



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Life Sciences

## **Einfluss von Wasserlöschsystemen auf die Evakuierung im Brandfall**

-

### **Simulation mit numerischen Ingenieurmethoden**

Bachelorarbeit

Im Studiengang Gefahrenabwehr / Hazard Control

vorgelegt von

**Frederik Buhk**



Hamburg

am 09. Dezember 2021

- 1. Gutachter:** Prof. Dr. Karsten Loer (HAW Hamburg)  
**2. Gutachter:** Dr.-Ing. Daniel Povel (DNV GL SE)

Die Abschlussarbeit wurde von der Firma DNV GL SE betreut.

## Kurzzusammenfassung

Ein Brandausbruch auf einem Passagierschiff stellt eine besondere Gefahr für die Sicherheit des Schiffs und der Personen an Bord dar. Zum Mindern der Konsequenzen im Brandfall finden Wasserlöschsysteme Anwendung. In dieser Arbeit wird mittels numerischen Ingenieurmethoden untersucht, ob Wasserlöschsysteme die sichere Evakuierungszeit im Brandfall beeinflussen.

Dafür werden zunächst die rechtlichen Grundlagen für den Brandschutz auf Schiffen abgegrenzt. Anschließend wird auf die üblichen Anwendungen von Ingenieurmethoden im Brandschutz eingegangen.

Zur Analyse des Einflusses werden mit dem Programm Fire Dynamics Simulator fünf verschiedene Modelle erstellt. Diese stellen die Rauchausbreitung eines Polstermöbelbrands in einem großen öffentlichen Bereich eines Passagierschiffs dar. Neben der Rauchausbreitung wird auch der Einfluss von Wassernebellöschsystemen in Form eines normalen Löschsystems und eines Wassernebelvorhangs auf die Rauchsichtung dargestellt. Anschließend wird verglichen, ob ein Wassernebelvorhang, ein Rauchabzugssystem oder eine Kombination beider Systeme die größte verfügbare sichere Evakuierungszeit für ein Modell mit zwei durch einen Deckenausschnitt verbundenen Decks liefert.

Mit Hilfe der Simulationen wird festgestellt, dass aus dem verwendeten Rauchabzugssystem eine längere sichere Evakuierungszeit resultiert als aus dem verwendeten Wassernebelvorhang. Aus einer Kombination beider Systeme resultiert die längste sichere Evakuierungszeit.

Die Analyse der Effektivität und des Rauchniederschlags der Systeme kann nicht generalisiert werden. Die Ergebnisse gelten für die Modelle und Systeme dieser Arbeit. Eine individuelle Analyse der verfügbaren Evakuierungszeit ist empfehlenswert.

## **Abstract**

A fire outbreak on board of a passenger ship is a major risk to the safety of the ship and the people on board. Water extinguishing systems are used to reduce the consequences in case of a fire. In this thesis numerical engineering methods are used to investigate whether water extinguishing systems influence the safe evacuation time in case of fire.

Therefore, the legal basis for fire protection is first delineated and usual applications of engineering analysis methods in the field of fire safety are shown.

The Fire Dynamics Simulator is used to analyse the influence on the smoke layering in five different models. The models are based on an upholstered furniture fire within a large public space on a passenger vessel. The simulations are showing the smoke propagation and the influence of different water mist extinguishing systems. Next to the normal extinguishing system a water mist curtain is also used around an opening in the ceiling. Afterwards it will be compared whether a water mist curtain, a smoke extraction system or even a combination of both systems lead to the longest safe evacuation time for a model with two connected decks. The connection is formed by an opening in the ceiling.

The simulations are showing that the used smoke extraction system results in a longer safe evacuation time than the water mist curtain. The longest available safe evacuation time is reached by a combination of both systems.

The effectivity and the smoke precipitation of the systems can not be generalised. Since the outcome of the simulations depends strongly on the used models and systems. An individual analysis for the available safe evacuation time is recommended.

## **Vorwort**

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Hervorzuheben sind dabei insbesondere Herr Prof. Dr. Karsten Loer, der mich seitens der HAW Hamburg betreut hat und Herr Dr.-Ing. Daniel Povel von dem Unternehmen DNV GL SE, der mir ermöglicht hat, die Arbeit mit dem Unternehmen zu schreiben und mir insbesondere bei fachlichen Fragen zur Seite stand.

Auch den weiteren Mitarbeitern aus dem Team Risk Assessment der Maritime Advisory in Hamburg gilt ein besonderer Dank. Ich durfte während meines Praxissemesters und meiner Bachelorarbeit viel von ihnen lernen und auch meine eigenen Gedanken und mein Wissen an diversen Stellen mit einbringen.

Nicht zuletzt gilt mein Dank natürlich auch meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht und mich immer unterstützt haben.

Abschließend gilt mein Dank allen weiteren Personen, mit denen ich im Rahmen meines Studiums zusammengearbeitet habe. Wir haben viel mit und voneinander gelernt.

Aufgrund der besseren Lesbarkeit wurde auf eine gegenderte Sprache verzichtet. Personenbezeichnungen gelten immer für alle Geschlechter.

# Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung .....	1
Abstract .....	2
Vorwort .....	3
Abbildungsverzeichnis .....	5
Tabellenverzeichnis .....	6
Abkürzungsverzeichnis .....	7
1 Einleitung .....	8
2 Theoretische Grundlagen und Problemdarstellung .....	9
2.1 Wichtige Richtlinien für den Brandschutz auf Passagierschiffen .....	9
2.2 Brandentwicklung .....	10
2.3 Verhalten von Brandrauch in geschlossenen Räumen .....	12
2.4 Wasserlöschsysteme .....	14
2.5 Begriffsdefinition Evakuierung .....	16
2.6 Ermittlung der Evakuierungszeit .....	17
3 Methodik .....	20
3.1 Numerische Ingenieurmethoden .....	20
3.2 Entwicklung der Simulationsmodelle .....	21
3.2.1 Geometrie der Modelle .....	22
3.2.2 Brandszenario .....	23
3.2.3 Bemessung der Löschsysteme .....	25
3.2.4 Bemessung des Rauchabzugssystems .....	27
3.2.5 Zusammenfassung der Modelle .....	28
4 Ergebnisse .....	30
4.1 Simulation 1 und 2 – Einfluss vom Wasserlöschsystem bei einem Deck .....	30
4.2 Simulation 3 – Einfluss des Wassernebelvorhangs .....	37
4.3 Simulation 4 – Einfluss des Rauchabzugssystems .....	41
4.4 Simulation 5 – Einfluss und gegenseitige Beeinflussung des Wassernebelvorhangs und Rauchabzugssystems .....	44
5 Diskussion und Ausblick .....	49
Literaturverzeichnis .....	53

Anhang .....	I
A Exemplarischer FDS Code .....	I
B Abbildungen Raster – Wassernebelldüsen und Rauchmelder .....	XIV
a Abstände und Raster des Wassernebellöschsystems .....	XIV
b Positionen der Düsen des Wassernebelvorhangs.....	XIV
c Abstände und Raster der Rauchmelder .....	XV
C Temperaturverläufe an den Ausgängen .....	XVI
Eigenständigkeitserklärung .....	XVIII

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Brandphasen für natürlichen Brand, verändert durch F. Buhk nach Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes [11] .....	11
Abbildung 2: Darstellung der Plume und des Ceiling-Jets [12], beschriftet durch F. Buhk .....	13
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Rauchsichten .....	14
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Evakuierungszeit nach Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes [11] und Engineering Data in SFPE Handbook of Fire Safety Engineering [21].....	19
Abbildung 5: Grundfläche der Geometrien .....	23
Abbildung 6: Position des Deckenausschnitts .....	23
Abbildung 7: Simulation 1 - Wärmefreisetzungsrates/Brandverlauf .....	31
Abbildung 8: Simulation 2 - Wärmefreisetzungsrates/Brandverlauf .....	32
Abbildung 9: Simulation 2 - Plume bei t=10 s (links) sowie Plume und Rauchsicht bei t=30 s (rechts).....	32
Abbildung 10: Simulation 2 - Rauchausbreitung nach 30, 40, 60 und 90 s (von links nach rechts und oben nach unten), Schnitthöhe 2,39 m .....	33
Abbildung 11: Simulation 1 (links) und 2 (rechts) - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 30, 60, 90 und 120 s, Höhe 2 m, (rot $\leq$ 10 m; grün = Akzeptanzbereich).....	34
Abbildung 12: Simulation 2 - Niederschlag des Brandrauches durch Wassernebellöschsystem nach 70 und 90 s, Schnittebene y=12 m.....	35
Abbildung 13: Simulation 1 (links) und 2 (rechts) - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 90, 105, 120 und 135 s, Höhe 2 m, (rot $\geq$ 60 °C; grün = Akzeptanzbereich).....	36
Abbildung 14: Simulation 3 - Wärmefreisetzungsrates/Brandverlauf .....	37
Abbildung 15: Simulation 3 - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 50, 80, 110 und 140 s, Höhe 2 m (links) und 4,6 m (rechts), (rot $\leq$ 10 m; grün = Akzeptanzbereich).....	38

Abbildung 16: Simulation 3 – Einfluss des Wassernebelvorhangs auf die Ausbreitung des Brandrauches nach 30, 60 und 90 s, Schnittebene $y=18$ m .....	39
Abbildung 17: Simulation 3 - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 120 s, Höhe 2 m, (rot $\geq 60$ °C; grün = Akzeptanzbereich).....	40
Abbildung 18: Simulation 4 - Wärmefreisetzungsrates/Brandverlauf .....	41
Abbildung 19: Simulation 4 - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 50, 80, 110 und 140 s, Höhe 2 m (links) und 4,6 m (rechts), (rot $\leq 10$ m; grün = Akzeptanzbereich).....	42
Abbildung 20: Simulation 4 – Einfluss des Rauchabzugssystems auf die Ausbreitung des Brandrauches nach 30, 60 und 90 s, Schnittebene $y=18$ m .....	43
Abbildung 21: Simulation 4 - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 120 s, Höhe 2 m, (rot $\geq 60$ °C; grün = Akzeptanzbereich).....	44
Abbildung 22: Simulation 5 - Wärmefreisetzungsrates/Brandverlauf .....	45
Abbildung 23: Simulation 5 - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 50, 80, 110 und 140 s, Höhe 2 m (links) und 4,6 m (rechts), (rot $\leq 10$ m; grün = Akzeptanzbereich).....	46
Abbildung 24: Simulation 5 – Einfluss des Wassernebelvorhangs und des Rauchabzugssystems auf die Ausbreitung des Brandrauches nach 30, 60 und 90 s, Schnittebene $y=18$ m.....	47
Abbildung 25: Simulation 5 - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 120 s, Höhe 2 m, (rot $\geq 60$ °C; grün = Akzeptanzbereich).....	47

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Kriterien für die sichere Evakuierung [5] .....	18
Tabelle 2: Ermittlung der ASET Zeiten für die Simulationen .....	49

## Abkürzungsverzeichnis

ASET	Available Safe Egress Time - verfügbare sichere Evakuierungszeit
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
FSS Code	International Code for Fire Safety Systems
HRR	Heat Release Rate - Wärmefreisetzungsrate
IMO	International Maritime Organization
MVZ	Main Vertical Zone - Brandabschnitt
NIST	National Institute of Standards and Technology
PU	Polyurethan
RSET	Required Safe Egress Time – benötigte sichere Evakuierungszeit
RTI	Response-Time-Index (Ansprechzeit von Sprinklerdüsen)
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
USCG	U.S. Coast Guard
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes

# 1 Einleitung

Die Problemstellung dieser Arbeit entstand im Rahmen meines Praxissemesters bei DNV GL SE. Durch das Aufeinandertreffen eines alternativen Designs bei Passagierschiffen in Form großer Brandabschnitte mit einem Deckenausschnitt, der kleiner als 30 % des Raumes ist, tritt häufig eine Kombination von Wasserlöschsystemen und Rauchabzugssystemen auf. Die U.S. Coast Guard fordert mit der Vorgangsnummer „SOLAS-13“ einen Sprinklervorhang für Deckenausschnitte, die kleiner als 30 % sind. Bei großen Brandabschnitten kommt im Rahmen des Alternativen Designs und Arrangements als Risikominderungsmaßnahme häufig ein Rauchabzugssystem zum Einsatz.

Die Fragestellungen, welche Einflüsse die Systeme aufeinander und auf die sichere Evakuierung im Falle eines Brandes haben, treten immer wieder auf. Diese Einflüsse sollen im Rahmen dieser Arbeit mit numerischen Ingenieurmethoden simuliert und im Anschluss analysiert werden. Dabei wird insbesondere auf die Verwirbelung der Rauchsichtung durch Wasserlöschsysteme eingegangen.

Neben dem normalen Löschesystem für öffentliche Bereiche auf Passagierschiffen wird auch der Einfluss eines Wassernebelvorhangs um einen Deckenausschnitt herum betrachtet und mit der Wirkung eines Rauchabzugssystems verglichen. Die Gegenseitige Beeinflussung eines Wassernebelvorhangs und Rauchabzugssystems wird zusätzlich betrachtet und bewertet.

Das Ziel ist es zu untersuchen, ob eine Kombination oder eine frühe Auslösung der Wasserlöschsysteme ein Sicherheitsrisiko für Passagiere darstellt.

Für die Simulationen wird der *Fire Dynamic Simulator* (FDS), welcher vom *National Institute of Standards and Technology* (NIST) herausgegeben wurde, verwendet.

## 2 Theoretische Grundlagen und Problemdarstellung

Für Schiffe und die Passagiere ist eine der größten Gefahren ein Brandausbruch an Bord. Dadurch, dass ein Schiff die meiste Zeit in einiger Entfernung zum Festland unterwegs ist, muss ein Feuer durch automatische Löschsyste me und die Crew unter Kontrolle gebracht werden. Bis zum Eintreffen von externen Kräften kann viel Zeit vergehen [1]. Um die Gefährdung zu minimieren, sollte die verfügbare sichere Evakuierungszeit von den einzelnen Brandabschnitten möglichst groß sein.

Die in Kapitel 2.5 beschriebene verfügbare Evakuierungszeit wird maßgeblich durch den Brandverlauf und die resultierende Rauchentwicklung beeinflusst. In dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern ein Niederschlagen des Brandrauchs durch Wasserlöschsysteme einen Einfluss auf eine sichere Evakuierung hat.

Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Grundlagen der unterschiedlichen Brandphasen, Rauchschichten und Wasserlöschsysteme dienen als Grundlage zur Aufstellung der Simulations-Modelle. Zudem wird der Begriff der Evakuierung definiert und die Bemessung der Evakuierungszeit für Passagierschiffe beschrieben.

### 2.1 Wichtige Richtlinien für den Brandschutz auf Passagierschiffen

Der Brandschutz von Passagierschiffen ist durch internationales Recht geregelt. Das wichtigste internationale Übereinkommen ist dabei die *International Convention for Safety of Life at Sea* (SOLAS) [2]. Das Kapitel II-2 der SOLAS handelt ausschließlich vom Brandschutz auf Schiffen. Neben dem vorbeugenden Brandschutz geht es auch um die Branddetektion und Brandbekämpfung.

In dem Kapitel II-2 sind unterschiedliche Bereiche von Schiffen definiert. Basierend auf der Definition und Nutzung der Bereiche werden Anforderungen an den Brandschutz gestellt. Dazu zählen neben der Bemessung der Brandschutzklassen von Bauteilen und Trennwänden auch die Erforderlichkeit von automatischen Löschanlagen und Detektionssystemen.

Zusätzlich zu den durch die SOLAS geschaffenen Grundlagen sind weitere Richtlinien und Regelungen der *International Maritime Organization* (IMO) für den Brandschutz relevant. Für diese Arbeit haben die Richtlinien *International Code for Fire Safety*

*Systems (FSS Code) [3], Resolution A.800(19) -Revised Guidelines for Approval of Sprinkler Systems Equivalent to that Referred to in SOLAS Regulation II-2/12 [4] und MSC.1/Circ. 1552 Amendments to the Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety (MSC/CIRC.1002) [5] besondere Relevanz.*

Der Flaggenstaat der Schiffe kann zusätzliche Anforderungen zu denen der SOLAS stellen. Die *U.S. Coast Guard* (USCG) fordert beispielsweise mit der Vorgangsnummer SOLAS-13 einen Sprinkler-Vorhang (sprinkler curtain) um Deckenöffnungen, die kleiner als 30 % der Deckenfläche sind [6].

Zusätzlich wird sich auf anerkannte, nicht maritime Richtlinien und Regelungen aus dem Bereich des Brandschutzes bezogen.

## **2.2 Brandentwicklung**

Die Verbrennung ist eine chemische Reaktion. Gestartet wird die Oxidation durch eine Aktivierungsenergie. Dabei reagiert Sauerstoff mit einem Brennstoff und es wird Energie in Form von Wärme frei. Für eine saubere Verbrennung müssen Brennstoff, Sauerstoff und Aktivierungsenergie in dem richtigen Verhältnis vorliegen. Bei einer idealen Verbrennung treten die Verbrennungsprodukte Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Wasser (H<sub>2</sub>O) und Energie sowie zusätzliche stoffspezifische Produkte auf [7,8]. Bei einem ungünstigen Verhältnis der Edukte kann es zu einer unvollständigen Verbrennung kommen. Diese wird insbesondere durch eine Variation der Verbrennungstemperatur oder eine geringe Sauerstoffkonzentration am Brandherd hervorgerufen. Dabei entstehen als zusätzliche Produkte Kohlenstoffmonoxid (CO) und Ruß. Bei unvollständiger Verbrennung kommen neben CO und Ruß noch weitere Stoffe wie zum Beispiel krebserregende Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe vor. Die Produkte der Verbrennung hängen stark von dem Brennstoff ab [9].

Die Brandentwicklung und der weitere Brandverlauf lassen sich in unterschiedliche Brandphasen unterteilen. Die Phasen werden durch die zeitliche Entwicklung der Wärmefreisetzungsrates („Heat Release Rate“ – HRR) und der Brandfläche beschrieben. Die HRR ist maßgeblich abhängig von Brandlast, Brandausbreitungsgeschwindigkeit sowie Löschmaßnahmen durch Löschsysteme oder Brandbekämpfungseinheiten [10].

