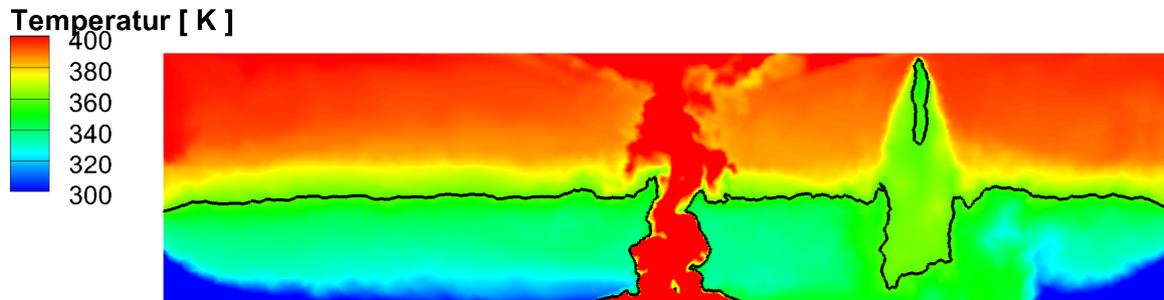


Abbildung 59: Temperaturverteilung nach Sprinkler-Auslösung (Sprinkler 1), 300 bis 400 [K]

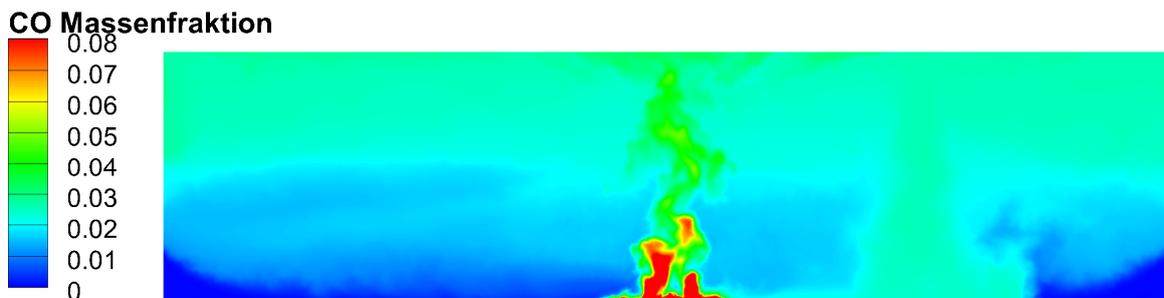


Abbildung 60: CO-Massenfraktion nach Sprinkler-Auslösung (Sprinkler 1)

Das Eindringen von heißen Rauchgasen in den bodennahen Bereich unterhalb der Sprinkler-Düse ist auch anhand der Isolinie der Temperatur bei 358K (85°C) deutlich zu erkennen. Zusätzlich findet eine direkte Abkühlung der Rauchsicht im Wirkungsbereich der Sprinkler statt, folglich sinkt auch die Rauchdichte.

Die Verrauchung des Bodennahbereiches ist mit Hilfe der Tracer-Konzentration (CO-Massenfraktion) in Abbildung 60 dargestellt.

Es wird beschrieben, dass bei gleichbleibendem Auftrieb weder ein zu geringer noch ein zu hoher Wasserdruck am Sprinkler zu einer großflächigen Verrauchung führt. Bei zu niedrigem Druck reicht die nach unten gerichtete Kraft des Tropfenschwarms nicht aus, um signifikante Rauchmengen mit sich zu reißen. Bei zu hohem Druck wird zwar viel Brandrauch mitgerissen, dieser bleibt aber im Tropfenschwarm „gefangen“ und trägt nicht zur weiteren Verrauchung des Raumes bei. Lediglich in einem begrenzten Druckübergangsbereich reicht der Auftrieb des durch den Sprinkler nach unten

gedrückten Brandrauches aus, um seitlich aus dem Tropfenschwarm auszutreten und damit in die raucharme Schicht im Raum zu gelangen.

6.1.3 Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschicht und zwei Sprinklern – Sprinkler 1 (Fall 2: zwischen Brand und Ausgang) und Sprinkler 2 (Ausgang)

Eine ähnliche Situation wird auch nach dem Auslösen von zwei Sprinklern beobachtet. Die beiden Sprinkler wurden in der Simulation zeitnah ausgelöst. Abbildung 61 zeigt das Geschwindigkeitsfeld nach der Sprinkler-Auslösung. Zwischen den zwei Sprinklern wird ein Unterdruck erzeugt und es bildet sich ein Staupunkt der Strömung. Im Falle von zwei ausgelösten Sprinklern sind diese Unterdruckbereiche im Feld wie folgt zu finden: links vom Brandes, zwischen Brand u. Sprinkler 1 (zwischen Brand und Ausgang), zwischen Sprinkler 1 und Sprinkler 2 (Ausgang) und zwischen Sprinkler 2 und Seitenwand bzw. Ausgang.