Die erste Brandphase beschreibt die Brandentstehung. Diese Phase ist durch eine niedrige Wärmefreisetzungsrate gekennzeichnet. Zudem ist die Verbrennung in dieser Phase meist unvollständig. Es kommt zu keiner stabilen Flammenbildung und einer starken Rauchproduktion. Die zweite Phase, die Brandentwicklungsphase, beginnt mit dem Ausbilden einer stabilen Flamme. Während der Brandentwicklungsphase nehmen die Wärmefreisetzungsrate und die Brandfläche quadratisch zu. Die Brandentwicklungsphase geht in die Vollbrandphase über. Diese Phase ist durch eine konstante Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche gekennzeichnet. Nach einiger Zeit kommt es schließlich zum abklingenden Brand. Dieser wird erreicht, wenn etwa 70 % der Brandlast verbrannt sind oder wirksame Löschmaßnahmen durchgeführt werden [10,11]. In der VDI 6019 beschreibt eine zusätzliche Brandphase den kontrollierten Brand bei einer aktivierten Löschanlage [10].

In Abbildung 1 ist der Brandverlauf eines Naturbrandes zu sehen. Der Verlauf beginnt erst mit der Brandentwicklungsphase und nicht mit der Brandentstehungsphase. Die Brandentstehung oder auch Schwelbrandphase ist einerseits schwer zu ermitteln. Je nach Umgebungsbedingungen kann es bis zur Ausbildung einer stabilen Flamme von Minuten bis zu Stunden dauern. Andererseits lassen sich Brände in dieser Phase gut über Rauchwarnmelder detektieren. In den Ingenieurmethoden wird eine Simulation der ersten Phase deshalb nicht für erforderlich gehalten [11].

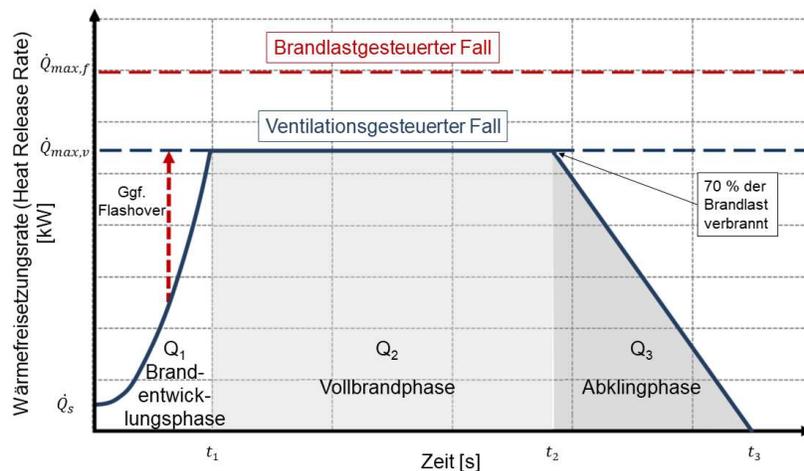


Abbildung 1: Brandphasen für natürlichen Brand, verändert durch F. Buhk nach Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes [11]

Bei einem ventilationsgesteuerten Brand wird in der Vollbrandphase die Verbrennung durch die Menge an verfügbarem Sauerstoff reguliert. Aufgrund einer geringeren Sauerstoffkonzentration am Brandherd findet eine unvollständige Verbrennung statt. Dies führt zu einer erhöhten Rauchproduktion und geringer Wärmefreisetzung. Beim brandlastgesteuerten Brand hingegen ist genügend Sauerstoff verfügbar. Die Verfügbarkeit der Brandlast steuert die Verbrennung. Diese Art der Verbrennung ist beispielsweise am Übergang zwischen der Vollbrand- und Abklingphase zu beobachten. Die HRR sinkt, da 70 % der Brandlast verbrannt sind [11].

Der zuvor betrachtete allgemeine Brandverlauf kann durch diverse Faktoren beeinflusst werden, woraus sich unterschiedliche Brandarten ergeben. Es wird im Wesentlichen zwischen zwei Brandarten unterschieden. Brände mit einer kleinen Brandfläche und niedriger Wärmefreisetzungsrates werden als *niedrigenergetische Brände* bezeichnet. Der typische Brandverlauf eines niedrigenergetischen Brandes beschränkt sich auf die Entstehungsphase. Durch die Auslösung einer automatischen Löschanlage wird die Entwicklung und Ausbreitung gehemmt. Durch die Löschanlage bleibt die HRR gering und wird schließlich durch wirksame Löschmaßnahmen von Brandbekämpfungseinheiten beendet. *Hochenergetische Brände* hingegen bezeichnen einen Brandverlauf mit hoher Wärmefreisetzungsrates. Die Auslegung von Rauchabzugssystemen wird beispielsweise anhand hochenergetischer Brände ermittelt. Die Betrachtung des hochenergetischen Brandes beginnt üblicherweise erst mit der Entwicklungsphase. Der Verlauf nach der Vollbrandphase wird maßgeblich von den automatischen und manuellen Löschmaßnahmen beeinflusst [10].

### **2.3 Verhalten von Brandrauch in geschlossenen Räumen**

Wie eingangs beschrieben hat der Brandrauch einen maßgeblichen Einfluss auf die Evakuierungszeit. Durch Faktoren wie Temperatur, Toxizität und Sichtbehinderung wird eine sichere Evakuierung durch den Brandrauch gefährdet.

Es ist erforderlich die Grundlagen der Rauchentwicklung und das Verhalten des Brandrauchs in geschlossenen Räumen zu verstehen, um eine Bewertung der Simulationsergebnisse durchführen zu können.

Zu Beginn der Rauchentwicklung ist die Plume und der Ceiling-Jet eindeutig zu sehen. Die Plume ist der Massen- und Wärmestrom oberhalb der Brandquelle. Dabei

steigen heiße Rauchgase unter die Decke auf. An der Decke werden die heißen Brandgase abgelenkt und breiten sich an der Decke aus. Der Strom entlang der Decke wird als Ceiling-Jet bezeichnet [12]. Die Plume und der Ceiling-Jet sind in Abbildung 2 zu sehen.

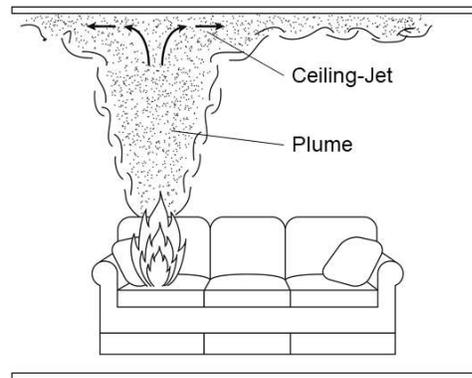


Abbildung 2: Darstellung der Plume und des Ceiling-Jets [12], beschriftet durch F. Buhk

Wird weiterer Brandrauch in Form der Plume nachgeführt so breitet sich der Rauch an der Decke durch den Ceiling-Jet weiter aus. Trifft der Ceiling-Jet an eine Wand, so wird dieser nach unten abgelenkt und der Rauch setzt sich unter dem Rauch an der Decke ab. Dadurch entsteht mit fortlaufender Zeit eine Rauchschiicht. Die Rauchschiicht gewinnt durch zu Zuführung von Rauch an Dicke.

Durch Rauchabzüge und andere Lüftungsmöglichkeiten kann die Rauchschiichtdicke begrenzt werden. Findet keine Begrenzung statt, so erreicht die Rauchschiicht nach einiger Zeit entweder den Boden oder die Brandquelle und erstickt diese durch den Mangel an Sauerstoff.

Die Schicht unter der Rauchschiicht ist die raucharme Schicht. Diese sollte für eine sichere Evakuierung im Brandfall möglichst lange möglichst hoch sein. Die Plume, Rauchschiicht und raucharme Schicht sind in der Abbildung 3 zu sehen.

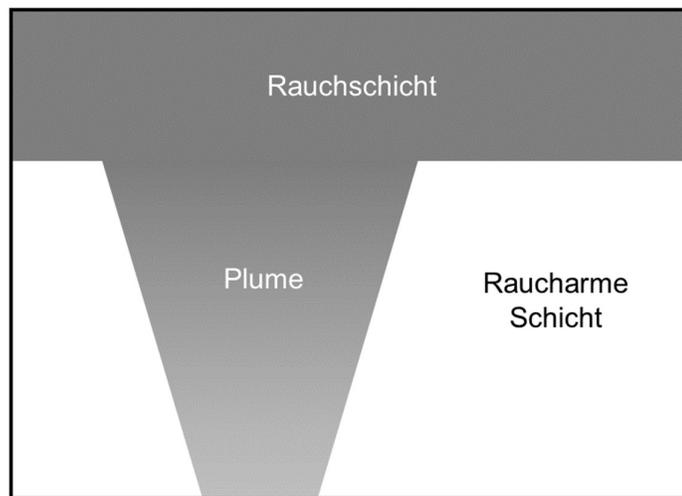


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Rauchsichten

Es kann dazu kommen, dass die Rauchschicht durch Wasserlöschsysteme, Lüftungsanlagen oder andere Strömungen zerstört wird oder sich gar nicht erst ausbildet. Die Gefahren, die von dem Brandrauch ausgehen, sind neben der gestörten Sicht auch die Toxizität und die Temperatur. Personen sollten sich deshalb immer in der raucharmen Schicht aufhalten.

## 2.4 Wasserlöschsysteme

Wasserlöschsysteme oder auch Wasserlöschanlagen gehören zu der Kategorie der ortsfesten Feuerlöschanlagen. Zu den Wasserlöschsystemen gehören neben Sprinkler-Anlagen, Sprühwasser-Anlagen und Wassernebel-Löschanlagen auch Wandhydranten [13,14]. Auf diese wird im Folgenden nicht weiter eingegangen.

Grundsätzlich wird bei Löschwasseranlagen zwischen „trocken“, „nass/trocken“ und „nass“ unterschieden. Die trockenen Anlagen sind dabei für eine manuelle Einspeisung gedacht. „Nass/trocken“ Löschanlagen werden entweder durch eine Brandmeldeanlage gesteuert mit Wasser gefüllt (auch: offenes System) oder sind mit einem Gas gefüllt und mit einem Druckschalter ausgestattet. Wird ein Ventil oder eine Düse geöffnet, findet ein Druckabfall statt und die Anlage wird mit Wasser gefüllt. Löschanlagen der Klasse „Nass“ sind dauerhaft mit Wasser gefüllt (auch geschlossenes System). Dieses System bringt eine schnelle Ansprechzeit mit sich, bedarf aber auch besonderer Aufmerksamkeit in frostgefährdeten Bereichen. Deshalb

werden manche Ableger von Löschanlagen der Kategorie „nass“ auch als „nass/trocken“ ausgelegt [13,14].

Sprinkleranlagen dienen der örtlichen Brandbekämpfung. Die Sprinklerköpfe/Düsen sind mit einer Flüssigkeit gefüllten Glaskörpern oder Schmelzlot ausgestattet. Bei einer spezifischen Auslösetemperatur wird durch das Platzen des Glaskörpers oder dem Schmelzen des Schmelzlots der Sprinklerkopf geöffnet und das Löschwasser wird versprüht [13,14].

Sprühwasseranlagen sind meist als Trocken- oder Nass/Trockenanlagen ausgeführt. Die Düsen ähneln denen einer Sprinkleranlage. Sie besitzen jedoch keinen Glaskörper oder Schmelzlot. Die Auslösung der Anlage erfolgt manuell über die Einspeisung, eine manuelle Auslösung oder über eine Brandmeldeanlage. Es werden im Vergleich zur Sprinkleranlage keine einzelnen Düsen aktiviert. Die Auslösung erfolgt immer in Gruppen oder für den ganzen Raum [13,14].

Bei Wassernebellöschanlagen wird das Löschwasser als Löschmittel in Tropfen mit einem Durchmesser kleiner als einem Millimeter ausgebracht [11]. Der Durchmesser der Tropfen wird einen Meter unterhalb der Düse gemessen [15]. Wassernebellöschanlagen werden nach dem Anlagenbetriebsdruck unterschieden. Anlagen mit einem Betriebsdruck kleiner als 12,5 bar werden als Niederdruck-Anlagen bezeichnet. Zwischen 12,5 bar und 35 bar spricht man von Mitteldruck-Anlagen. Ab einem Betriebsdruck von 35 bar ist die Anlage als Hochdruck-Anlage eingestuft. Der Druck wird durch unterschiedliche technische Umsetzungen erreicht. Neben der Möglichkeit den Anlagenbetriebsdruck über Druckbehälter zu erreichen, kann auch eine Druckwasserpumpe oder eine Druckluftpumpe verwendet werden. Es wird zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden. Bei einem geschlossenen System findet die Aktivierung des Wassernebellöschsystems über die Düsen selbst statt. Dabei erfolgt die Öffnung einzelner Düsen wie bei den Sprinklern über Glaskörper oder Schmelzlot. Bei einem offenen System hingegen erfolgt die Aktivierung ganzer Gruppen oder Bereiche über die Brandmeldeanlage oder manuelle Auslösung [11,15].

In der SOLAS II-2 Regulation 10.6.1.1 werden Sprinklersysteme für Passagierschiffe mit mehr als 36 Passagieren für Kontrollstationen, Flure und Treppenhäuser sowie Unterkunfts- und Betriebsräume gefordert. Dabei gehören nach Definition zu den

Unterbringungsbereichen (Accommodation spaces) auch öffentliche Bereiche (public spaces) wie zum Beispiel Restaurants, Friseursalons und Veranstaltungsräume. Die Sprinkleranlage soll mit den Anforderungen des FSS Codes übereinstimmen [2]. Neben der allgemeinen Ausführung der Komponenten sind im FSS Code auch die Ausfallsicherheit und die Anzahl der vorzuhaltenden Ersatzsprinklerköpfe geregelt [3].

Gemäß der SOLAS und des FSS Code findet keine Regelung von Wassernebellöschsystemen, welche in den Modellen Anwendung finden sollen, statt [2,3]. In der Resolution A.800(19) [4] werden die Richtlinien für Löschsysteme, die äquivalent zu den in SOLAS II-2/12 sind, aufgestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Resolution A.800(19) im Jahre 1995 erschien. Somit bezieht sich die Angabe auf die SOLAS von 1974. In der aktuellen SOLAS sind die Anforderungen an Sprinkler an anderer Stelle zu finden. In der Resolution A.800 (19) werden die Kriterien für Wassernebellöschsysteme, wie sie in den Simulationen verwendet werden sollen, aufgeführt. Neben den Anforderungen an das Wassernebellöschsystem ist auch die Durchführung der für die Zulassung erforderlichen Tests beschrieben [4].

## **2.5 Begriffsdefinition Evakuierung**

Für den Begriff der Evakuierung werden in ähnlichen Fachbereichen unterschiedliche Definitionen verwendet. Um Missverständnisse auszuschließen und eine Definition für diese Arbeit festzulegen, werden zunächst nationale und internationale Definitionen aufgezeigt und anschließend die in dieser Arbeit verwendete Definition festgelegt.

Im Bereich des Katastrophenschutzes in Deutschland wird zwischen einer Räumung und einer Evakuierung unterschieden. Eine Räumung „bezeichnet [...] das ungeplante und kurzfristige Verlassen eines Gebietes bei akuter Gefahr“ [16, Seite 41]. Als Beispiel kann hier das Verlassen eines Gebäudes im Brandfall mit spontaner Alarmierung durch eine Brandmeldeanlage aufgeführt werden. Von einer Evakuierung hingegen wird gesprochen, wenn es sich um eine geplante Verbringung aus einem Gefährdungsbereich in einen sicheren Aufenthaltsbereich handelt. Beispielsweise bei Bombenentschärfungen werden Evakuierungsbereiche geplant und die Bewohner gezielt an sicheren Orten untergebracht [16].

In der ISO 13943 [17] sind Definitionen des Brandschutzes festgeschrieben. Der Begriff Evakuierung ist nicht direkt definiert. Die Evakuierungszeit ist jedoch als „Zeitintervall zwischen dem Zeitpunkt, zu dem eine Brandmeldung an die Nutzer eines Gebäudes übermittelt wird, und dem Zeitpunkt, zu dem die Nutzer [...] einen sicheren Ort erreichen“ [17, Seite 26], definiert. Wird lediglich der Prozess betrachtet, so kann das spontan durch die Brandmeldung ausgelöste Verlassen des gefährdeten Bereichs als Definition der Evakuierung angenommen werden.

Die Definition der Evakuierungszeit in dem MSC.1/Circ.1552 [5] ist vergleichbar mit der in der ISO genannten. Die Evakuierungszeit wird dort als Zeit vom Feueralarm bis die letzte Person aus dem Bereich einen sicheren Bereich erreicht, definiert. Als sichere Bereiche werden andere Brandabschnitte (im maritimen Bereich: „Main Vertical Zone“ – MVZ) oder sichere Treppenträume verstanden.

Aufgrund der internationalen maritimen Ausrichtung dieser Arbeit wird die zuvor genannte Definition basierend auf der ISO 13943 [17] und MSC.1/Circ.1552 [5] verwendet. Eine Evakuierung beschreibt das spontane, durch eine Brandmeldung ausgelöste, Verlassen eines gefährdeten Bereichs.

## **2.6 Ermittlung der Evakuierungszeit**

Durch die in Kapitel 2.1 genannten Richtlinien soll die Sicherheit von Passagieren und Crew gewährleistet werden. Insbesondere bei Passagierschiffen gelten hohe Anforderungen an die Sicherheit. Diese sind unter anderem mit der Annahme zu begründen, dass Passagiere sich, im Gegensatz zu einer Crew die regelmäßig auf einem Schiff tätig ist, schlecht auf dem Schiff und mit dem Verhalten im Falle eines Brandes auskennen. Aus Experimenten für Gebäude lässt sich schließen, dass für ein Schiff mit Passagieren demnach eine längere Zeit zur Evakuierung benötigt wird, als für das gleiche Schiff mit einer Besatzung die regelmäßig an Bord ist [18].

Bei Schiffen, die nach der SOLAS gebaut werden, wird davon ausgegangen, dass die notwendigen Schutzziele erreicht werden. Handelt es sich jedoch um ein alternatives Design werden Schutzziel orientierte Methoden zur Analyse der Sicherheit verwendet. Alternative Designs und Arrangements sind gemäß MSC/Circ.1002 – *Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety* Abweichungen von den

Brandschutzrichtlinien der SOLAS, welche dennoch, gegebenenfalls durch weitere Maßnahmen, eine gleiche oder bessere Sicherheit im Vergleich zum Referenzdesign der SOLAS bieten [19].

Stand der Technik und Wissenschaft zur Bemessung der Evakuierung ist der Vergleich der verfügbaren Evakuierungszeit *ASET* (Available Safe Egress Time) mit der benötigten Evakuierungszeit *RSET* (Required Safe Egress Time). Eine ausreichende Sicherheit liegt vor wenn:

$$ASET > RSET$$

Die ASET wird mithilfe von Ingenieurmethoden bestimmt. Brandsimulationen dienen in diesem Fall zur Berechnung der Zeit zwischen Brandausbruch und Grenzwertüber- oder -unterschreitung der Performance-Kriterien. Für die öffentlichen Bereiche sind die Grenzwerte an den Flucht- und Rettungswegen in einer Höhe von zwei Metern zu messen. Es gilt der Zeitpunkt, zu dem sowohl der primäre als auch der sekundäre Flucht- und Rettungsweg nicht mehr verfügbar ist. In Tabelle 1 sind die aus MSC.1/Circ.1552 resultierenden Grenzwerte zu sehen [5].

*Tabelle 1: Kriterien für die sichere Evakuierung [5]*

<b>Kriterium</b>	<b>Grenzwert</b>
Maximale Umgebungsluft Temperatur	60 °C
Maximaler Wärmestrahlungsstrom	2,5 kW/m <sup>2</sup>
Minimale Sichtweite	10 m; 5 m in Bereichen ≤ 100 m <sup>2</sup>
Maximale CO Konzentration	1200 ppm (unmittelbare Exposition); 500 ppm (für 20 min kumulative Exposition)

Die RSET setzt sich wie in Abbildung 4 zu sehen aus der Premovement-Zeit und der Laufzeit zusammen. Dabei lässt sich die Premovement-Zeit in die Detektionszeit, Alarmierungszeit und Reaktionszeit unterteilen. Die Detektionszeit beschreibt im Brandfall die Zeit zwischen dem Brandausbruch und der Detektion des Brandes. Die Zeitspanne zwischen der Detektion und der Alarmierung der sich im Gefährdungsbereich befindlichen Personen wird als Alarmierungszeit bezeichnet.

Darauf folgt die individuelle Reaktionszeit und schließlich die individuelle Laufzeit bis in einen sicheren Bereich [11,20,21].

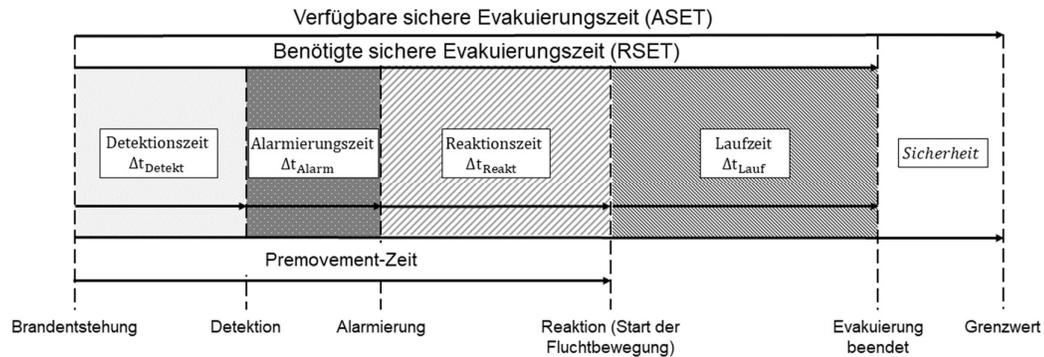


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Evakuierungszeit nach Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes [11] und Engineering Data in SFPE Handbook of Fire Safety Engineering [21]

Zur Ermittlung der RSET können Handrechenverfahren oder Evakuierungssimulationen verwendet werden. Bei der Reaktionszeit und Personenbelegung wird beispielsweise zwischen Tag und Nacht unterschieden [3]. Zudem haben die individuellen Voraussetzungen einen großen Einfluss auf die individuelle Evakuierungszeit. Durch wiederholte Durchläufe von Evakuierungssimulationen können die individuellen Einflüsse statistisch mit berücksichtigt werden [20].

Nach der SOLAS sind, wenn nicht anders gefordert, immer mindestens zwei voneinander unabhängige Flucht- und Rettungswege aus jedem Bereich sicherzustellen [2]. Diese sind bei den Evakuierungsanalysen in verschiedenen Simulationsszenarien zu berücksichtigen [22].

Die ASET und die Grenzwerte werden in dieser Arbeit verwendet, um den Einfluss der Systeme auf die Evakuierungszeit im Brandfall miteinander vergleichen zu können. Die RSET wurde vollständigshalber mit aufgeführt, wird im Folgenden jedoch nicht weiter betrachtet.

## 3 Methodik

### 3.1 Numerische Ingenieurmethoden

Numerische Ingenieurmethoden beschreiben Gleichungssysteme, welche einen so hohen Grad der Komplexität haben, dass sie nur numerisch gelöst werden können. Die Algorithmen zum Lösen dieser Gleichungen stecken in der Regel in einem Simulationsprogramm. Die mathematischen Modelle lassen sich grundsätzlich in deterministische und probabilistische Modelle differenzieren. Dabei basieren die deterministischen Modelle auf physikalischen Gesetzen und beschreiben die Brandentwicklung und den Verlauf eines Brandes. Die probabilistischen Modelle hingegen basieren auf einem statistischen Ansatz. Da diese aktuell im Bereich der Ingenieurmethoden und für diese Arbeit nicht in Frage kommen, wird darauf nicht weiter eingegangen [11].

Deterministische Modelle werden im Leitfaden der Ingenieurmethoden des Brandschutzes von der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) in Zonenmodelle, CFD-Modelle (von engl.: Computational Fluid Dynamics) und empirisch belegte Ansätze unterteilt. Die empirisch belegten Ansätze werden durch Experimente gewonnen. Die resultierenden Gleichungen beziehen sich dabei immer auf eine bestimmte Fragestellung [11].

Zonenmodelle basieren auf vereinfachten Gleichungen der Strömungs- und Thermodynamik. Bei der Untersuchung von Rauchsichten werden die einzelnen Rauchsichten beispielsweise jeweils als eine Masse beschrieben. Die Einzelnen Zonen oder auch Rauchsichten werden also sehr vereinfacht betrachtet. Der Massen- und Energieübergang findet immer zwischen den Zonen statt. Bewegungen und Turbulenzen innerhalb einer Rauchsicht werden demnach nicht berücksichtigt. Bei einer stabilen Rauchsichtung können Zonenmodelle für gute Näherungen mit weniger Rechenleistung verwendet werden [11]. Die Realität und die in dieser Arbeit zu betrachtenden Einflüsse werden jedoch besser durch CFD-Modelle dargestellt. Deshalb wird nicht weiter auf Zonenmodelle eingegangen.

CFD-Modelle basieren auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten aus den Bereichen der Strömungslehre und Thermodynamik. CFD-Modelle finden in unterschiedlichen Bereichen des Ingenieurwesens Anwendung. Üblicherweise werden die

Simulationsprogramme Anwendungsspezifisch erstellt. Brandsimulationen liegen insbesondere Kontinuitätsgleichungen zur Erhaltung von Energie, Masse und Impulsen aus dem Bereich der Strömungs- und Thermodynamik zu Grunde [11].

Für die numerische Lösung der Modelle findet zunächst eine räumliche Diskretisierung statt. Dafür wird ein dreidimensionales Rechengitter konstruiert, welches aus einer Vielzahl einzelner Zellen besteht [11]. Für die Simulationen im Rahmen dieser Arbeit wurde der betrachtete Bereich in Quader in einem kartesischen Koordinatensystem aufgeteilt. Die Performanz und Genauigkeit der Simulation können durch die Größe der einzelnen Zellen beeinflusst werden. Beispielsweise gelingt die Darstellung kleinerer Turbulenzen durch die Auflösung der Zellen häufig nicht. Die Effekte dieser Turbulenzen werden durch entwickelte Turbulenzmodelle dennoch ohne explizite Berechnung berücksichtigt [11].

Neben der räumlichen erfolgt auch eine zeitliche Diskretisierung diese gelingt dadurch, dass die Veränderungen der Kontinuitätsgleichungen immer in kleinen Zeitschritten erfolgt. Durch die Diskretisierung kann eine Integration über endliche Volumina und Zeitintervalle durchgeführt werden.

Das in dieser Arbeit verwendete Programm zur Erstellung der CFD-Modelle ist „*Fire Dynamics Simulator*“ (FDS). Das Programm wurde im Jahre 2000 vom *National Institute of Standards and Technology* (NIST) herausgebracht und seither regelmäßig vom NIST und dem *VTT Technical Research Centre of Finland* aktualisiert. Innerhalb der letzten Jahre wurde das Programm aufwendig validiert und verifiziert [23]. Durch die Anerkennung im Bereich der Technik und Wissenschaft wird das Programm auch in dieser Arbeit verwendet. Das Programm wird in der Version 6.7.3 verwendet.

Zusätzlich wird Smokeview für die grafische Darstellung der Ergebnisse aus FDS in der Version 6.7.17 verwendet.

### **3.2 Entwicklung der Simulationsmodelle**

Ziel der Simulationen mit FDS ist es festzustellen ob Wasserlöschanlagen zu einer Verbesserung oder Verschlechterung der Evakuierung im Brandfall führen. Zudem soll festgestellt werden, ob eine Kombination von Wasserlöschsystemen und

Rauchabzugssystemen einen positiven oder negativen Effekt auf die verfügbare Evakuierungszeit hat.

Insgesamt werden fünf Simulationen durchgeführt. Drei davon basieren auf der gleichen Geometrie und unterscheiden sich lediglich in der Kombination der verwendeten Systeme. Zwei weitere Modelle bilden die Grundlage, um den Effekt eines Wasserlöschsystems ohne weitere Einflüsse darzustellen.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Rahmenbedingungen zur Erstellung der Simulationsmodelle festgelegt. Dazu zählen die Beschreibung der Geometrie der Brandräume, das Brandszenario und die Bemessung der Wassernebellöschanlage sowie des Rauchabzugsystems.

### **3.2.1 Geometrie der Modelle**

Für beide geometrischen Modelle wurde ein Raum basierend auf einem großen öffentlichen Bereich eines Passagierschiffs gewählt. Die Grundfläche beider Modelle ist identisch und hat einen Flächeninhalt von 1440 m<sup>2</sup>. Wie in Abbildung 5 zu sehen hat der Raum eine Länge von 40 m und eine Breite von 36 m.

Das erste geometrische Modell beschreibt ein Deck mit einer Deckenhöhe von 2,4 m. Das Modell soll nur die Beeinflussung der Rauchsicht durch die Löschanlage darstellen. Deshalb wurde auch auf Öffnungen wie Türen oder Fenster verzichtet.

Im zweiten geometrischen Modell wurden zwei Decks, mit der zuvor genannten Fläche, über eine Deckenöffnung miteinander verbunden. Wenn die Öffnung kleiner als 30 % der Fläche ist, so wird nach USCG Regel ein „Sprinkler-Curtain“ benötigt. Um den Einfluss dieses Systems zu betrachten, wurde die Öffnung mit einer Größe von 209 m<sup>2</sup> ausgelegt. Das entspricht einem Anteil von 14,5 % der Gesamtfläche. Zur einfacheren Darstellung und Simulation wurde für die Öffnung eine rechteckige Form

gewählt. Die Öffnung ist 19 m lang und 11 m breit. Die Position der Öffnung ist in Abbildung 6 zu sehen.

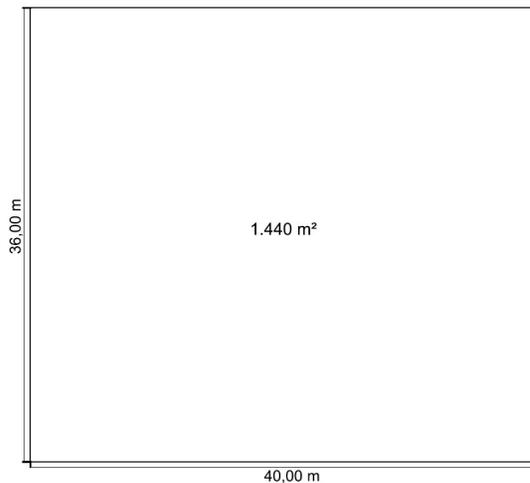


Abbildung 5: Grundfläche der Geometrien

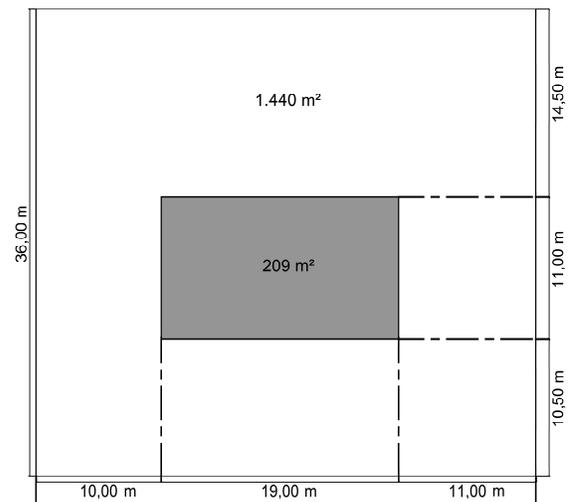


Abbildung 6: Position des Deckenausschnitts

Das Zwischendeck wurde 0,2 m stark gewählt. Die Materialstärke liegt bewusst keinen realen Daten zugrunde. Die Zwischendecke sollte lediglich eine gewisse Stärke haben und dennoch nicht zu stark sein um die Performanz der Simulation zu stark zu beeinflussen. Bei der Analyse geht es insbesondere um das untere Deck und ob sich der Rauch auf das obere Deck ausbreitet. Die Höhe beider Decks beträgt wie bei der vorigen Geometrie 2,4 m. Auch in der Geometrie mit der Deckenöffnung wurde auf Fenster, Türen und weitere Öffnungen verzichtet. Dadurch sollen ungewollte Einflüsse durch Luftströmungen verhindert werden.

Für die spätere Analyse der Verfügbarkeit von Flucht- und Rettungswegen wird angenommen, dass sich der Bereich im hinteren Bereich (Achtern) des Passagierschiffes befindet. Die beiden Ein- und Ausgänge, welche auch als Flucht- und Rettungswege dienen, befinden sich auf der linken Seite des Bereichs. Die Mitte der Ausgänge liegt bei 12 m (Ausgang 1) und 24 m (Ausgang 2). Durch den Verzicht von weiteren Öffnungen dienen diese Angaben lediglich als Messpunkte. Eine Breite der Wege wird deshalb auch nicht festgelegt. Die Positionen sind auf dem oberen (Deck1) und unteren Deck (Deck 0) identisch.

### 3.2.2 Brandszenario

Für das Brandszenario wird sich bewusst gegen einen in Kapitel 2.2 beschriebenen Bemessungsbrand entschieden. Stattdessen findet die Entzündung eines

Polstermöbels nach Babrauskas und Krasny statt [24,25]. Bereits in der Brandentstehungsphase kann das Rauchmeldesystem durch den Schwelbrand aktiviert werden. Daraus resultiert wiederum eine Aktivierung des Wasserebelvorhangs oder des Rauchabzugsystems. Durch die unvollständige Verbrennung wird eine große Menge kälterer Rauchgase erwartet. Die Konsequenzen eines Schwelbrands sind insbesondere durch die Rauchmenge, trotz geringer HRR, gefährlich. Es besteht bereits früher eine Erstickungsgefahr für Personen in dem Bereich [26]. Es soll untersucht werden, ob sich trotz der Auslösung des Wasserebelvorhangs eine klare Rauchsichtung einstellen kann. Durch einen Bemessungsbrand würde von Beginn eine bessere Verbrennung stattfinden und es würde weniger Rauch mit einer höheren Temperatur entstehen. Diese begünstigt eine stabile Rauchsichtung. Zudem ist beim Schwelbrand eines Polstermöbels nach 30 bis 120 Sekunden ein Übergang zu einem Entwicklungsbrand zu erwarten [24].

Als Material des Polstermöbels dient Polyurethan (PU), ohne Flammschutzmittel wie zum Beispiel Triphenylphosphat, als Schaumstoff zusätzlich ist der Schaumstoff mit einem Textilüberzug bezogen. Das Möbelstück hat die Form eines Sofas mit einem Material-Volumen von 0,992 m<sup>3</sup> und steht in allen Modellen 12,7 m von der linken und 4,1 m von der vorderen Wand entfernt. Polyurethan lässt sich durch die folgende chemische Zusammensetzung beschreiben: C<sub>6,3</sub>H<sub>7,1</sub>NO<sub>2,1</sub> [27]. Neben der Zusammensetzung werden für die Simulation Daten zur Ruß-Ausbeute benötigt. Diese beschreibt den Anteil der Brennstoffmasse der in Rauchpartikel umgewandelt wird. Bei PU liegt die Ruß-Ausbeute bei etwa 10 % [24].

Die CO-Ausbeute des Brandszenarios geht aus der Literatur von Babrauskas und Krasny [24] nicht hervor. Zudem ist die verringerte Sichtweise nach dem *Societal Consequence Model (D2.3)*, aus dem FIREPROOF Projekt, der erste Grenzwert, der noch weit vor einer Einschränkung durch die Temperatur oder Toxizität erreicht wird [28]. Deshalb findet keine Modellierung der CO-Konzentration und folglich keine Beurteilung des Grenzwertes statt.

Die Zündung erfolgt durch drei Partikel mit einer Temperatur von 1000 °C. Diese Temperatur basiert auf einer sehr heiß glühenden Zigarette [24]. Die Entzündung des Polstermöbels durch eine Kerze oder einen technischen Effekt ist auch denkbar.

Der Verlauf der HRR wird durch das gewählte Brandszenario vom Bemessungsbrand abweichen. Erwartet wird ein starker Anstieg der HRR ab dem Zeitpunkt der stabilen

Flammenbildung. Im Anschluss an den starken Anstieg sollte die HRR langsam abfallen. Insbesondere durch das schnelle Verbrennen von PU und die Kühlung durch die Löschanlage ist eine abfallende HRR zu erwarten. Dadurch, dass die gewählte Brandlast verhältnismäßig klein ist, wird in der Simulationszeit von 600 Sekunden auch das Erlöschen des Brandes erwartet. Es sollte sich demnach zum Ende um einen brandlastgesteuerten Brandfall handeln.

Ein ventilationsgesteuerter Brandfall wird auch ohne Zuluft durch die Größe des Bereichs im Verhältnis zur Brandlast nicht erwartet.