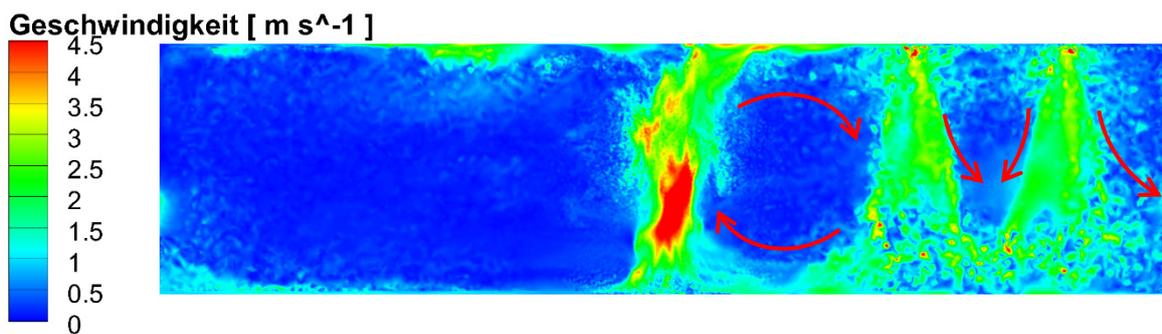


Abbildung 61: Geschwindigkeitsverteilung nach Auslösung von zwei Sprinklern

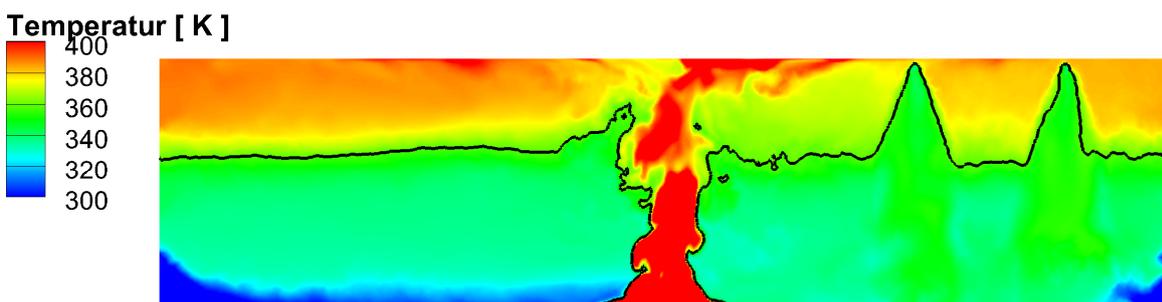


Abbildung 62: Temperaturverteilung nach Auslösung von zwei Sprinklern, 300 bis 400 [K]

In Abbildung 62 ist eine globale Abnahme der Heißgasschicht, also der Rauchschicht mit einer Temperatur über 85°C zu beobachten. Dies ist eine Folge der Abkühlung, erstmals über die Sprinklertropfen, aber auch durch das verbesserte Durchmischen,

also die Zumischung von kälterer Luft aus der Türöffnung und den bodennahen Schichten.

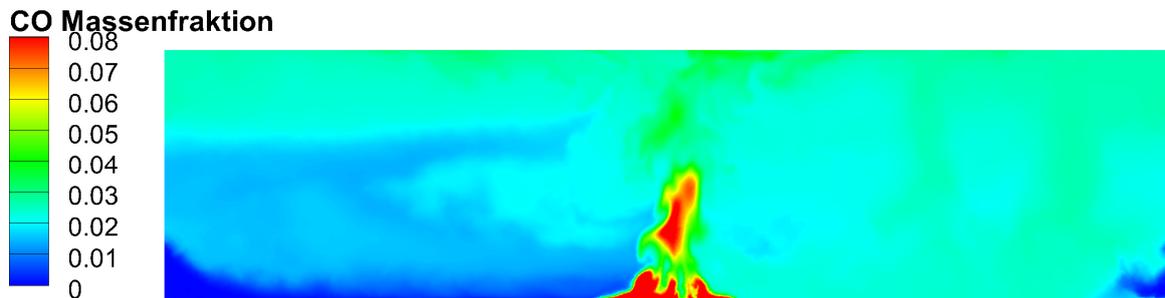


Abbildung 63: CO-Massenfraktion nach Auslösung von zwei Sprinklern

Die Aktivierung von zwei Sprinklern resultiert in einer Erweiterung des Wirkungsbereiches (s. Abbildung 63), vor allem wenn die Sprinklerstrahlen sich überlagern. So wird deutlich mehr Rauch nach unten in den bodennahen Bereich befördert, ebenfalls begünstigt durch die vorhandene Rauchgasrezirkulation.

6.1.4 Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschicht und NRA (NRA 1-Brand)

Die Diskussion über die Vor- und Nachteile eines kombinierten Sprinkler / NRA-Systems ist bis heute nicht beigelegt. Die meisten Großversuche liefern keine eindeutigen Ergebnisse, wie die einleitenden Forschungsberichte zu diesem Thema zeigen [17], [31]. Die verwendeten Verfahren (auch die 2-Zonen-Modelle) zur Berechnung der Sprinkler-Auslösezeitpunkte bieten aus brandschutztechnischer Sicht keine befriedigenden Lösungen.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages wird die experimentelle und numerische Studie über die Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschicht und Sprinkler erweitert, um die Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von Sprinklern und NRA zu ermöglichen. Eine wichtige Fragestellung ist, in welchen Maße die NRA das Ansprechen von einzelnen, thermisch gesteuerten Sprinklern verzögert, deren Sprühstrahl den Brand in der Regel so lange eindämmen soll, bis die Feuerwehr eintrifft, um ihn dann vollständig zu löschen.

Mit dem Extremfall, nämlich der von Beginn an offenen NRA, wird die Beeinflussung der Rauchschichtdicke und des Sprinkler-Auslöseverhaltens untersucht. Wichtig zu prüfen ist, ob die Sprinkler verzögert oder gar nicht reagieren, weil durch die NRA Wärme abgezogen wird, oder ob sie schneller reagieren, wegen des besseren

Wärmeübergangs infolge der höheren Strömungsgeschwindigkeit. Festzuhalten ist, dass in dieser Studie die natürliche-Rauch-Abzugsanlage vereinfacht durch eine Öffnung dargestellt ist, das heißt, das Ausströmen von Rauchgasen wird allein durch Auftrieb und Druck (Staudruck des Rauchgases an der Decke) getrieben.