### **3.2.3 Bemessung der Löschsyste**

Wie in den vorigen Abschnitten beschrieben orientieren sich die Modelle an einem öffentlichen Bereich auf einem Passagierschiff mit mehr als 36 Passagieren. Gemäß SOLAS ist, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, eine Sprinkleranlage erforderlich [2]. In der Praxis werden auf vielen Schiffen Wassernebellöschsysteme statt Sprinkleranlagen eingesetzt. Deshalb werden auch in den Modellen dieser Arbeit Wassernebellöschsysteme als Äquivalenz zu Sprinkleranlagen eingesetzt.

Das verwendete Wassernebellöschsystem ist ein geschlossenes Hochdruckwassernebellöschsystem mit einem Betriebsdruck von 70 bar. Bei der verwendeten Düse handelt es sich um eine Einzeldüse mit einem Vollkegel als Sprühbild. Der Winkel des Sprühkegels beträgt 30°. Die Auslösung der einzelnen Düsenköpfe erfolgt über das Platzen des Glaskörpers bei einer Temperatur von 68 °C. Der Kennwert zur Auslösegeschwindigkeit des Sprinklers RTI („Response-Time-Index“) liegt mit dem Wert 10 im schnellen Bereich (<50). Die Daten der Düsen stammen von realen Düsen aus einer Publikation des *VTT Technical Research Centre of Finland*. Anhand des verwendeten Systems wurde die Funktion von Wasserlöschanlagen in FDS implementiert und die Ergebnisse durch Realbrandversuche validiert [29].

Neben Einzeldüsen gibt es auch Multidüsen. Diese kombinieren häufig eine Hauptdüse in der Mitte eines Düsenkopfes mit mehreren Düsen schräg angeordnet um die Hauptdüse herum [29]. Durch diese Bauweise wird meist ein größerer Sprühwinkel erreicht. Aus Gründen der Performanz und Komplexität der Simulation solcher Düsen wurde sich bewusst für einen Düsenkopf mit einer Einzeldüse entschieden.

Durch Daten aus der Praxis und Zulassung wurde ein maximaler Abstand von 4 m zwischen den Düsenköpfen des Löschsystems festgelegt. Der Abstand zu Objekten sollte zwischen 0,5 m und 4 m liegen.

Aus den Abstandsdaten wurde das in Anhang B zu sehende Raster für die Düsen gebildet. Der Abstand zu den Wänden beträgt 1,25 m bzw. 1,5 m. Zwischen den Düsenköpfen wurde ein Abstand von 2,5 m bzw. 3 m gewählt. Die maximal zugelassene Distanz zwischen den Düsen wurde aufgrund der geringen Deckenhöhe nicht ausgereizt. Das Raster wurde zudem so gewählt, sodass sich auf die gesamte Fläche gesehen ein einheitliches Bild ergibt. Im Falle von Deckenöffnungen wird der Bereich der Öffnung ausgelassen. In der obersten Etage ist das Raster durchgehend.

In zwei Modellen kommt neben dem zuvor beschriebenen geschlossenen auch ein, von der USCG gefordertes, offenes Hochdruckwassernebellöschsystem in Form eines Wassernebelvorhangs zum Einsatz. Der Wassernebelvorhang wird automatisch über ein Rauchmeldesystem aktiviert. Um Wasserschäden durch eine Fehlauflösung zu vermeiden, müssen mindestens zwei Rauchmelder Rauch detektieren [6]. Dadurch, dass beim offenen System das Wasser nicht direkt an den Düsen anliegt, wurde zusätzlich eine Verzögerung von 30 Sekunden bis zur Aktivierung des Wassernebelvorhangs berücksichtigt. Durch das offene System mit automatischer Aktivierung kann der in der USCG Vorgangsnummer SOLAS-13 geforderte Rauchschutzvorhang entfallen. Die Düsen sind in einem Abstand von 0,5 m in einem Intervall von zwei Metern um die Decken Öffnung angebracht [6]. Die Entfernung zum Rauchschutzvorhang muss nicht eingehalten werden. Dennoch wird etwas Abstand zu der Kante der Öffnung gewahrt.

Die Rauchmelder, die zur Auslösung des Wassernebelvorhangs dienen, haben einen Abstand von 3 m beziehungsweise 5 m zu den Wänden und untereinander einen Abstand von 6 m bis 7,5 m, die Abstände sind im Anhang B dargestellt. Anforderungen an die maximalen Abstände von Rauchmeldern sind im FSS Code aufgeführt [3]. Zudem haben die Detektoren in dem beschriebenen Raster einen möglichst großen Abstand zu den Wassernebeldüsen.

### 3.2.4 Bemessung des Rauchabzugssystems

Im Rahmen eines alternativen Designs mit einer MVZ, die größer ist, als von der SOLAS erlaubt, kommen als Risikominderungsmaßnahmen, um mindestens die gleiche Sicherheit wie das Referenzdesign zu erreichen, häufig Rauchabzugssysteme zum Einsatz. Dabei wird sich an SOLAS II-2 Reg. 8.5 orientiert. Dort wird für Atrien ein automatisches Rauchabzugssystem gefordert, welches das gesamte Volumen des Bereichs innerhalb von zehn Minuten abgesaugt hat.

Der betrachtete Bereich überschreitet zwar nicht die Größe einer MVZ, die durch die SOLAS zulässig ist, dennoch soll anhand von diesem Modell auch die gegenseitige Beeinflussung von Wassernebellöschsystem und Rauchabzugssystem betrachtet werden. Zudem soll ermittelt werden, ob ein System oder sogar eine Kombination eine größere Sicherheit für die Evakuierung bietet.

Für die Auslegung des Rauchabzugssystem wird sich deshalb auch in dieser Arbeit an den Anforderungen für Atrien orientiert. Aus einer Grundfläche von  $1.440 \text{ m}^2$  auf zwei Decks mit einer Höhe von jeweils  $2,4 \text{ m}$  ergibt sich ein Volumen von  $6912 \text{ m}^3$ . Hinzu kommt ein Volumen von  $41,8 \text{ m}^3$  für den Deckenausschnitt. Demnach muss das Rauchabzugssystem mindestens eine Kapazität von  $41.722,8 \text{ m}^3/\text{h}$  fördern. Dadurch, dass es sich nach Definition nicht um ein Atrium handelt und beiden Decks nach SOLAS nicht als ein Bereich zählen, wurde die Kapazität des Systems erhöht. Zudem soll in unterschiedlichen Modellen ein identisches Rauchabzugssystem verwendet werden, um die Vergleichbarkeit zu wahren. Da im Falle des Wassernebelvorhangs weitere Strömungen entgegen der Abzugsrichtung wirken wird in den Modellen mit Rauchabzugssystem ein zehnfacher Luftwechsel des Volumens der Räume (ohne den Deckenausschnitt) angesetzt. Dabei wird durch die gesamte Decke des oberen Decks ein Volumen von  $41.472 \text{ m}^3/\text{h}$  abgesaugt. Im unteren Deck wird durch vier Absaugstellen um den Deckenausschnitt herum mit einer Fläche von je einem Quadratmeter ein Volumen von  $27.648 \text{ m}^3/\text{h}$  abgesaugt. Die Zuluft wird durch den Boden des unteren Decks in den Ecken des Raumes realisiert. Gemäß SOLAS ist die Geschwindigkeit der Zuluft kleiner als  $1 \text{ m/s}$  zu halten. In den Modellen erfolgt die Zuluft über vier etwa  $6 \text{ m}^2$  große Flächen mit einer Geschwindigkeit von  $0,8 \text{ m/s}$ . Dadurch strömt die gleiche Menge an Luft nach, wie durch das Rauchabzugssystem abgesaugt wird.

Das Rauchabzugssystem wird durch Rauchmelder aktiviert. Wie beim Wassernebelvorhang ist die Auslösung zweier Rauchmelder erforderlich, um das Rauchabzugssystem zu aktivieren. Das Rauchmeldesystem ist identisch mit dem im vorigen Abschnitt genannten System. Wird sowohl das Rauchabzugssystem als auch der Wassernebelvorhang verwendet, so findet die Aktivierung über dasselbe Rauchmeldesystem statt.

### **3.2.5 Zusammenfassung der Modelle**

Basierend auf den zuvor genannten Bemessungsgrundlagen werden in diesem Abschnitt die fünf Simulationen zusammenfassend erläutert. Es wird für alle Simulationen angenommen, dass die Düse des Wassernebellöschsystems direkt über dem Brandherd verstopft ist. Insbesondere im Einsatz auf Schiffen kommt eine Verstopfung von Düsen häufig vor. Eine direkte Brandbekämpfung durch das Wassernebellöschsystem erfolgt deshalb nicht. Das zuvor beschriebene Brandszenario wird für alle Modelle verwendet.

Das erste Modell beschreibt einen öffentlichen Bereich auf einem Deck ohne Deckenausschnitt. Das Modell ist mit keinem Lösch- oder Rauchabzugssystem ausgestattet. Die Simulation dient als Referenz für die zweite Simulation.

Das zweite Modell wird durch das gleiche geometrische Modell wie das erste beschrieben. Der Bereich wird im Brandfall durch das in Kapitel 3.2.3 beschriebene geschlossene Wassernebellöschsystem geschützt. In diesem Modell soll der Einfluss des Löschsystems auf die Evakuierungszeit im Brandfall betrachtet werden. Zur qualitativen Betrachtung des Einflusses wird es der ersten Simulation gegenübergestellt. Durch Deckenausschnitte und weitere Systeme kann der reine Einfluss von Wasserlöschsystemen in den folgenden Simulationen nicht betrachtet werden.

Das dritte Modell wird schließlich durch zwei Decks, welche mit einem Deckenausschnitt verbunden sind, gebildet. Neben dem Wasserlöschsystem wie im ersten Modell ist um den Deckenausschnitt herum ein offenes Wassernebellöschsystem in Form eines Wassernebelvorhangs angebracht welches durch ein Rauchmeldesystem aktiviert wird. Auf dem oberen Deck wurde in diesem

Fall kein Wasserlöschsystem installiert, um zu prüfen, ob der Rauch in der Lage ist ohne weitere Einflüsse eine saubere Rauchsichtung auszubilden.

Das vierte Modell basiert auf dem dritten Modell. Anstelle des Wassernebelvorhangs kommt das beschriebene Rauchabzugssystem zum Einsatz. Zudem ist im oberen Deck auch ein Wassernebellöschsystem verbaut. Dadurch wird geprüft, ob die Temperatur der Rauchgase im oberen Deck heiß genug ist, um die Düsen auszulösen und wie stark der Einfluss auf die Evakuierung des oberen Decks ist.

Im fünften Modell werden schließlich Modell drei und vier miteinander kombiniert. Es wird in der Geometrie mit zwei Decks sowohl der Wassernebelvorhang und ein Löschsystem auf beiden Decks verbaut als auch das beschriebene Rauchabzugssystem. In diesem Modell soll insbesondere betrachtet werden inwiefern sich die Systeme gegenseitig beeinflussen und ob diese Beeinflussung einen Einfluss auf die Evakuierung im Brandfall hat.

Die Umsetzung der Programmierung der einzelnen Daten in FDS ist an exemplarischen Auszügen des Codes im Anhang A dargestellt. Als Basis dient das fünfte Modell, da in diesem alle Systeme zur Anwendung kommen.

## 4 Ergebnisse

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt mit unterschiedlichen Messwerten und Abbildungen.

Als visuelle Darstellungen dienen dabei Schnittebenen auf der Höhe von zwei Metern des jeweiligen Decks. Für die Sichtweite dient eine Schnittebene, die Bereiche mit einer Sichtweite, die geringer als zehn Meter ist, rot färbt. Eine grüne Färbung hingegen bedeutet, dass die Sichtweite noch im Akzeptanzbereich ist. Gleiches gilt für die Temperatur. Überschreitet die Temperatur den Grenzwert von 60 °C, so wird die Ebene an dieser Stelle rot gefärbt. Eine Akzeptanz der Temperatur ist grün dargestellt.

Zusätzlich findet eine Auswertung von Temperatursensoren statt, welche zur Analyse der Verfügbarkeit von Flucht- und Rettungswegen dienen. Diese befinden sich einen Meter in den Raum herein entfernt von den in Kapitel 3.2.1 angenommenen Ausgängen in einer Höhe von zwei Metern über dem Boden. An diesen Stellen würde auch die CO und CO<sub>2</sub> Konzentration gemessen werden.

### 4.1 Simulation 1 und 2 – Einfluss vom Wasserlöschsystem bei einem Deck

Der Brandverlauf der Simulationen lässt sich über die HRR beschreiben. In Abbildung 7 ist der Brandverlauf der ersten Simulation dargestellt. Der Verlauf dient als Referenz für die weiteren Simulationen und wird für Vergleiche herangezogen. Zu Beginn lässt sich die Brandentstehungsphase erkennen. In dieser Phase findet eine unvollständige Verbrennung in Form eines Schwelbrandes statt. Nach etwa 60 Sekunden beginnt die Ausbildung einer stabilen Flamme und damit die Brandentwicklungsphase. In dieser Phase steigt die Wärmefreisetzungsrate auf ein Maximum an. Nach langsamem Abklingen des Maximums kommt es nach etwa 300 Sekunden zu einer Vollbrandphase. Diese ist durch die geringe Brandlast nicht sehr eindeutig. Nach der Vollbrandphase geht es in eine Abklingphase über. Durch den Verbrauch von Brennstoff steht weniger zur Verfügung und die HRR sinkt immer weiter, bis der Brand schließlich nach etwa 560 Sekunden erlischt. Der starke Abfall der HRR bei etwa 500 Sekunden deutet auf das Erlöschen der stabilen Flamme hin. Zwischen dem Erlöschen

der Flamme und dem Erlöschen des Brandes befindet sich der Brand erneut in einer Schwelbrandphase.

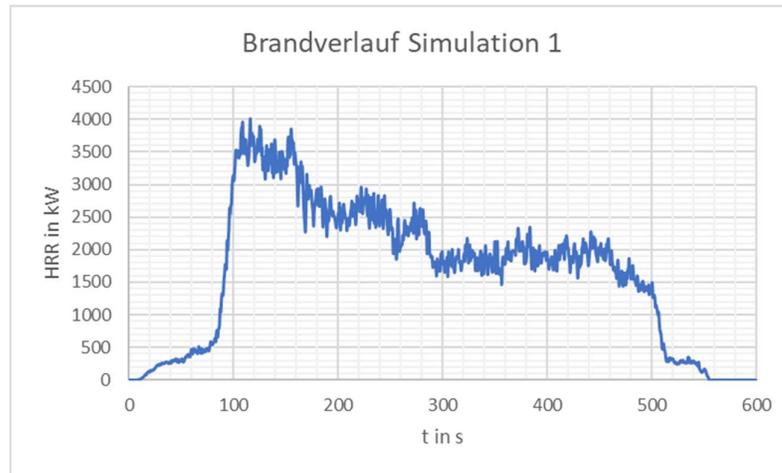


Abbildung 7: Simulation 1 - Wärmefreisetzungsrates/Brandverlauf

Beim Vergleich des Brandverlaufs der zweiten Simulation in Abbildung 8 mit dem der ersten Simulation, fällt auf, dass die HRR trotz Wassernebellöschsystem auf ein höheres Maximum steigt. Der Verlauf selbst ist sehr ähnlich und wird hauptsächlich durch die Brandlast, das Polstermöbel, vorgegeben. Nach dem Abklingen des Maximums stellt sich wie in der ersten Simulation nach etwa 300 Sekunden die Vollbrandphase ein. Diese wird nach etwa 480 Sekunden durch ein schnelles Abklingen der HRR beendet. Das Abklingen endet schließlich nach einer Simulationsdauer von 500 Sekunden im Erlöschen des Brandes. Die Wärmefreisetzungsrates ist im Vergleich zur ersten Simulation im Allgemeinen etwas höher. Dies lässt sich dadurch begründen, dass durch das Einsprühen von Wassernebel umliegende Luft beschleunigt wird. Durch die höhere Sauerstoffzufuhr kommt es schließlich zu einer heißeren und schnelleren Verbrennung.

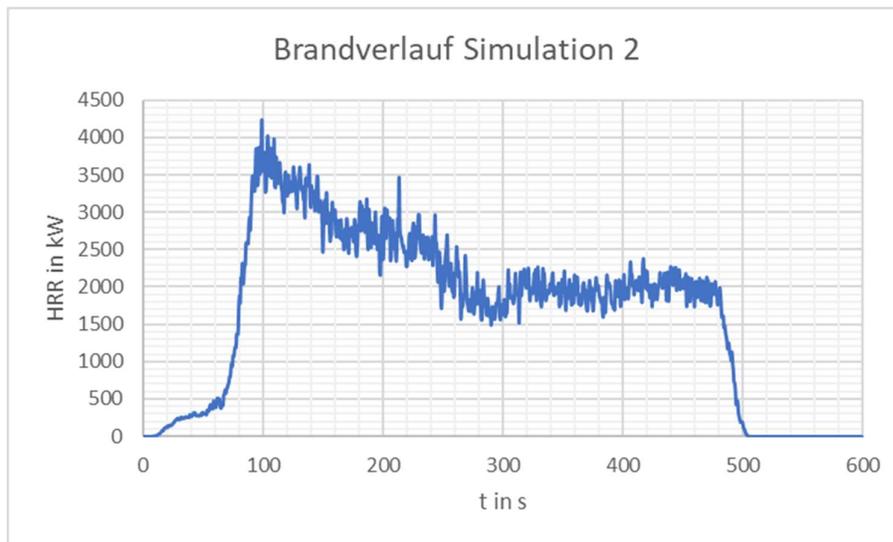


Abbildung 8: Simulation 2 - Wärmefreisetzungsrates/Brandverlauf

Bereits zehn Sekunden nach Simulationsbeginn bildet sich, wie in Abbildung 9 zu sehen, durch den Schmelbrand eine Plume und die Bildung der Rauchschiicht beginnt. Nach 30 Sekunden hat sich schließlich eine Rauchschiicht eingestellt und breitet sich durch den Ceiling-Jet weiter unterhalb der Decke aus.