In Abbildung 64 ist, um einen Eindruck für die berechneten Strömungsfelder mit geöffneten NRA direkt oberhalb der Brandquelle zu geben, das Geschwindigkeitsfeld in einer Ebene in der Mitte des Rechengebietes dargestellt. Das Öffnen der NRA direkt oberhalb des Brandes, in diesem Fall des einströmenden Heißgases, bewirkt eine Beschleunigung der Strömung (da direkt oberhalb des Brandes kein Aufprallen an die Decke) und folglich eine relativ schnelle Entrauchung, also Ableitung der heißen Gase aus dem Raum.

Das führt zu einer Änderung des globalen Temperaturniveaus im Raum, wie in Abbildung 65 ersichtlich ist. Die Temperaturverteilung im Raum zeigt deutlich niedrigere Rauchgastemperaturen im Vergleich zu den Temperaturen der ungesteuerten Rauchschiicht im Abbildung 56.

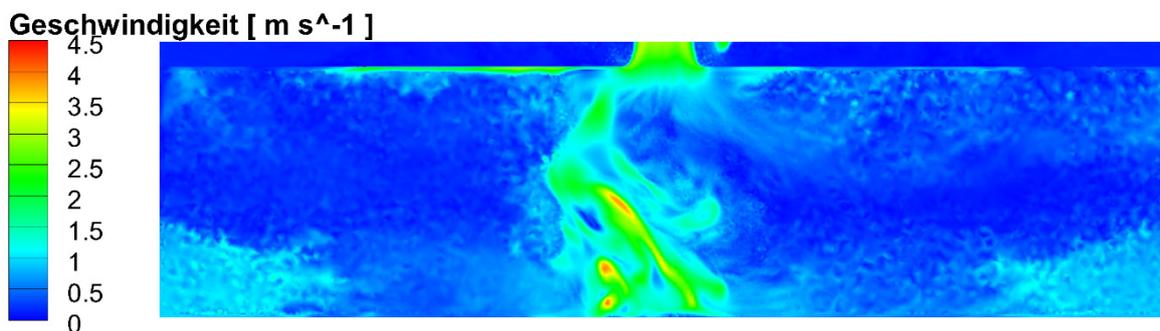


Abbildung 64: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneten NRA 1 (Brand)

Die maximale Temperatur der Rauchschiicht, auch im Bereich der zwei Sprinkler, beträgt 335 [K], also 62°C, bei einer Sprinkler-Auslösetemperatur von 68 °C. Aus der hier durchgeführten numerischen Simulation kann geschlossen werden, dass sofern sich die NRA im günstigsten Fall direkt oberhalb der Brandquelle befindet, das Temperaturniveau der Rauchschiicht nicht ausreichend hoch ist, um einen Sprinkler auszulösen. Eine wichtige Voraussetzung ist dabei, dass die NRA unter den gleichen thermischen Bedingungen in Betrieb genommen werden wie die Sprinkler.

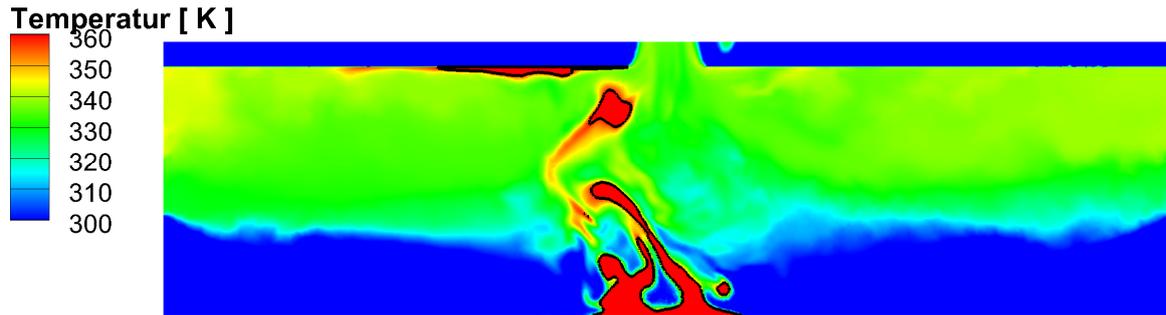


Abbildung 65: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand)

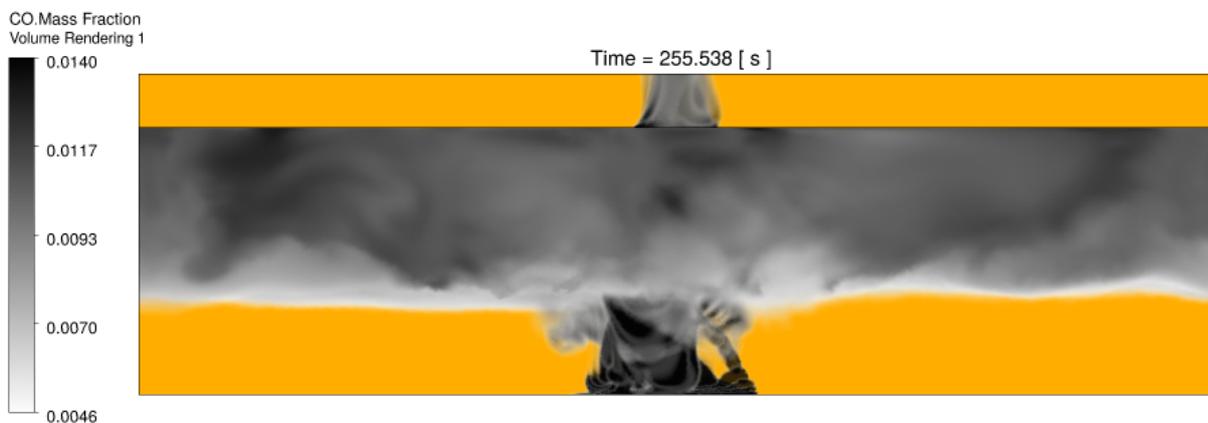


Abbildung 66: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand)

Abbildung 66 verdeutlicht den Entrauchungsprozess im Raum und das Austreten heißer Rauchgase in die Umgebung. Im Vergleich zu Abbildung 57 (links), in der die ungestörte Rauchsicht dargestellt ist, ist die Verrauchung der Rettungs- und Fluchtwege deutlich geringer.