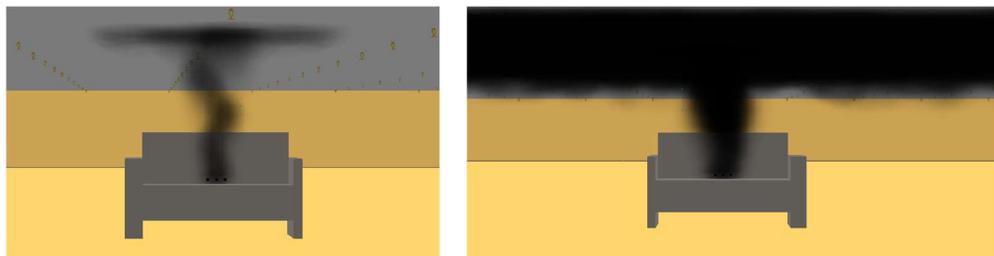


Abbildung 9: Simulation 2 - Plume bei t=10 s (links) sowie Plume und Rauchschiicht bei t=30 s (rechts)

Die Ausbreitung ist auch in Abbildung 10 zu beobachten. Der Rauch kühlt am Rand der Ausbreitung in den Bereich hinein ab und die Rauchschiicht sinkt etwas. Dadurch kommt es an einigen Stellen zu einer Sichtbehinderung. Nach etwa 60 Sekunden trifft der Ceiling-Jet schließlich auf die Wände. Dadurch wird die Rauchschiicht an diesen Stellen dicker. Das ist sowohl in Abbildung 10 durch die Dichte des Rauchs zu sehen als auch in Abbildung 11 durch die Unterschreitung der Sichtweite von zehn Metern.

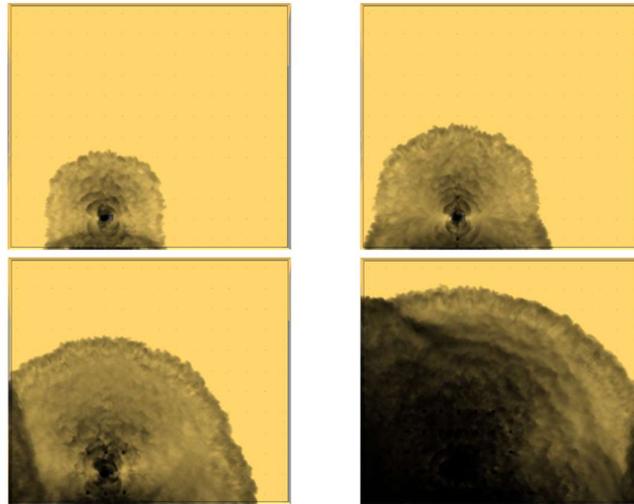


Abbildung 10: Simulation 2 - Rauchausbreitung nach 30, 40, 60 und 90 s (von links nach rechts und oben nach unten), Schnitthöhe 2,39 m

Bereits nach etwa 90 Sekunden sind die angenommenen Ausgänge als nicht passierbar anzunehmen, da die Sichtweite im Bereich vor den Türen unter zehn Meter gesunken ist. Durch den Vergleich der in Abbildung 11 zu sehenden Sichtweite der ersten und zweiten Simulation, fällt auf, dass die Wasserlöschanlage keinen Einfluss auf die Einschränkung der Sichtweite am Rand der Rauchausbreitung und an den Wänden hat.

Die Auslösung der ersten Wassernebeldüse findet in der zweiten Simulation nach 31 Sekunden statt. In Abbildung 10 sind nach 40 Sekunden die ersten ausgelösten Düsen durch eine höhere punktförmige Rauchdichte ober- und unterhalb des Brandherdes zu erkennen. Nach 60 Sekunden wird der Einfluss auf die Sichtweite bereits punktförmig sichtbar. Am besten zu erkennen ist der Einfluss auf die Sichtweite jedoch nach 90 Sekunden. Um den Brandherd herum sowie zwischen der Ausbreitungsgrenze und dem Brandherd ist die Sichtweite gegenüber der ersten Simulation deutlich verringert. Die Verringerung der Sichtweite lässt sowohl auf das Niederschlagen des Rauches in der Nähe des Brandherdes als auch auf ein allgemeines Abkühlen des Brandrauchs und somit sinken der Rauchsichtweite schließen. Nach 120 Sekunden nähern sich die Zustände der Grenzwerte aneinander an. Lediglich die verbleibende Fläche in der oberen Ecke und um den Brandherd herum unterscheiden sich.

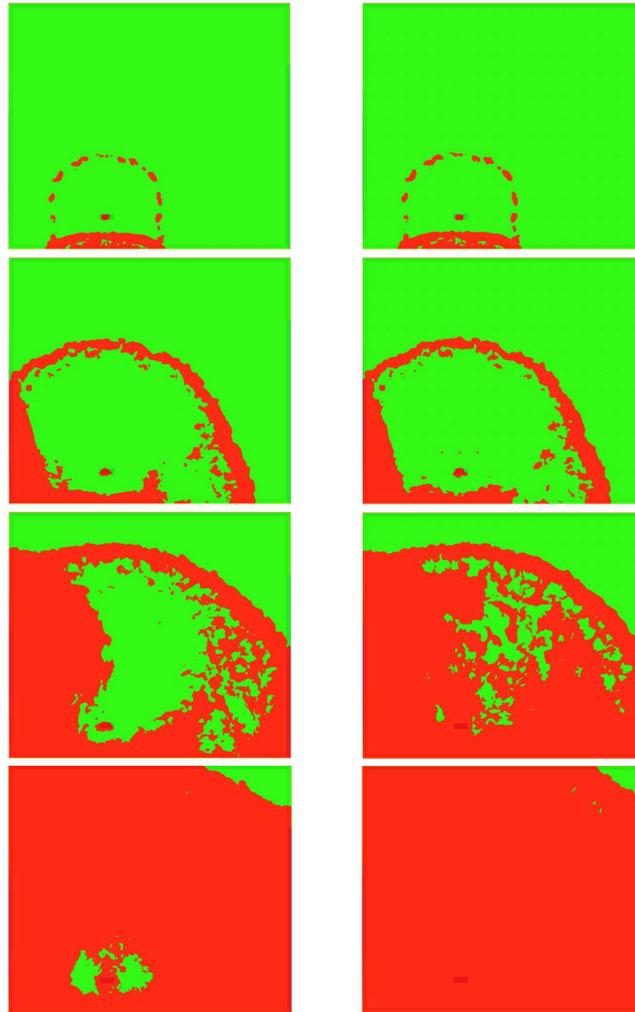


Abbildung 11: Simulation 1 (links) und 2 (rechts) - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 30, 60, 90 und 120 s, Höhe 2 m, (rot  $\leq$  10 m; grün = Akzeptanzbereich)

Die Blockade des ersten Ausgangs findet in beiden Fällen nach 47 Sekunden statt. Der zweite Ausgang, welcher die ASET beschreibt, ist nach 75 Sekunden blockiert. Es stehen demnach 75 Sekunden zur Evakuierung des Bereiches zur Verfügung. Die Blockade der Ausgänge findet durch den auf die Wand treffenden Ceiling-Jet statt. Folglich hat das Wassernebellöschsystem keinen Einfluss auf die reine Blockade der Flucht- und Rettungswege.

Um den Einfluss des Wassernebellöschsystems außerhalb der Grenzwertbetrachtung erkennen zu können hilft ein seitliches Schnittbild wie zuvor bei der Betrachtung der Plume und der Rauchsicht. Betrachtet man den Niederschlag des Brandrauchs durch das Wasserlöschsystem so ist eine Störung der Rauchsichtung klar zu erkennen. Am Rand der **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist auch die Rauchsicht vor dem zuerst blockierten Flucht- und Rettungsweg zu

erkennen. Nach der Grenzwert Betrachtung ist eine sichere Evakuierung nicht mehr möglich. In der raucharmen Schicht ist die Sicht jedoch nur wenig eingeschränkt. Personen haben demnach die Möglichkeit die Ausgänge zu erkennen und den Bereich zu verlassen. Der Raucheintrag in die raucharme Schicht nimmt mit der Anzahl an aktivierten Wassernebellöschsystemen und fortlaufender Zeit stark zu und es kommt schließlich zu einer starken Sichtbehinderung in der Nähe ausgelöster Düsen.



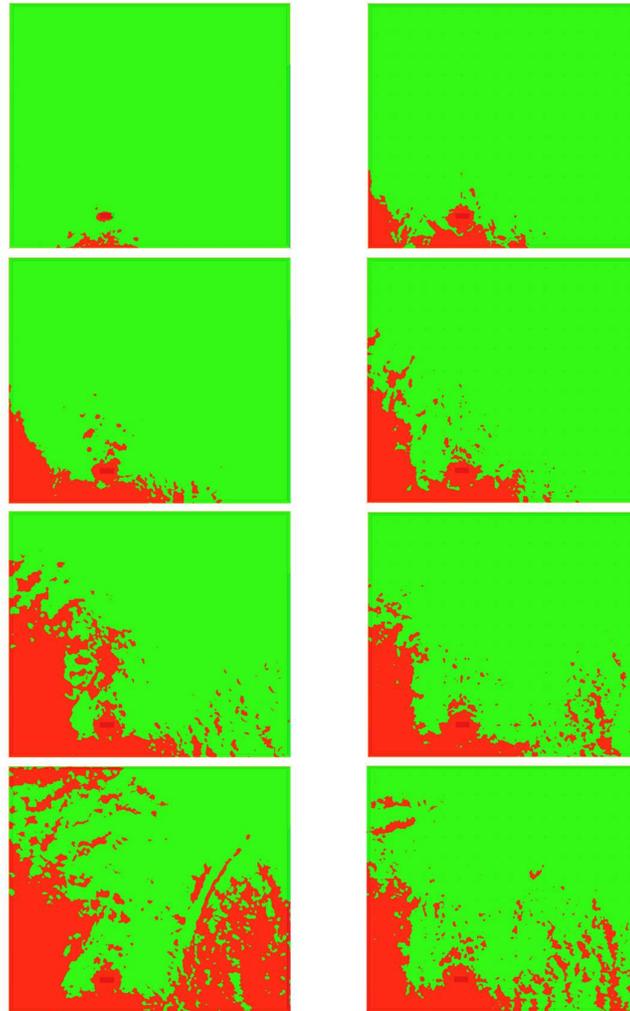
Abbildung 12: Simulation 2 - Niederschlag des Brandrauches durch Wassernebellöschsystem nach 70 und 90 s, Schnittebene  $y=12\text{ m}$

Neben der Betrachtung der Sichtweite ist eine weitere relevante betrachtete Gefahr des Brandrauches die Temperatur. Wie eingangs beschrieben wird die Rauchsichtung unter anderem durch die Thermik erreicht und der Brandrauch weist in der Rauchsicht eine gewisse Temperatur auf. Beim Absinken der Rauchsicht kommt es demnach auch zu einer höheren Temperatur im Aufenthaltsbereich von Personen.

Zur Analyse der Temperatur wird eine Grenzwertbetrachtung durchgeführt. Bei einem Vergleich des in Abbildung 13 zu sehenden Temperaturgrenzwertverlaufs, fällt auf, dass der Grenzwert von  $60\text{ °C}$  bei der ersten Simulation an mehr Stellen überschritten wird als bei der zweiten Simulation. Die ausgelösten Wassernebellöschsysteme schlagen den Brandrauch zwar nieder und bringen ihn so in den Aufenthaltsbereich der Personen, kühlen ihn jedoch auch ab. Bei der ersten Simulation breitet sich die Grenzwertüberschreitung insbesondere im inneren Bereich weiter aus. Die eckige Abgrenzung durch das Wassernebellöschsystem ist in der zweiten Simulation an der linken Seite klar zu erkennen. Die Auslösetemperatur der Düsen, die kurz über dem Grenzwert liegt ( $68\text{ °C}$ ), führt dazu, dass Brandgase abgekühlt werden und somit keine weitere Grenzwertüberschreitung in dem Bereich stattfindet. Die fleckigen Überschreitungen im inneren des Bereichs sind insbesondere den Zwischenräumen zwischen den einzelnen Düsen zuzuordnen.

Die Grenzwertüberschreitungen führen dazu, dass der erste Flucht- und Rettungsweg in der ersten Simulation durch die hohe Temperatur nach 105 Sekunden nicht mehr passierbar ist. Der zweite ist nach 115 Sekunden blockiert. In der zweiten Simulation

hingegen wird der erste Ausgang bereits nach 92 Sekunden blockiert der zweite Ausgang erreicht zwischenzeitlich für eine Sekunde 66 °C und kühlt dann wieder ab. Nach 140 Sekunden ist dieser schließlich auch für längere Zeit blockiert. Die Verlaufskurven der Temperatursensoren sind im Anhang C zu finden.



*Abbildung 13: Simulation 1 (links) und 2 (rechts) - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 90, 105, 120 und 135 s, Höhe 2 m, (rot  $\geq 60$  °C; grün = Akzeptanzbereich)*

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Wassernebellöschsystem einen signifikanten Einfluss auf die Sichtweite und Temperatur im inneren des Bereiches hat. An den Wänden hingegen finden Grenzwertüberschreitungen und Grenzwertunterschreitungen insbesondere durch den auf die Wand treffenden Ceiling-Jet statt.

## 4.2 Simulation 3 – Einfluss des Wassernebelvorhangs

Der Brandverlauf der dritten Simulation, welcher in Abbildung 14 zu sehen ist, ist im Vergleich zu den vorigen Verläufen weniger konstant. Während der Entwicklungsphase kommt es zwischen etwa 80 und 90 Sekunden zu einem kurzen Einbruch der HRR. Zudem wird die maximale HRR später erreicht. Vor dem Erreichen der maximalen HRR sinkt die Zunahme der HRR zusätzlich ab. Auch das Abklingen nach der maximalen Wärmefreisetzungsrate und die Vollbrandphase sind im Vergleich weniger konstant. Die Abklingphase weist zusätzlich auf ein langsames Ausbrennen und einen erneuten Schwelbrand hin.

Die Aktivierung des Wassernebelvorhangs und weiterer Düsen haben einen hohen Kühleffekt. Neben dem Kühleffekt kommt es durch die aktivierten Düsen eventuell zu nicht sichtbaren Turbulenzen die einen Einfluss auf die HRR haben. Zudem kann der verstärkte Brandniederschlag in der Nähe des Brandherdes zu einer langsameren Verbrennung führen. Auch der Deckenausschnitt kann durch Turbulenzen einen Einfluss auf die Verbrennung und somit die HRR haben. Die Einflüsse durch die Öffnung selbst werden im Folgenden nicht betrachtet. Simulation 3 wird hauptsächlich mit Simulation 4 und Simulation 5 verglichen.

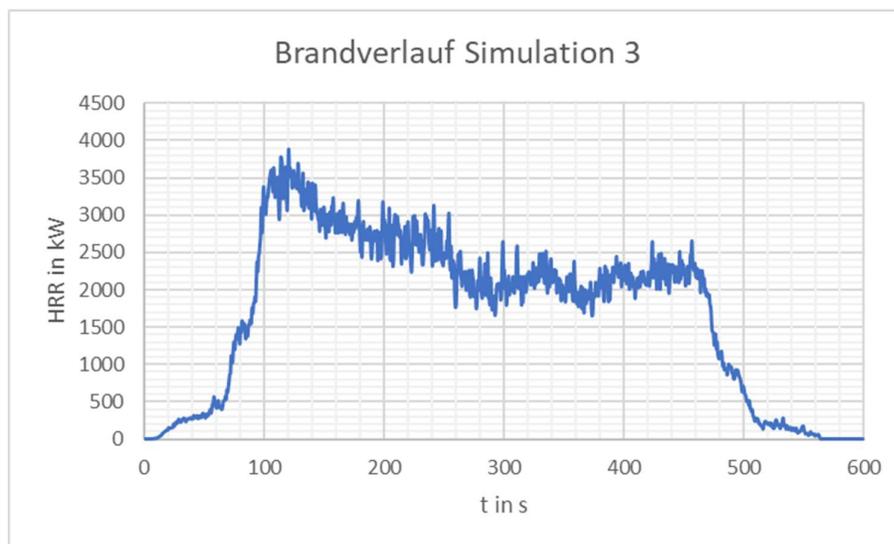


Abbildung 14: Simulation 3 - Wärmefreisetzungsrate/Brandverlauf

Ob das langsamere Ansteigen und Abklingen der HRR einen Einfluss auf die Sichtweite durch eine erhöhte Rauchproduktion hat, wird durch die Grenzwertbetrachtung untersucht. Dafür werden wie zuvor Schnittebenen verwendet.

Im Falle der zweigeschossigen Geometrien wird sowohl die Schnittebene auf einer Höhe von 2 m im unteren Deck als auch die Schnittebene in einer Höhe von 4,6 m der Geometrie betrachtet. Letztere entspricht einer Höhe von 2 m auf dem oberen Deck.



Abbildung 15: Simulation 3 - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 50, 80, 110 und 140 s, Höhe 2 m (links) und 4,6 m (rechts), (rot  $\leq$  10 m; grün = Akzeptanzbereich)

Der Wassernebelvorhang wird durch die Latenz, die durch die Detektionszeit und das Füllen der Rohrleitungen entsteht, nach 48 Sekunden aktiviert. Der Niederschlag des Rauches und die damit verbundene, zunächst punktförmige, Grenzwertunterschreitung der Sichtweite ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Aktivierung kann zu dem kurzen schnelleren Ansteigen der HRR bei etwa 50 bis 60 Sekunden beitragen. Es fällt auf, dass trotz der Aktivierung des Wassernebelvorhangs eine konstante Rauchzufuhr zum oberen Deck stattfindet. Die Grenzwertunterschreitung auf dem oberen Deck ist flächig und nicht ausschließlich an der Kante des Deckenausschnitts,

durch den der Rauch aufsteigt. Das deutet auf eine geringere Temperatur des Brandrauches hin. Eine geringere Brandrauchtemperatur führt zu einer geringeren Gefahr durch die Temperatur, zum anderen aber auch zu einer schlechten Rauchschiebtbildung, welche die Grenzwertunterschreitung der Sichtweite begünstigt. Auf dem unteren Deck wird der erste Flucht- und Rettungsweg nach 50 Sekunden durch die Grenzwertunterschreitung der Sichtweite blockiert. Nach 76 Sekunden ist der Zweite Ausgang schließlich auch blockiert und nach den Grenzwerten ist eine sichere Evakuierung des unteren Decks zu diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich. Auf dem oberen Deck ist der erste Ausgang hingegen nach 94 Sekunden nicht mehr nutzbar. Der zweite ist bereits 8 Sekunden später blockiert. Demnach ist eine sichere Evakuierung des Bereichs nach dem Brandausbruch für 104 Sekunden möglich. Sowohl auf dem oberen als auch auf dem unteren Deck findet die Blockade der Flucht und Rettungswege durch die Rauchausbildung an der Decke statt. Der Einfluss des Wassernebelvorhangs auf die Rauchausbildung ist in Abbildung 16 zu sehen.