6.1.5 Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchsicht und NRA 2 (Ausgang)

Analog zum Abschnitt 6.1.4 wird im nächsten Schritt eine Konfiguration untersucht, in der die NRA nicht direkt oberhalb der Brandquelle, sondern in einen bestimmten Abstand zu ihr positioniert wurde. Dieser beträgt 8 [m] in der gewählten Anordnung.

Abbildung 67 zeigt die Positionierung der NRA und das Beschleunigen der Rauchgase in der Umgebung. Erkennbar ist, dass die aufsteigenden heißen Rauchgase nach rechts in Richtung NRA teilweise direkt umgelenkt werden.

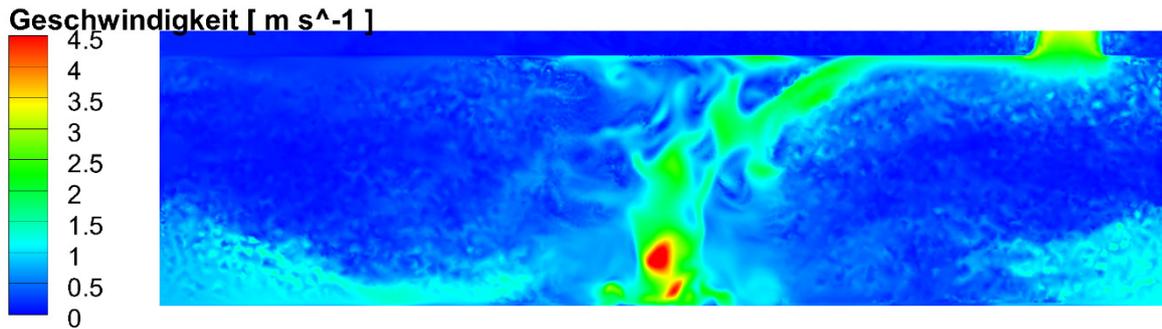


Abbildung 67: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneter NRA 2 (Ausgang)

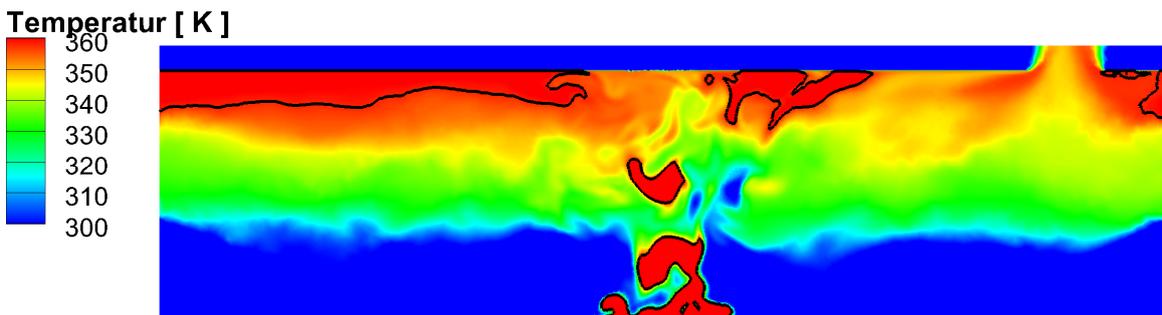


Abbildung 68: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 2 (Ausgang)

Im Vergleich zu Abbildung 65 zeigt die Temperaturverteilung in Abbildung 68 etwas höhere Temperaturen in der Rauchschiicht. Die maximale Temperatur im Bereich der Sprinkler beträgt 350 [K] (77°C). Auch wenn die numerisch ermittelte Temperatur etwas oberhalb der Sprinkler-Auslösetemperatur (68 °C) liegt, kann nur bedingt daraus geschlossen werden, dass, eine Sprinkler-Auslösung erfolgt, wenn die NRA seitlich des Brandes positioniert ist. Grund für diese Unsicherheit ist, dass an bestimmten Stellen unterhalb der Decke die Temperatur zu niedrig für eine Auslösung ist und die 9 [K] Temperaturdifferenz keine Sicherheit für eine Auslösung darstellt.

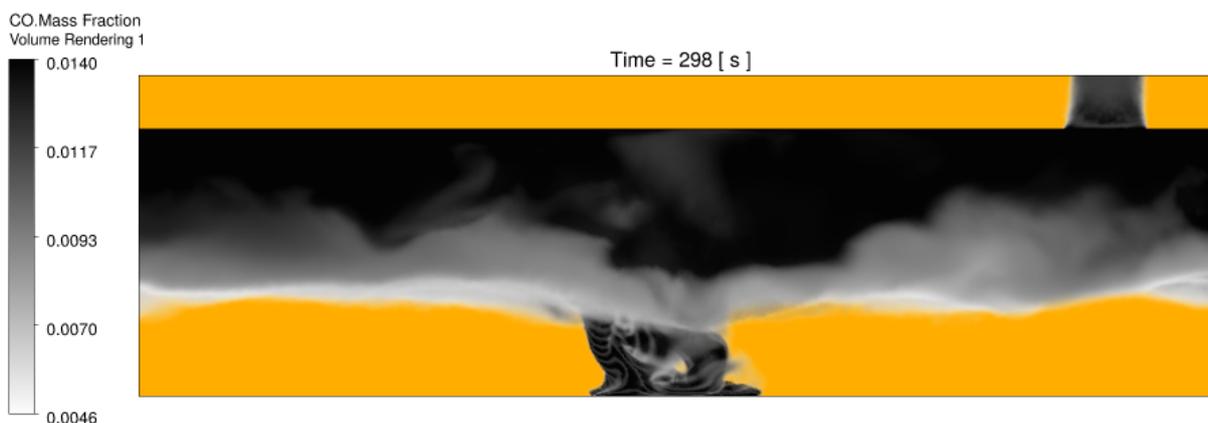


Abbildung 69: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 2 (Ausgang)

In Abbildung 69 ist die Rauchverteilung dargestellt. Erkennbar ist, dass der Entrauchungsprozess in einem direkten Zusammenhang mit der Positionierung der NRA im Raum steht.

6.1.6 Wechselwirkung zwischen Brand, Rauchschicht, Sprinkler und NRA (Sprinkler 1 - zwischen Brand und Ausgang und NRA 1-Brand)

Nachdem die Beeinflussung des Sprinkler-Auslöseverhaltens durch die geöffnete NRA untersucht worden ist, kann eine weitere Konfiguration, nämlich der gleichzeitige Betrieb von NRA und Sprinklersystemen, numerisch untersucht werden. Die Konfiguration stellt einen Grenzfall dar, in dem eine Sprinkler-Auslösung erfolgt, obwohl eine Natürliche-Rauch-Abzugsanlage vorhanden und aktiviert ist.

Aus den drei nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 70, Abbildung 71 und Abbildung 72) kann entnommen werden, dass im Feld zwei entgegen gerichtete Ströme zu finden sind – an der ersten Stelle der Brand und die aufsteigende heiße Strömung, die durch den NRA teilweise in die Umgebung abgeleitet wird, und an zweiter Stelle der durch den Sprinkler ausgelöste Wasserstrahl in Richtung Boden. Letzterer bewirkt, wie schon diskutiert, eine sog. Rauchgasrezirkulation. Durch diese werden teilweise abgekühlte und mit Luft verdünnte Rauchgase wieder in die Rauchschicht befördert. Das führt zu einem höheren Durchsatz durch die NRA aber verhindert zum Teil die Entrauchung.

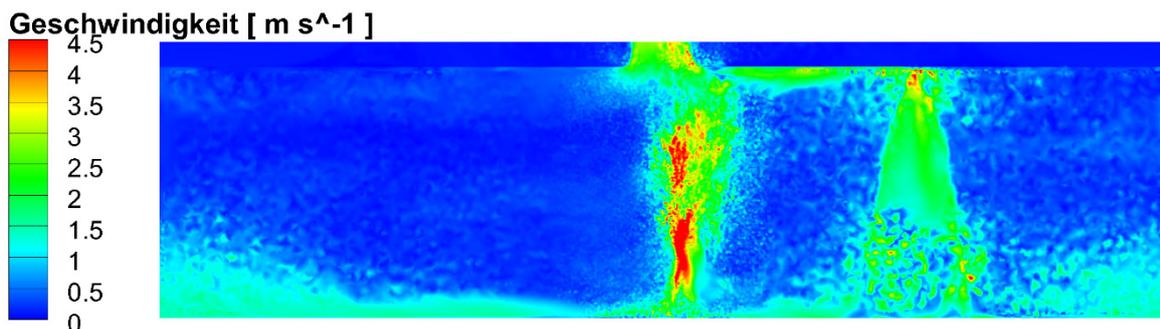


Abbildung 70: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand) und Sprinkler 1

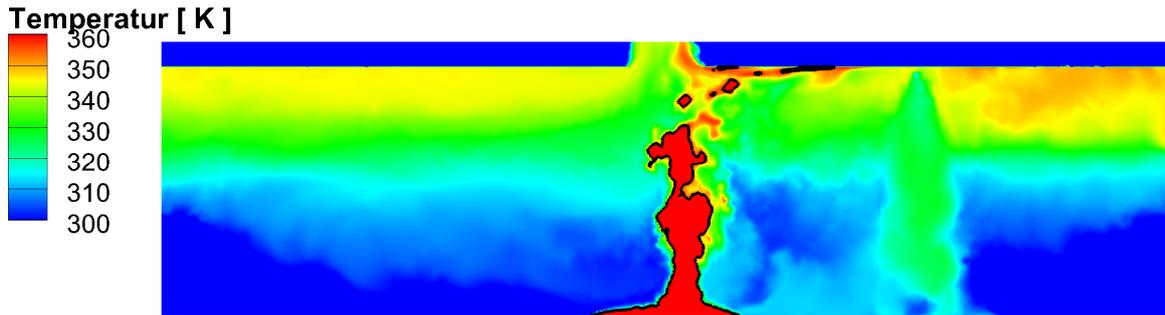


Abbildung 71: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand) und Sprinkler 1