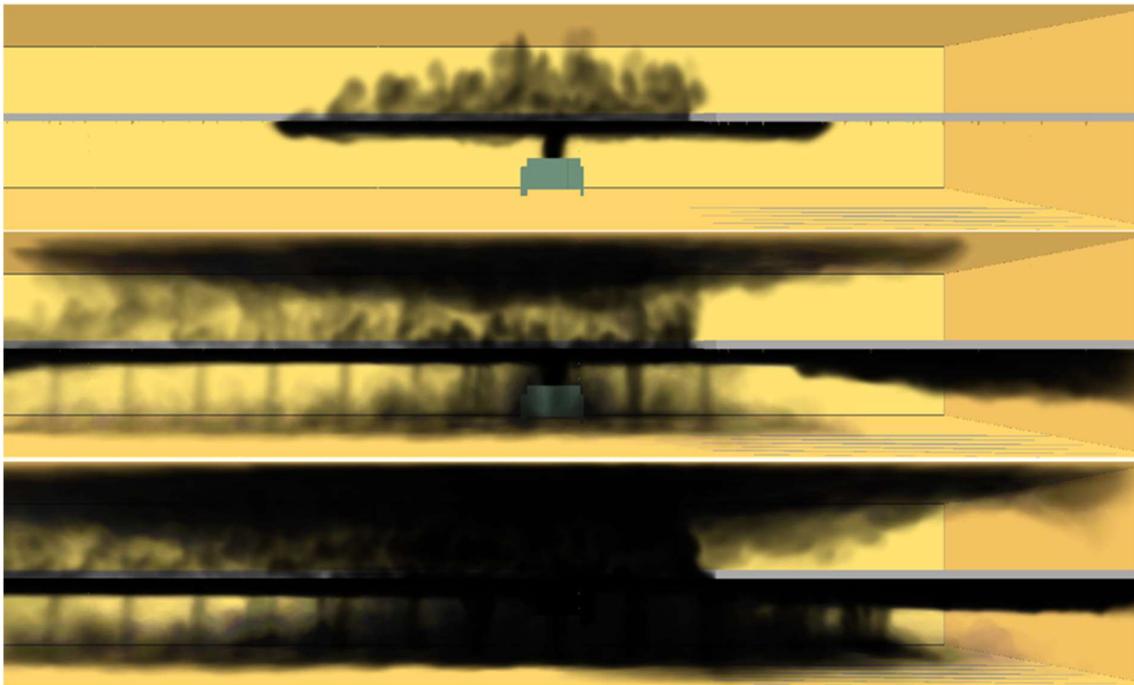


Abbildung 16: Simulation 3 – Einfluss des Wassernebelvorhangs auf die Ausbreitung des Brandrauches nach 30, 60 und 90 s, Schnittebene  $y=18\text{ m}$

Es ist zu erkennen, wie der Brandrauch durch den Wassernebelvorhang niedergeschlagen wird. Eine weitere Rauchausbildung findet nach der Aktivierung des Wassernebelvorhangs dennoch statt. Die Verbreitung findet insbesondere durch die Zwischenräume zwischen den Düsen und allgemein an der Decke statt. Die durch

die Düsen abgedeckte Fläche an der Decke ist durch einen Sprühwinkel von 30° begrenzt. Die Effekte des Wassernebelvorhangs würden sich durch das kegelförmige Sprühbild eher im unteren Bereich des Sprühbildes zeigen.

Durch die Abkühlung des Brandrauches durch den Weg zur Decke des zweiten Decks und durch die verbauten Wassernebellöschsysteme ist die Rauchschiebtbildung auf dem zweiten Deck gestört. Es ist die Bildung einer Rauchschiebt zu erkennen die Grenze zwischen der raucharmen Schicht und der Rauchschiebt ist im Vergleich zum unteren Deck undefiniert und es kommt zu einer Durchmischung der Schichten.

Neben dem Brandrauch wird auch bei der dritten Simulation eine Grenzwertbetrachtung der Temperatur durchgeführt. Die maximal betroffene Fläche von Grenzwertüberschreitungen der Temperatur auf dem unteren Deck ist in Abbildung 17 zu sehen. Auf dem oberen Deck findet keine Grenzwertüberschreitung statt.



Abbildung 17: Simulation 3 - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 120 s, Höhe 2 m, (rot  $\geq 60$  °C; grün = Akzeptanzbereich)

Auf dem unteren Deck (Deck 0) wird der erste Flucht- und Rettungsweg nach 94 Sekunden blockiert. Der zweite wird zwischendurch zweimal für weniger als eine Sekunde blockiert. Diese Blockade kann vernachlässigt werden. Somit ist die Evakuierung basierend auf dem Grenzwert der Temperatur sicher, bis ein anderer Grenzwert über- oder unterschritten wird. Auf dem oberen Deck (Deck 1) wird kein Flucht- und Rettungsweg blockiert. Die Temperaturverläufe der Ausgänge sind im Anhang C zu sehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Rauch wie bereits bei dem Wassernebellöschsystem auch durch den Wassernebelvorhang niedergeschlagen und abgekühlt wird. Eine Rauchausbreitung auf das obere Deck findet trotz des

Wassernebelvorhangs statt. Durch den Kühleffekt ist die Einstellung einer klaren Rauchsicht auf dem oberen Deck nicht möglich.

### 4.3 Simulation 4 – Einfluss des Rauchabzugssystems

Durch das Rauchabzugssystem ändert sich der Brandverlauf im Vergleich zu der vorigen Simulation insbesondere in der Branddauer sowie der Entwicklungs- und Abklinggeschwindigkeit. Die Unregelmäßigkeiten in der Vollbrandphase bleiben bestehen. Trotz der erwarteten höheren Sauerstoffzufuhr durch die Zuluft des Rauchabzugssystems ist die maximale HRR, wie in Abbildung 18 zu sehen, etwa 200 kW niedriger als die der dritten Simulation.

Die Aktivierung des Rauchabzugssystems durch zwei Rauchmelder findet nach 15 Sekunden statt. Ein direkter Einfluss im Vergleich zur dritten Simulation ist durch den Verlauf der HRR nicht festzustellen.

Wesentliche sich unterscheidende Kennwerte sind die maximale HRR, die etwa 20 Sekunden früher erreicht wird. Zudem ist die Abklingphase schneller beendet. Insgesamt erlischt der Brand etwa 30 Sekunden früher als der der Simulation 3.

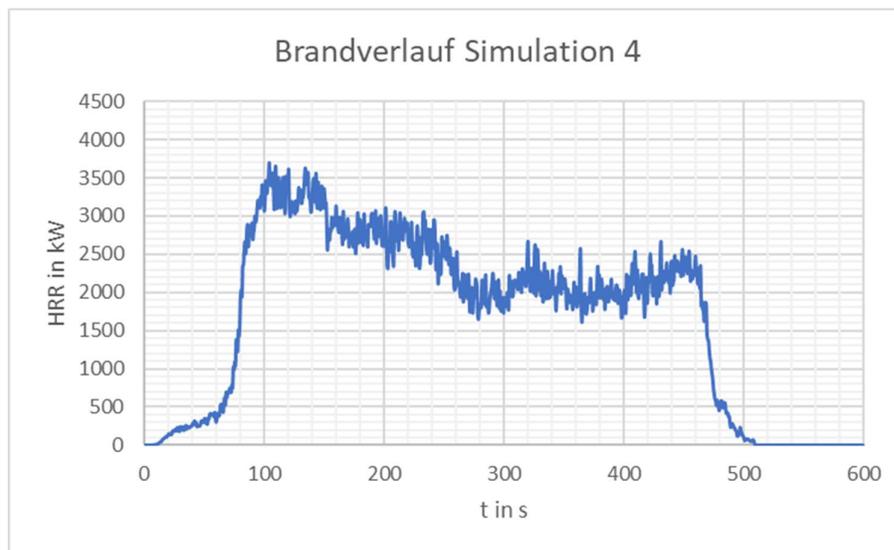


Abbildung 18: Simulation 4 - Wärmefreisetzungsrate/Brandverlauf

Bei der Grenzwertbetrachtung der Sichtweite in Abbildung 19 sind die Rauchabzüge des unteren Decks in blau zu sehen. Auf dem oberen Deck wird der Rauch durch eine durchlässige Decke über die gesamte Fläche abgesaugt. Die Funktion des Systems

ist im direkten Umkreis zu erkennen. Durch einen Vergleich der Ausbreitung der Grenzwertunterschreitung auf dem unteren Deck zwischen der dritten und vierten Simulation, fällt auf, dass das Rauchabzugssystem maßgeblich dazu beiträgt, dass die Grenzwertüberschreitung insbesondere im hinteren Bereich verzögert wird. Auch in der Verfügbarkeit der Flucht- und Rettungswege des unteren Decks fällt dies auf. Der erste Ausgang steht nach 58 Sekunden nicht mehr zur Verfügung. Der zweite Ausgang wird nach 100 Sekunden blockiert.

Bei der Betrachtung des oberen Decks ist ein Einfluss des Rauchabzugssystems zu erkennen. Visuell ist die Differenz zwischen der dritten und vierten Simulation mit fortlaufender Zeit gering. Durch die Verfügbarkeit der Flucht- und Rettungswege auf dem oberen Deck wird der Visuelle Eindruck bestätigt. Der erste Ausgang ist nach 100 Sekunden blockiert. Der zweite Ausgang hingegen ist nach 105 Sekunden nicht mehr sicher.

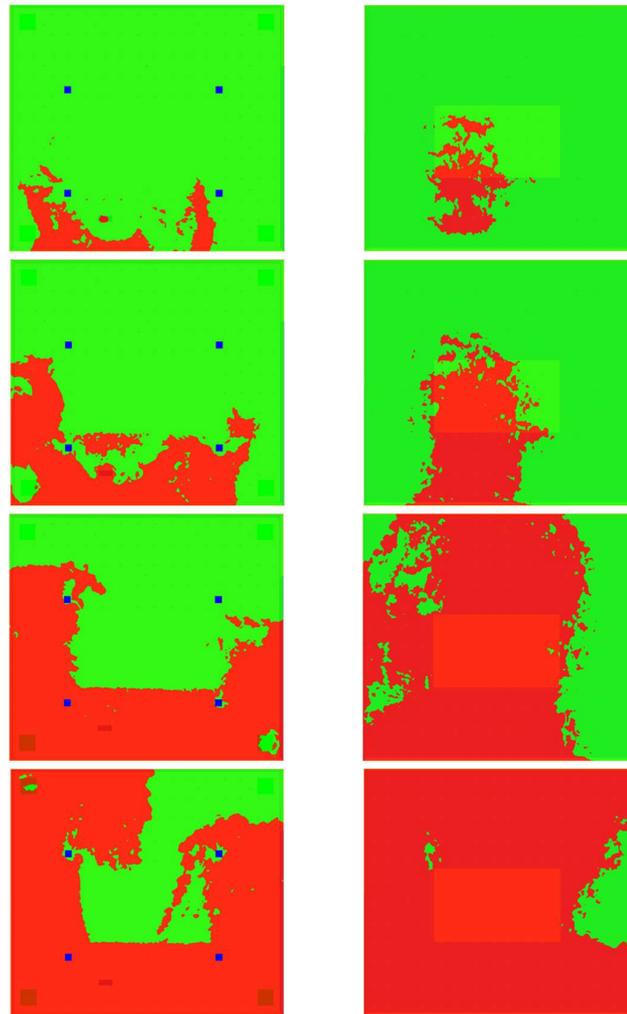


Abbildung 19: Simulation 4 - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 50, 80, 110 und 140 s, Höhe 2 m (links) und 4,6 m (rechts), (rot  $\leq 10$  m; grün = Akzeptanzbereich)

Beim Vergleich der Schnittbilder, Abbildung 16 und Abbildung 20, fällt auf, dass der Rauchabzug zu einer geringeren Rauchmenge auf Deck 1 beiträgt. Insbesondere im rechten Randbereich trifft der Rauch später ein. Im Bereich der Öffnung steigt nach 120 Sekunden eine visuell größere Menge an Brandrauch auf. Auf dem unteren Deck ist durch den nicht vorhandenen Niederschlag durch den Wassernebelvorhang weniger Rauch zu erkennen.

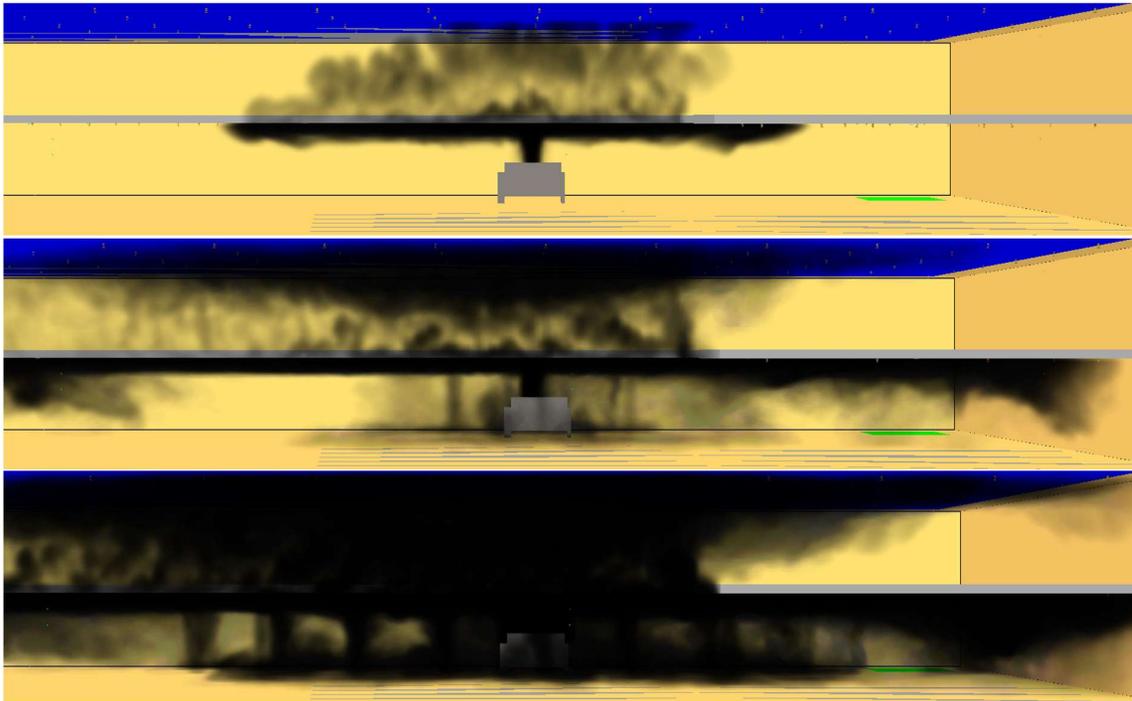


Abbildung 20: Simulation 4 – Einfluss des Rauchabzugssystems auf die Ausbreitung des Brandrauches nach 30, 60 und 90 s, Schnittebene  $y=18\text{ m}$

Bei der Grenzwertbetrachtung der Temperatur wird sichtbar, dass der Kühleffekt des Wassernebelvorhangs nicht so effektiv ist wie ein Absaugen des heißen Brandrauches. In Abbildung 21 ist zu sehen, dass der Grenzwert im Vergleich an weniger Stellen überschritten wird. Wie auch bereits bei der Simulation 3 wird der Temperaturgrenzwert auf dem oberen Deck nicht überschritten. Auch das Wassernebellöschsystem auf dem oberen Deck wird nicht ausgelöst. Demnach wird direkt unter der Decke keine Temperatur oberhalb von  $68\text{ °C}$  erreicht.

Der Verlauf der Temperatur an den Flucht- und Rettungswegen zeigt, dass ausschließlich der erste Ausgang auf Deck 0 nach 96 Sekunden blockiert wird. Alle weiteren Wege stehen über die gesamte Dauer des Brandes zur Verfügung. Demnach ist die Temperatur kein begrenzender Faktor für die sichere Evakuierungszeit im Brandfall.

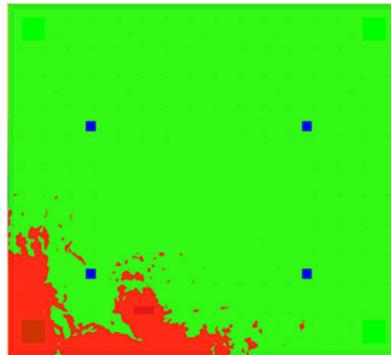


Abbildung 21: Simulation 4 - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 120 s, Höhe 2 m, (rot  $\geq 60$  °C; grün = Akzeptanzbereich)

Zusammenfassend trägt das Rauchabzugssystem insbesondere zur Sicherheit des unteren Decks bei. Die Evakuierungszeit wird maßgeblich durch die Sichtweite bestimmt. Auf Deck 0 ist eine sichere Evakuierung für 100 Sekunden möglich. Auf Deck 1 hingegen ist die Evakuierung für 105 Sekunden sicher.

#### **4.4 Simulation 5 – Einfluss und gegenseitige Beeinflussung des Wassernebelvorhangs und Rauchabzugssystems**

Bei der Betrachtung der Abbildung 22 fällt auf, dass der allgemeine HRR Verlauf eine Mischung der HRR von Simulation 3 und Simulation 4 ist. Die Steigung in der Brandentwicklungsphase ist kleiner als die Steigung in Simulation 4. Dennoch sind die in Simulation 3 zu sehenden Stufen in der Entwicklungsphase nicht mehr vorhanden. Die einzelnen Brandphasen dauern zudem alle ein wenig länger im Vergleich zur Simulation mit einem Rauchabzugssystem und ohne Wassernebelvorhang. Der Einfluss auf den Brandverlauf durch den Wassernebelvorhang ist zu erkennen. Auch die Abklingphase dauert länger und wird durch eine geringere Steigung der HRR beschrieben. Der Brand erlischt nach etwa 580 Sekunden. Das Ende des Brandes ist somit fast 20 Sekunden später als bei Simulation 3 und etwa 70 Sekunden später als in Simulation 4.

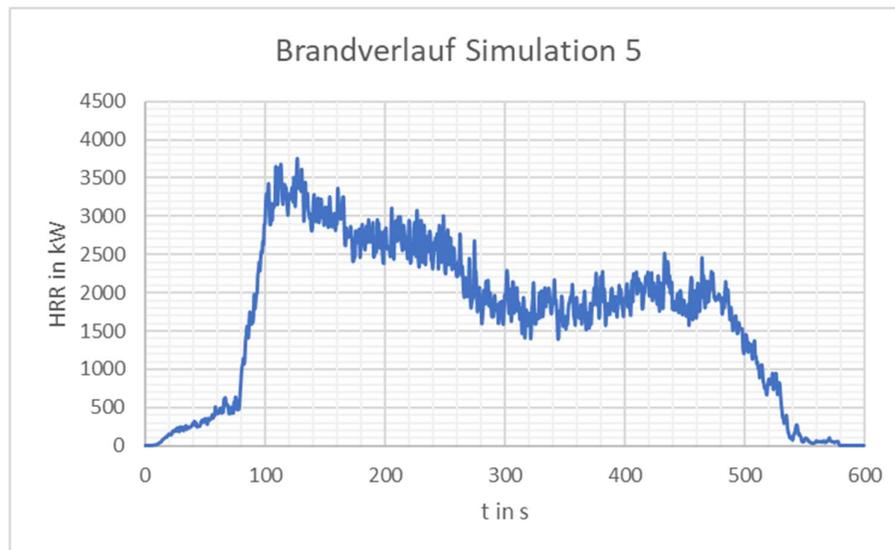


Abbildung 22: Simulation 5 - Wärmefreisetzungsrate/Brandverlauf

Im Rahmen der Grenzwertbetrachtung der Sichtweite in Abbildung 23 fällt auf, dass sowohl auf Deck 0 als auch auf Deck 1 die Grenzwertüberschreitung geringer als in Simulation 3 und Simulation 4 ausfällt. Durch das Absaugen und Niederschlagen des Rauches gelangt weniger Rauch in den hinteren Bereich des unteren Decks. Dadurch wird nimmt die Dicke der Rauchsicht langsamer zu und der Grenzwert der Sichtweite wird später unterschritten. Auch auf dem oberen Deck wird insbesondere im hinteren Bereich die Sichtweite auf einer kleineren Fläche unterschritten. Das zuvor beschriebene langsamere Ansteigen der HRR deutet auf eine langsamere Verbrennung hin, welche in einer langsameren Rauchproduktion und somit in einer späteren Grenzwertunterschreitung resultieren kann. Auch der Niederschlag des Braandrauches in der Nähe des Brandherdes kann zu einer langsameren Verbrennung durch eine geringere Sauerstoffkonzentration am Brandherd führen.

Das Rauchabzugssystem wird nach 16 s aktiviert. Dadurch, dass der Wassernebelvorhang über dasselbe Rauchmeldesystem aktiviert wird, ist der Wassernebelvorhang exakt 30 Sekunden später in Betrieb.

Bei einer Grenzwertbetrachtung der Sichtweite in den Flucht- und Rettungswegen aus den Bereichen fällt auf, dass der erste Ausgang aus dem unteren Deck bereits nach 56 s blockiert ist. Zur Blockade des zweiten Ausgangs kommt es nach 105 s. Auf dem ersten Deck ist der erste Ausgang nach 100 s aufgrund der durch den Rauch eingeschränkten Sichtweite nicht mehr benutzbar. Der zweite Ausgang ist nach 108 Sekunden blockiert. Die schnelle Abfolge der Blockaden auf dem Deck 1 lässt sich mit der Abbildung der Rauchausbreitung nach 110 s erläutern. Es ist zu erkennen, wie der

Ceiling-Jet auf die Wand trifft und die Rauchsicht an der Wand dicker wird. Dadurch, dass der Rauch aus der Deckenöffnung aufsteigt und die Ausgänge auf der y-Achse in einem ähnlichen Bereich, wie der Deckenausschnitt, liegen sind diese nah nacheinander blockiert.

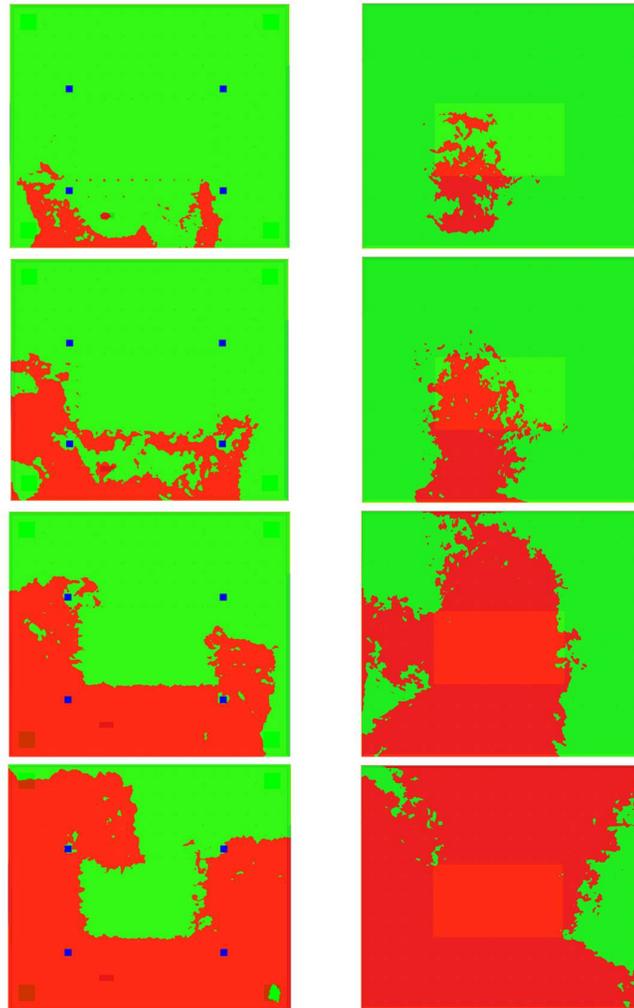


Abbildung 23: Simulation 5 - Grenzwertbetrachtung der Sichtweite nach 50, 80, 110 und 140 s, Höhe 2 m (links) und 4,6 m (rechts), (rot  $\leq 10$  m; grün = Akzeptanzbereich)

Im Schnittbild, Abbildung 24, wird die Rauchdichte und der niedergeschlagene Rauch sichtbar. Durch den niedergeschlagenen Rauch tritt weniger Rauch durch den Deckenausschnitt auf. Die Rauchdichte im unteren Bereich steigt dafür auch unterhalb von zwei Metern im Bereich des Brandherdes und entlang des gesamten Deckenausschnitts im Vergleich zur Simulation 4 an. Im Vergleich zur dritten und vierten Simulation ist die Rauchsicht nach einiger Zeit auf dem Deck 0 weniger eindeutig.

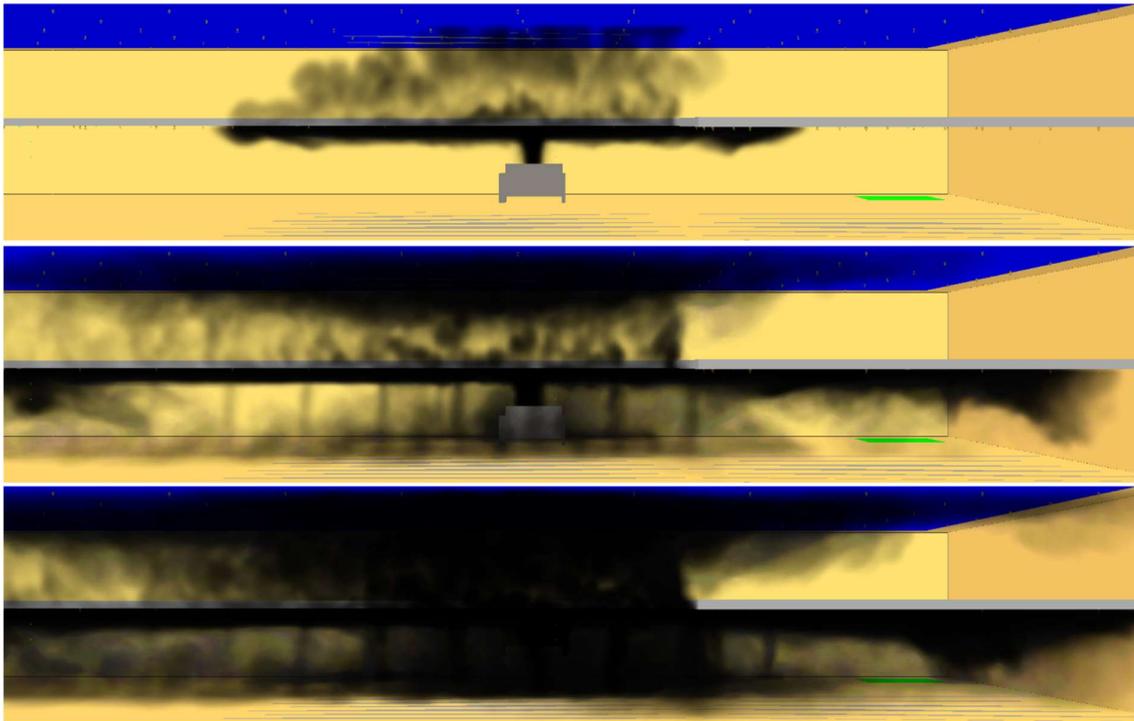


Abbildung 24: Simulation 5 – Einfluss des Wasserebelvorhangs und des Rauchabzugssystems auf die Ausbreitung des Brandrauches nach 30, 60 und 90 s, Schnittebene  $y=18\text{ m}$

Wie bereits bei der dritten und vierten Simulation wird auch bei der fünften Simulation der Temperaturgrenzwert an keiner Stelle auf Deck 1 überschritten. In Abbildung 25 ist die maximale Fläche der Grenzwertüberschreitung auf Deck 0 zu sehen. Diese ist etwas kleiner als bei Simulation 3 und Simulation 4. Ausschließlich der erste Flucht- und Rettungsweg auf dem unteren Deck wird durch ein Überschreiten von  $60\text{ °C}$  Umgebungslufttemperatur nach 109 s unbenutzbar. Demnach wird die sichere Evakuierungszeit beider Decks durch andere Grenzwerte bestimmt.

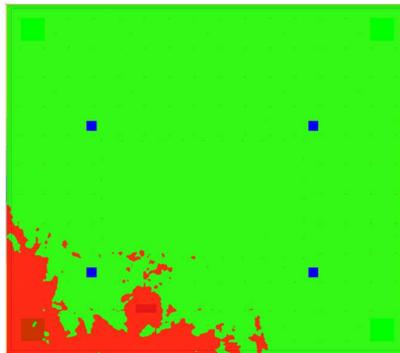


Abbildung 25: Simulation 5 - Grenzwertbetrachtung der Temperatur nach 120 s, Höhe 2 m, (rot  $\geq 60\text{ °C}$ ; grün = Akzeptanzbereich)

Zusammenfassend fällt bei der Simulation 5 insbesondere die längere Branddauer auf. Die Brandrauchdichte in der Nähe des Brandherdes scheint einen maßgeblichen Einfluss darauf zu haben. Zusätzlich kann ein Zerstäubungseffekt des Wassernebels durch die horizontalen Strömungen des Rauchabzugssystems zu einem höheren Kühleffekt führen. Durch den langsameren Brandverlauf werden auch die Grenzwerte der Sichtweite in vielen Bereichen später unterschritten.

Eine direkte gegenseitige Beeinflussung des Wassernebelvorhangs und des Rauchabzugssystems ist visuell nicht zu erkennen.

## 5 Diskussion und Ausblick

Im Allgemeinen ist zu erkennen, dass der eigentliche Verlauf des Brandes maßgeblich durch den Brennstoff und die Brandlast bestimmt wird. Sowohl das Wassernebellöschsystem als auch das Rauchabzugssystem und der Wassernebelvorhang beeinflussen hauptsächlich die Brandentwicklungs- und die Abklingphase.

Für die Bewertung der Ergebnisse ist hinzuzufügen, dass der bewusste Verzicht auf einen Bemessungsbrand maßgeblich zu den Ergebnissen beiträgt. Neben der erhöhten Rauchproduktion durch einen Schwelbrand zu Beginn fördert auch der Brennstoff, Polyurethan, die starke Rauchproduktion. Zudem kann sich der Brand durch die verstopfte Wassernebeldüse über dem Brandherd erst so weit entwickeln. In der Realität sind zusätzlich im Falle einer defekten Düse manuelle Lösversuche zu erwarten.

Zur Einordnung der Grenzwerte und Ermittlung der längsten ASET wird in Tabelle 2 die Dauer der Verfügbarkeit der Flucht- und Rettungswege aufgeführt.

*Tabelle 2: Ermittlung der ASET Zeiten für die Simulationen*

Simulation	Deck	Ausgang	Verfügbarkeit des Ausgangs in s auf Basis der		ASET in s
			Sichtweite	Temperatur	
1	0	1	47	105	75
		2	75	115	
2	0	1	47	92	75
		2	75	140	
3	0	1	50	94	76
		2	76	-	
	1	1	94	-	104
		2	104	-	
4	0	1	58	96	100
		2	100	-	
	1	1	100	-	105
		2	105	-	
5	0	1	56	109	105
		2	105	-	
	1	1	100	-	108
		2	108	-	

Bei einem Vergleich der ersten zwei Simulationen fällt auf, dass sich die ASET nicht unterscheidet. Die Grenzwertunterschreitung der Sichtweite im Ausgangsbereich wird

durch den Ceiling-Jet beeinflusst. Das Wasserlöschsystem beeinflusst die Sichtweite in der Nähe des Brandherdes.

Durch einen Vergleich der Grenzwerte für die Flucht und Rettungswege fällt auf, dass durch den Einsatz des Rauchabzugssystems ein deutlicher Zuwachs der Sicherheit gegenüber dem Wassernebelvorhang erreicht wird. Die längste Zeit zur Evakuierung steht nach Tabelle 2 bei einer Kombination beider Systeme zur Verfügung. Bei allen Simulationen ist der begrenzende Faktor die Sichtweite.

Die Ergebnisse der Simulationen müssen dennoch kritisch betrachtet werden. Die Zeit, zu der eine Sichtweite von zehn Metern unterschritten wurde, wird visuell aus der Schnittebene mit der Grenzwertunterschreitung der Sichtweite ermittelt. Hinzu kommt, dass durch den Einsatz des Wassernebellöschsystems und den Wassernebelvorhang eine große Fläche komplett unbenutzbar wird. Eine klare raucharme Schicht liegt in diesen Bereichen nicht vor. Im hinteren Teil des Bereichs ist die Rauchsichtung meist noch stabil. Dadurch sind Evakuierungen trotz der Grenzwertunterschreitung grundsätzlich in der raucharmen Schicht noch möglich.

Der Einfluss des Niederschlagens von Brandrauch durch Wasserlöschsysteme ist eindeutig zu erkennen. Die hier negativ auffallenden Effekte der Wasserlöschsysteme können und werden zum Teil bereits positiv genutzt. Es gibt die Möglichkeit den Rauch mit Hochdruckwassernebellöschsystemen in die Richtung eines Rauchabzuges zu lenken. Ein Beispiel dafür ist ein im Schluen Haus in Oldenburg verbautes „schlaues Wassernebelsystem“ [30]. Auch manuelle Brandbekämpfungseinheiten nutzen diesen Effekt im Rahmen der sogenannten hydraulischen Ventilation aus. Dabei wird ein Sprühstrahl aus dem Brandraum durch ein Fenster oder ähnliches heraus gerichtet. Durch den Venturi-Effekt wird Brandrauch nach draußen befördert [31].

Auch wenn in der Simulation 5 visuell keine gegenseitige Beeinflussung des Wassernebelvorhangs und des Rauchabzugssystems zu erkennen ist, lässt sich eine Beeinflussung durch die zu sehenden Effekte erklären. Durch das Rauchabzugssystem werden Strömungen nach oben gerichtet. Neben der Absaugung wird dadurch auch die Bildung einer stabilen Rauchsicht unterstützt. Wasserlöschsysteme hingegen wirken mit einer Strömung von oben nach unten. Die Strömungen beider Systeme sind entgegengesetzt gerichtet und schwächen sich somit gegenseitig ab. Zusätzlich kommt es in einigen Bereichen durch das Rauchabzugssystem zu horizontalen Strömungen. Durch diese kann der Wassernebel abgelenkt und ein größerer Kühleffekt erreicht werden.

Es ist hinzuzufügen, dass die Ergebnisse dieser Simulation nicht generalisiert werden können. Die betrachteten Einflüsse hängen maßgeblich von den verwendeten Systemen und deren Auslegung ab. Es gibt beispielsweise auch Wassernebeldüsen, die ein flaches Sprühbild erzeugen, welches einer „Wasserwand“ ähnelt. Die USCG fordert in der Vorgangsnummer SOLAS-13 kein bestimmtes Sprühbild oder bestimmten Sprühwinkel für die Düsen. Es ist zu erwarten, dass ein Flaches Sprühbild für den Anwendungszweck des Wassernebelvorhangs wesentlich geeigneter ist. Da keine Anforderungen für Sprühbild und -winkel seitens der USCG gestellt werden, müssen jedoch insbesondere weniger effektive und dennoch zulässige Systeme betrachtet werden.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit kann man die Anforderungen der USCG in Frage stellen. Ein Rauchabzugssystem wie es beispielsweise auch in der SOLAS für Atrien gefordert wird, wird von der USCG eventuell nicht anerkannt, obwohl es zu einer längeren ASET als der hier simulierte Wassernebelvorhang führt.

Trotz der validierten Daten für die Simulation der Wassernebellöschdüsen und den validierten Daten zum Brandszenario kann das Ergebnis auch für die verwendeten Komponenten nicht generalisiert werden. Die verwendete Geometrie und die Strömungseinflüsse sind sehr idealisiert. Es kann zu weiteren Strömungseinflüssen durch Türen und andere Öffnungen kommen. Auch der Einfluss durch Möblierung ist nicht zu vernachlässigen. Das gilt sowohl für die Brandlasten als auch für die Strömungseinflüsse.

Es ist erforderlich die Effekte für jeden Anwendungszweck mit der individuellen Geometrie und den Daten der verwendeten Systeme zu untersuchen. Bei komplexeren und ausführlicheren Systemen hilft auch eine Betrachtung der Flucht- und Rettungswege im inneren des Bereichs.

In dem betrachteten Bereich ist viel Potential für weitere Untersuchungen vorhanden. Neben der Begutachtung von weiteren Systemen und Geometrien ist eine Betrachtung in einem weniger idealen Modell interessant. Einflüsse durch Öffnungen, und Möbel sollten untersucht werden. Auch wenn davon durch die Literatur nicht ausgegangen wird, kann die Betrachtung weiterer Grenzwerte zu einem anderen Ergebnis führen. Der Vergleich eines Realbrandversuchs mit einer Simulation für eine bessere Validierung der Daten kann hilfreich sein.

Genauere Analysen zur gegenseitigen Beeinflussung von Wassernebellöschsystemen und Rauchabzugssystemen sollten durchgeführt werden. Die Ablenkung durch

horizontale Strömungen kann beispielsweise die Wirkung eines Löschsyste.ms oder eines Wassernebelvorhangs beeinflussen.