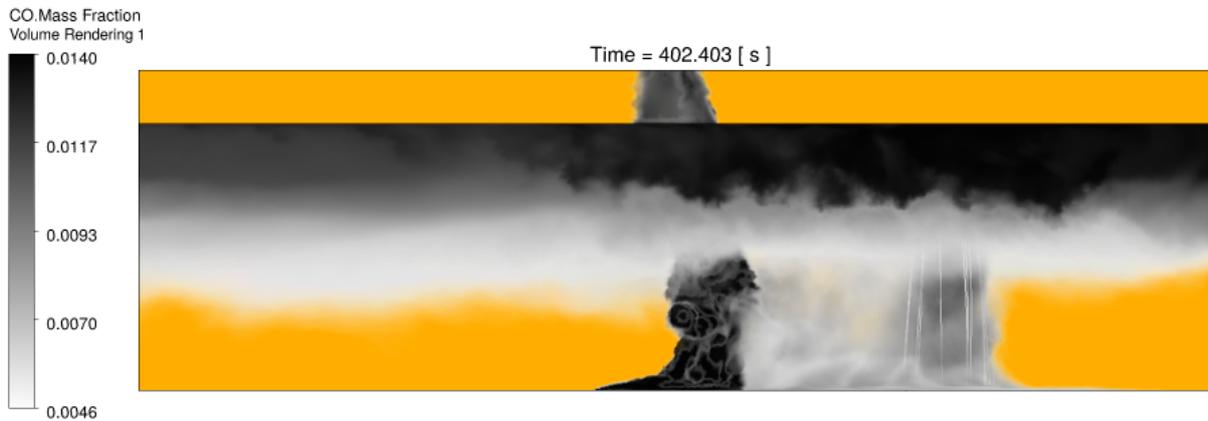


Abbildung 72: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand) und Sprinkler 1

6.1.7 Wechselwirkung zwischen Brand, zwei Sprinklern und zwei NRA (Sprinkler 1, Sprinkler 2, NRA 1, NRA 2)

Ähnlich ist die Situation mit zwei Sprinklern und zwei NRA (s. Abbildung 73, Abbildung 74 und Abbildung 75). Der zweite Sprinkler befindet sich direkt unterhalb des zweiten NRA. Es wird eine fast vollständige Entrauchung beobachtet.

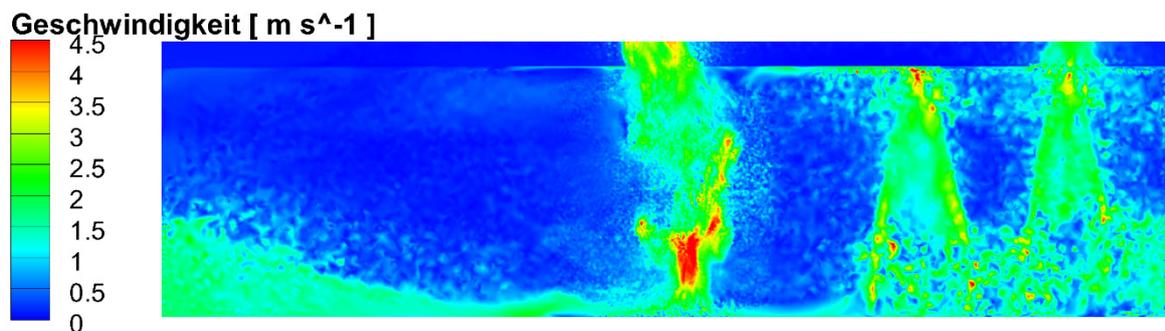


Abbildung 73: Geschwindigkeitsverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand), Sprinkler 1 und Sprinkler 2

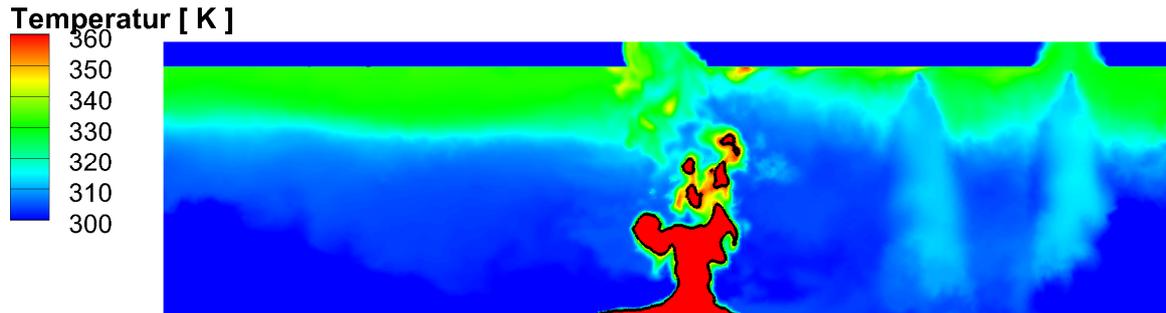


Abbildung 74: Temperaturverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand), Sprinkler 1 und Sprinkler 2



Abbildung 75: Rauchverteilung mit geöffneter NRA 1 (Brand), Sprinkler 1 und Sprinkler 2

Eine Auswertung der Massenströme, die durch die zwei NRA in die Umgebung geleitet werden, zeigt, dass bei einem gleichzeitigen Betreiben von Sprinkler-Systemen und NRA der Durchsatz, also die Massenströme, steigen (im Vgl. zu dem Fall, in dem nur NRA aktiviert sind). Grund für diese Erhöhung ist das Durchmischen der Rauchschicht und das Fördern von Umgebungsluft in die Rauchschicht. Dieser Prozess ist auch mit einer Erhöhung des Impulses in Richtung Rauchschicht, Brand (aufsteigende heiße Rauchgase) und NRA verbunden.

Zusammenfassend kann bei der Interpretation der Ergebnisse der numerischen Simulation festgestellt werden, dass keine bzw. je nach Rauchgastemperaturen im günstigsten Fall eine verzögerte Auslösung der Sprinkler zu erwarten ist, wenn die NRA in der Nähe des Brandes oder direkt darüber positioniert sind. Eine Beeinflussung der Sprinkler-Funktion ist somit gegeben. Gleichzeitig kann wiederum eine Beeinflussung des Durchsatzes von NRA nach einer Sprinkler-Auslösung festgestellt werden. Dies bedeutet, dass im Brandfall das primäre Schutzziel, nämlich die

Rettungswege und die Angriffswege der Feuerwehr rauchfrei zu halten, nicht oder nur bedingt verfolgt werden kann, weil die fehlende Sprinkler-Auslösung eine Anfachung des Brandes nicht verhindert.

7 Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsbericht wurde die Wechselwirkung zwischen ortsfesten Wasserlöschanlagen (Sprinkler und Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage) und natürlichen Rauchabzügen experimentell sowie mit Hilfe von dreidimensionalen numerischen Simulationen untersucht.

Um die Grundlagen und Phänomene dieser Wechselwirkung besser zu verstehen, behandelte Kapitel 3 den Einfluss der Sprinklerauslösung auf die stabile Rauchschiicht in mehreren Versuchen experimentell. Als Brandszenario wurde ein brennender Kleiderständer an einer Wand, wie er beispielsweise in einem Kaufhaus stehen könnte, angenommen. Eine feuerfeste Einhausung wurde errichtet und mit Rauchschürzen, die für die Ausbildung einer stabilen Rauchschiicht erforderlich sind, sowie einem Sprinkler versehen. Im Laufe der Untersuchungen wurde für Letzteren das Sprühbild mittels Durchflussmenge beziehungsweise Vordruck variiert und es kam eine Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN) zum Einsatz. Dadurch konnte schließlich der Einfluss der Tropfengröße und -geschwindigkeit auf die Stabilität der Rauchschiicht und die nachfolgende Verrauchung der Flucht- und Rettungswege untersucht werden. Bei zwei der drei durchgeführten Versuche konnte eine Zerstörung der stabilen Rauchschiicht beobachtet werden. Die Sprinklerauslösung bewirkte ein Auswaschen des Rauchgases bedingt durch den großen Wirkungsbereich und die horizontal großflächige Verteilung von kleinen Tröpfchen mit einer relativ niedrigen Geschwindigkeit. Nach der Auslösung einer Hochdruck-Wassernebel-Löschanlage (HDWN) wurden hingegen die Rauchgase durch den hohen Tropfenimpuls mitgezogen und rezirkulieren im Brandraum. Damit blieb die lokale Rauchdichte ähnlich, jedoch verteilte sich diese auf den gesamten Brandraum. Schließlich wären bei beiden Versuchen die Flucht- und Rettungswege infolge der Auslösung der Löschanlagen stark verraucht und für ungeschützte Personen unpassierbar.

In Kapitel 4 wurden die hier eingesetzten numerischen Methoden erklärt und durch zwei Modellexperimente validiert. Anschließend erfolgte in Kapitel 5 die numerische Abbildung der Experimente aus Kapitel 3. Ein direkter Vergleich der gemessenen und

berechneten Temperaturen der instationären Rauchsichtbildung im Raum lieferte eine sehr gute Übereinstimmung. Die Ergebnisse der numerischen Simulationen (DES) geben einen detaillierten Einblick in das Strömungs- und Temperaturfeld. Die Rechnungen sind in der Lage, die Wechselwirkung zwischen der Rauchsicht und der Sprinkler- bzw. HDWN-Anlage wiederzugeben. Aus den beiden Untersuchungsmethoden kann festgehalten werden, dass das Sprinklersprühbild (Tropfengröße, Geschwindigkeit), Vordruck, Düsengeometrie, spezifische räumliche Beladung etc. eine nicht vernachlässigbare Rolle auf die Wechselwirkung zwischen Sprinkler und Rauchsicht bzw. auf die aufsteigende Rauchströmung aufweist. Dies wirkt sich auf die Verrauchung der Flucht- und Rettungswege aus.

Nachdem die Auswirkungen der Aktivierung ortsfester Wasserlöschanlagen auf die Rauchsicht eines Brandes experimentell sowie numerisch untersucht worden sind, konnte in einem nächsten Schritt der hinzukommende Einfluss natürlicher Rauchabzüge (NRA) untersucht werden. In Kapitel 6 wurde eine numerische Studie diesbezüglich durchgeführt. Die Ergebnisinterpretation zur numerischen Simulation lässt erkennen, dass keine bzw. je nach Rauchgastemperaturen im günstigsten Fall eine verzögerte Auslösung der Sprinkler zu erwarten ist, wenn die NRA in der Nähe des Brandes oder direkt darüber positioniert sind. Ausgangspunkt für diese Erkenntnisse ist die durch einen NRA bewirkte Ableitung der heißen Rauchgase in die äußere Umgebung und die damit verbundene Temperaturabnahme in Bereich der Sprinkler.

8 Literaturverzeichnis

- [1] D. Sheppard und D. Steppan, „Sprinkler, Heat, and Smoke Vent, Draft Curtain Project-Phase 1 Scoping Tests—Technical Report,“ Underwriters Laboratories, Inc., Northbrook, IL, 1997.
- [2] K. McGrattan, A. Hamins und D. Stroup, „International Fire Sprinkler; Smoke and Heat; Draft Curtain Fire Test Project—Large Scale Experiments and Model Development,“ National Institute of Standards and Technology, Quincy MA, 1998.
- [3] S. Liu, „Analytical and experimental study of evaporative cooling and room fire suppression by corridor sprinkler system,“ National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 1977.
- [4] H. Morgan und K. Baines, „Heat transfer from a buoyant smoke layer beneath a ceiling to a sprinkler spray. 2. An experiment.,“ *Fire and Materials*, Bd. 3, pp. 34-38, 1979.
- [5] G. Heskestad, „Sprinkler/hot layer interaction,“ National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Md., 1991.
- [6] J. Mawhinney und G. Tamura, „Effect of automatic sprinkler protection on smoke control systems,“ *ASHRAE Transactions*, Bd. 1, Nr. 100, pp. 494-513, 1994.
- [7] J. Zehfuß, O. Riese und C. Northe, „Gutachterliche Stellungnahme 18P002: Forschungs- und Entwicklungsleistungen zur Untersuchung des Brandverhaltens von Jacken/Bekleidung [Entwurf],“ VIB - Verein zur Förderung von Ingenieurmethoden im Brandschutz e. V. (z. Hd. Dr.-Ing. Matthias Siemon), Technische Universität Braunschweig, 2018.
- [8] Total Walther FEUERSCHUTZ GmbH, *Herstellerangaben/Betriebshandbuch*, 1992.
- [9] Danfoss Semco A/S, *Data Sheet No.: 001-03-00009*, 2013.

- [10] J. P. White, S. Verma, E. Keller, A. Hao, A. Trouve und A. W. Marshall, „Water mist suppression of a turbulent line fire,“ *Fire Safety Journal*, pp. 705-713, May 2017.
- [11] E. Link, T. Myers, A. Trouvé und A. Marshall, „Measurements of spray-plume interactions for model validation,“ *Fire Safety Journal*, pp. 714-722, May 2017.
- [12] R. Harish und K. Venkatasubbaiah, „Numerical study of water spray interaction with fire plume in dual chambers connected to tall shaft,“ *Fire Safety Journal*, pp. 1-10, March 2015.
- [13] M. Gupta, A. Pasi, A. Ray und S. R. Kale, „An experimental study of the effects of water mist characteristics on pool fire suppression,“ *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 768-778, 2013.
- [14] M. Gupta, R. Rajora, S. Sahai, R. Shankar, A. Ray und S. R. Kale, „Experimental evaluation of fire suppression characteristics of twin fluid water mist system,“ *Fire Safety Journal*, pp. 130-142, 2012.
- [15] Z. Wang, W. Wang und Q. Wang, „Optimization of water mist droplet size by using CFD modeling for fire suppressions,“ *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 626-632, 2016.
- [16] Y. M. Ferng und C. H. Liu, „Numerically investigating fire suppression mechanisms for the water mist with various droplet sizes through FDS code,“ *Nuclear Engineering and Design*, pp. 3142-3148, 2011.
- [17] C. A. Föhl, „Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen - Versuche,“ Forschungsbericht Nr. 138 der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, 2005.
- [18] Technisch-Wissenschaftlicher Beirat, Referat 4, Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes TV 04-01, 2. Auflage Hrsg., D. Hosser, Hrsg., Altenberge, Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), 2009.

- [19] Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN 18232-1 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 1: Begriffe, Aufgabenstellung,“ Beuth Verlag, Berlin, 2002.
- [20] K. Y. Li, L. H. Hu, R. Huo, Y. Z. Li, Z. B. Chen, S. C. Li und X. Q. Sun, „A mathematical model on interaction of smoke layer with sprinkler spray,“ *Fire Safety Journal*, June 2009.
- [21] P. L. Hinkley, „The Effect of Smoke Venting on the Operation of Sprinklers Subsequent to the First,“ *Fire Safety Journal*, pp. 221-240, 1989.
- [22] P. L. Hinkley, „The Effect of Vents on the Opening of the First Sprinklers,“ *Fire Safety Journal*, pp. 211-225, 1986.
- [23] C. L. Beyler und L. Y. Cooper, „Interaction of Sprinklers with Smoke and Heat Vents,“ *Fire Technology*, pp. 9-35, 2001.
- [24] K. Y. Li, R. Huo, J. Li und B. B. Ren, „Experimental investigation on drag effect of sprinkler spray to adjacent horizontal natural smoke venting,“ *Journal of Hazardous Materials*, pp. 512-521, 2010.
- [25] C. Zhang und W. Chow, „Numerical studies on the interaction of sprinkler and smoke layer,“ *Procedia Engineering*, pp. 453-462, 2013.
- [26] W. K. Chow und Y. L. Cheung, „Simulation of Sprinkler-Hot Layer Interaction using a Field Model,“ *Fire and Materials*, pp. 359-379.
- [27] L. Y. Cooper, „The interaction of an isolated sprinkler spray and a two-layer compartment fire environment,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 679-690, 1995.
- [28] K. Steckler, J. Quintiere und W. Rinkinen, „Flow Induced By Fire in A Compartment,“ *NBSIR*, 1982.
- [29] K. B. McGrattan, S. Hostikka, F. J. E., H. R. Baum, R. G. Rehm, W. E. Mell und R. McDermott., *Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*, Gaithersburg, Maryland, USA, 2010.

- [30] C. Westbrook und F. Dryer, „Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation,“ *Combustion Science and Technology*, Bd. 27, pp. 31-43, Juli 1981.
- [31] C. A. Föhl, „Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig betriebenen Sprinkler- und Rauch/Wärme-Abfuhr-Systemen,“ Forschungsbericht Nr. 118 der Ständigen Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, 1999.
- [32] W. K. Chow und B. Yao, „Numerical modeling for interaction of a water spray with smoke layer,“ *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, pp. 267-283.
- [33] O. Reynolds, "On the dynamical theory in incompressible viscous fluids and the determination of the criterion", London: Harrison and Sons, 1894.