Entwicklungspotential im Bereich der automatischen Feuerlöschsyste.me ist auch zu erkennen. Durch eine Optimierung der Auslösung könnten gezielt nur die Düsen, die zur Brandbekämpfung erforderlich sind, ausgelöst werden. Ein unerwünschtes Niederschlagen des Brandrauches durch in der Nähe liegende Düsen würde so vermieden werden. Jedoch entfällt auch der Kühleffekt der Wärmestrahlung.

## Literaturverzeichnis

- [1] Garri G. Fire on board ship. In Masellis M, Gunn SWA. The Management of Mass Burn Casualties and Fire Disasters. Dordrecht: Springer Netherlands; 1992. p. 93-105.
- [2] International Maritime Organization (IMO). SOLAS - International Convention for the Safety of Life at Sea. Consolidated Edition. London; 2020.
- [3] International Maritime Organization (IMO). FSS Code - International Code for Fire Safety Systems. London; 2020.
- [4] International Maritime Organization (IMO). Resolution A.800(19) - Revised Guidelines for Approval of Sprinkler Systems Equivalent to that Referred to in SOLAS Regulation II-2/12. London; 1995.
- [5] International Maritime Organization (IMO). MSC.1/Circ. 1552 - Amendments to the Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety (MSC/CIRC.1002). London; 2016.
- [6] U.S. Coast Guard Marine Safety Center. MSC Guidelines for Protection of Deck Openings in Two Deck Spaces - Procedure Number: SOLAS-13; 2016.
- [7] Kurzweil P. Chemie - Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2015.
- [8] Friedman R. Chemical Equilibrium. In SFPE. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy: NFPA, National Fire Protection Agency; 2002.
- [9] Referat 10 - Umweltschutz - des Technisch Wissenschaftlichen Beirates der vfdb. vfdb-Richtlinie 10/03 - Schadstoffe bei Bränden München: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb); 1997.
- [10] Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI 6019 - Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden. In VDI. VDI-Handbuch Technische Gebäudeausrüstung, Band 2: Raumluftechnik. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2006.
- [11] Zehfuß J. Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 4. Auflage. Münster; Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb); 2020.
- [12] Mowrer FW. Enclosure Smoke Filling and Fire-Generated Environmental Conditions. In SFPE. Society of Fire Protection Engineers (SFPE) Handbook of Fire Protection Engineering. 5th Edition. Greenbelt: Springer New York Heidelberg Dordrecht London; 2016. p. 1066-1102.
- [13] Lein P. Brandschutztechnische Anlagen betreiben und instandhalten Wiesbaden: Springer Vieweg; 2018.
- [14] Merschbacher A. Brandschutzfibel. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg; 2021.

- [15] Europäisches Komitee für Normung (CEN). Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen - Feinsprüh-Löschanlagen - Teil 1: Planung, Einbau, Inspektion und Wartung; Deutsche Fassung EN 14972-1:2020. DIN e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2021.
- [16] Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz - Projektgruppe 5 "Einheitlicher Sprachgebrauch". Wörterbuch des Zivil- und Katastrophenschutzes. Köln: Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz; 2003.
- [17] International Organization for Standardization (IOS). Brandschutz – Vokabular (ISO 13943:2017); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 13943:2017. DIN e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2018.
- [18] Xie H. Investigation into the Interaction of People with Signage Systems and its Implementation within Evacuation Models. Greenwich; 2011.
- [19] International Maritime Organization (IMO). MSC/Circ.1002 - Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety. London; 2001.
- [20] RiMEA e.V. Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA). Version 3.0.0. Duisburg; 2016.
- [21] Gwynne SMV, Boyce KE. Engineering Data. In SFPE. Society of Fire Protection Engineers (SFPE) Handbook of Fire Protection Engineering. 5th Edition. Greenbelt: Springer New York Heidelberg Dordrecht London; 2016. p. 2429-2551.
- [22] International Maritime Organization (IMO). MSC.1/Circ.1533 - Revised Guidelines on Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships London; 2016.
- [23] National Institute of Standards and Technology (NIST) U.S. Department of Commerce. NIST Special Publication 1019-6 - Fire Dynamics Simulator User's Guide; 2013.
- [24] Babrauskas V, Krasny J. Fire Behaviour of Upholstered Furniture - NBS Monograph 173. Gaithersburg, MD 20899: National Engineering Laboratory - Center for Fire Research, National Bureau of Standards; 1985.
- [25] Thunderhead Engineering. PyroSim - Room Fire; 2019.
- [26] Themelis N, Mermiris G, Cai W. FIREPROOF - Probabilistic Framework for Onboard Fire Safety - Fire Ignition Model Specification (D1.2).; 2010.
- [27] Society of Fire Protection Engineers (SFPE). Appendix C - Fuel Properties and Combustion Data. In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Quincy: NFPA, National Fire Protection Agency; 2002.
- [28] Henriques A, Dias C, Lopes ED. FIREPROOF - Probabilistic Framework for Onboard Fire Safety - Societal Consequence Model (D2.3).; 2011.

- [29] Vaari J et al. Numerical simulations on the performance of waterbased fire suppression systems. Espoo: VTT; 2012.
- [30] Flock A. Das Schlaue Haus in Oldenburg. FeuerTrutz. 2013.
- [31] de Vries H. Fachwissen Feuerwehr - Einsatz von Hohlstrahlrohren: ecomed SICHERHEIT; 2017.

# Anhang

## A Exemplarischer FDS Code

Erklärungen, die nicht im Code enthalten sind, werden im Folgenden blau geschrieben.

Mit „[...]“ sind Auslassungen gekennzeichnet, die zur Kompaktheit des Anhangs nicht mit dargestellt werden.

*Titel und Simulationsdauer:*

```
&HEAD CHID='Firesimulation_Sprinkler_Mist_Curtain_Extraction',  
TITLE='Firesimulation_Bachelor_Thesis_05'/
```

```
&TIME T_END=600.0/
```

*Berechnungsbereich (Aufteilung zur Simulation durch mehrere Prozessoren):*

*Deck 0:*

```
&MESH ID='Mesh01', IJK=100,90,25, XB=0.0,10.0,0.0,9.0,0.0,2.5/
```

[...]

```
&MESH ID='Mesh16', IJK=100,90,25, XB=30.0,40.0,27.0,36.0,0.0,2.5/
```

*Deck 1:*

```
&MESH ID='Mesh17', IJK=100,90,25, XB=0.0,10.0,0.0,9.0,2.5,5.0/
```

[...]

```
&MESH ID='Mesh32', IJK=100,90,25, XB=30.0,40.0,27.0,36.0,2.5,5.0/
```

*Eigenschaften der Verbrennung, Wassernebeldüsen und Rauchmelder:*

```
&PART ID='Ignitor Particle',STATIC=.TRUE.,SURF_ID='Ignitor'/
```

```
&REAC ID='POLYURETHANE',FUEL='REAC_FUEL',C=6.3,H=7.1,O=2.1,N=1.0,  
SOOT_YIELD=0.1/
```

```
&SPEC ID='WATER VAPOR'/
```

```
&PART ID='mist',DIAMETER=83.0,SPEC_ID='WATER VAPOR'/
```

&PROP ID='NOZZLE',QUANTITY='SPRINKLER LINK TEMPERATURE',  
RTI=10.0,ACTIVATION\_TEMPERATURE=68.0,OFFSET=0.1,PART\_ID='mist',  
FLOW\_RATE=1.67,PARTICLE\_VELOCITY=14.0,SPRAY\_ANGLE=0.0,30.0,  
SMOKEVIEW\_ID='sprinkler\_pendent'/

&PROP ID='CNOZZLE',OFFSET=0.1,PART\_ID='mist',FLOW\_RATE=1.67,  
PARTICLE\_VELOCITY=14.0,SPRAY\_ANGLE=0.0,30.0,  
SMOKEVIEW\_ID='sprinkler\_pendent'/

&PROP ID='SMOKE\_DETECTOR', QUANTITY='CHAMBER OBSCURATION',  
LENGTH=1.8,ACTIVATION\_OBSCURATION=3.24 /

*Funktionen zur Aktivierung von Rauchabzugs- und Wasserlöschsyste men:*

&CTRL ID='NOZZLE\_TRIGGER', FUNCTION\_TYPE='ALL',  
INPUT\_ID='smoke','delay' /

&CTRL ID='delay', FUNCTION\_TYPE='TIME\_DELAY', INPUT\_ID='smoke',  
DELAY=30. /

&CTRL ID='smoke', FUNCTION\_TYPE='AT\_LEAST', N=2,  
INPUT\_ID='SD01','SD02','SD03','SD04','SD05',  
'SD06','SD07','SD08','SD09','SD10','SD11','SD15','SD16','SD20',  
'SD21','SD22','SD23','SD24','SD25','SD26','SD27','SD28','SD29','SD30' /

*Positionen der Wassernebeldüsen Deck 0:*

First Row:

&DEVC ID='Nozzle01', XYZ=1.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle02', XYZ=3.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle03', XYZ=6.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle04', XYZ=8.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle05', XYZ=11.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle06', XYZ=13.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle07', XYZ=16.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle08', XYZ=18.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle09', XYZ=21.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle10', XYZ=23.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle11', XYZ=26.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

&DEVC ID='Nozzle12', XYZ=28.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle13', XYZ=31.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle14', XYZ=33.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle15', XYZ=36.25,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle16', XYZ=38.75,1.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

Second Row:

&DEVC ID='Nozzle17', XYZ=1.25,4.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

[...]

\*\*\*Deleted/Deactivated due to clogging: DEVC ID='Nozzle22', XYZ=13.75,4.5,2.35,  
PROP\_ID='NOZZLE'\*\*\*

[...]

&DEVC ID='Nozzle32', XYZ=38.75,4.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

Third Row:

&DEVC ID='Nozzle33', XYZ=1.25,7.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

[...]

&DEVC ID='Nozzle48', XYZ=38.75,7.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

Fourth Row:

&DEVC ID='Nozzle49', XYZ=1.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

&DEVC ID='Nozzle50', XYZ=3.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

&DEVC ID='Nozzle51', XYZ=6.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

&DEVC ID='Nozzle52', XYZ=8.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

\*\*\*Lines not used due to hole in the ceiling\*\*\*

DEVC ID='Nozzle53', XYZ=11.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'

DEVC ID='Nozzle54', XYZ=13.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'

DEVC ID='Nozzle55', XYZ=16.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'

DEVC ID='Nozzle56', XYZ=18.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'

DEVC ID='Nozzle57', XYZ=21.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'

DEVC ID='Nozzle58', XYZ=23.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'

DEVC ID='Nozzle59', XYZ=26.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'  
DEVC ID='Nozzle60', XYZ=28.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'  
\*\*\*END\*\*\*

&DEVC ID='Nozzle61', XYZ=31.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
&DEVC ID='Nozzle62', XYZ=33.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
&DEVC ID='Nozzle63', XYZ=36.25,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
&DEVC ID='Nozzle64', XYZ=38.75,10.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'

Fifth Row:

&DEVC ID='Nozzle65', XYZ=1.25,13.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
[...]  
&DEVC ID='Nozzle80', XYZ=38.75,13.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'

Sixth Row:

&DEVC ID='Nozzle81', XYZ=1.25,16.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
[...]  
&DEVC ID='Nozzle96', XYZ=38.75,16.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'

Seventh Row:

&DEVC ID='Nozzle97', XYZ=1.25,19.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
[...]  
&DEVC ID='Nozzle112', XYZ=38.75,19.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'

Eighth Row:

&DEVC ID='Nozzle113', XYZ=1.25,22.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
[...]  
&DEVC ID='Nozzle128', XYZ=38.75,22.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'

Ninth Row:

&DEVC ID='Nozzle129', XYZ=1.25,25.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE/'  
[...]

&DEVC ID='Nozzle144', XYZ=38.75,25.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

Tenth Row:

&DEVC ID='Nozzle145', XYZ=1.25,28.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

[...]

&DEVC ID='Nozzle160', XYZ=38.75,28.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

Eleventh Row:

&DEVC ID='Nozzle161', XYZ=1.25,31.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

[...]

&DEVC ID='Nozzle176', XYZ=38.75,31.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

Twelfth Row:

&DEVC ID='Nozzle177', XYZ=1.25,34.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

[...]

&DEVC ID='Nozzle192', XYZ=38.75,34.5,2.35, PROP\_ID='NOZZLE'/

Rauchmelder:

First Row:

&DEVC ID='SD01', XYZ=5,3,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

&DEVC ID='SD02', XYZ=12.5,3,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

&DEVC ID='SD03', XYZ=20,3,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

&DEVC ID='SD04', XYZ=27.5,3,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

&DEVC ID='SD05', XYZ=35,3,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

Second Row:

&DEVC ID='SD06', XYZ=5,9,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

[...]

&DEVC ID='SD10', XYZ=35,9,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

Third Row:

&DEVC ID='SD11', XYZ=5,15,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

\*\*\*Not used because of hole\*\*\*

DEVC ID='SD12', XYZ=12.5,15,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'

DEVC ID='SD13', XYZ=20,15,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'

DEVC ID='SD14', XYZ=27.5,15,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'

\*\*\*End\*\*\*

&DEVC ID='SD15', XYZ=35,15,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

Fourth Row:

&DEVC ID='SD16', XYZ=5,21,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

[...]

&DEVC ID='SD20', XYZ=35,21,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

Fifth Row:

&DEVC ID='SD21', XYZ=5,27,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

[...]

&DEVC ID='SD25', XYZ=35,27,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

Sixth Row:

&DEVC ID='SD26', XYZ=5,33,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

[...]

&DEVC ID='SD30', XYZ=35,33,2.38, PROP\_ID='SMOKE\_DETECTOR'/

Nozzles for Watermistcurtain:

Curtain Front:

&DEVC ID='CNozzle01', XYZ=9.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle02', XYZ=11.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle03', XYZ=13.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle04', XYZ=15.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle05', XYZ=17.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle06', XYZ=19.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle07', XYZ=21.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle08', XYZ=23.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle09', XYZ=25.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle10', XYZ=27.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle11', XYZ=29.5,10.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

Curtain Back:

&DEVC ID='CNozzle12', XYZ=9.5,22.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

[...]

&DEVC ID='CNozzle22', XYZ=29.5,22.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

Curtain LEFT:

&DEVC ID='CNozzle23', XYZ=9.5,12.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle24', XYZ=9.5,14.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle25', XYZ=9.5,16.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle26', XYZ=9.5,18.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

&DEVC ID='CNozzle27', XYZ=9.5,20.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

Curtain Right:

&DEVC ID='CNozzle28', XYZ=29.5,12.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

[...]

&DEVC ID='CNozzle32', XYZ=29.5,20.0,2.35, PROP\_ID='CNOZZLE',  
QUANTITY='CONTROL', CTRL\_ID='NOZZLE\_TRIGGER' /

*Positionen der Wasserebeldüsen vom Deck 1:*

First Row:

&DEVC ID='Nozzle193', XYZ=1.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle194', XYZ=3.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle195', XYZ=6.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle196', XYZ=8.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle197', XYZ=11.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle198', XYZ=13.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle199', XYZ=16.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle200', XYZ=18.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle201', XYZ=21.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle202', XYZ=23.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle203', XYZ=26.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle204', XYZ=28.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle205', XYZ=31.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle206', XYZ=33.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle207', XYZ=36.25,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/  
&DEVC ID='Nozzle208', XYZ=38.75,1.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/

Second Row:

&DEVC ID='Nozzle209', XYZ=1.25,4.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/

[...]

&DEVC ID='Nozzle224', XYZ=38.75,4.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/

Third Row:

&DEVC ID='Nozzle225', XYZ=1.25,7.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/

[...]

&DEVC ID='Nozzle240', XYZ=38.75,7.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE'/

Fourth Row:

&DEVC ID='Nozzle241', XYZ=1.25,10.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle256', XYZ=38.75,10.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Fifth Row:

&DEVC ID='Nozzle257', XYZ=1.25,13.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle272', XYZ=38.75,13.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Sixth Row:

&DEVC ID='Nozzle273', XYZ=1.25,16.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle288', XYZ=38.75,16.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Seventh Row:

&DEVC ID='Nozzle289', XYZ=1.25,19.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle304', XYZ=38.75,19.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Eighth Row:

&DEVC ID='Nozzle305', XYZ=1.25,22.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle320', XYZ=38.75,22.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Ninth Row:

&DEVC ID='Nozzle321', XYZ=1.25,25.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle336', XYZ=38.75,25.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Tenth Row:

&DEVC ID='Nozzle337', XYZ=1.25,28.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle352', XYZ=38.75,28.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Eleventh Row:

&DEVC ID='Nozzle353', XYZ=1.25,31.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle368', XYZ=38.75,31.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

Twelfth Row:

&DEVC ID='Nozzle369', XYZ=1.25,34.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

[...]

&DEVC ID='Nozzle384', XYZ=38.75,34.5,4.95, PROP\_ID='NOZZLE/'

#### *Materialien und Oberflächen:*

&MATL ID='Fabric',SPECIFIC\_HEAT=1.0,CONDUCTIVITY=0.1,DENSITY=100.0,  
HEAT\_OF\_COMBUSTION=1.5E4,N\_REACTIONS=1,  
HEAT\_OF\_REACTION=1000.0,SPEC\_ID(1,1)='REAC\_FUEL',NU\_SPEC(1,1)=1.0,  
REFERENCE\_TEMPERATURE=280.0/

&MATL ID='FOAM',SPECIFIC\_HEAT=1.0,CONDUCTIVITY=0.05,DENSITY=40.0,  
HEAT\_OF\_COMBUSTION=3.0E4,N\_REACTIONS=1,HEAT\_OF\_REACTION=800.0,  
SPEC\_ID(1,1)='REAC\_FUEL',NU\_SPEC(1,1)=1.0,  
REFERENCE\_TEMPERATURE=300.0/

&SURF ID='Upholstery', RGB=120,116,110, BURN\_AWAY=.TRUE.,  
BACKING='INSULATED', MATL\_ID(1,1)='Fabric', MATL\_ID(2,1)='FOAM',  
MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0, MATL\_MASS\_FRACTION(2,1)=1.0,  
THICKNESS(1:2)=2.0E-3,0.1/

&SURF ID='Steel', COLOR='GRAY 60/'

&SURF ID='Ignitor',  
RGB=255,102,0,TMP\_FRONT=1000.0,GEOMETRY='CYLINDRICAL',LENGTH=0.15  
,RADIUS=0.01/

Ventilation:

&SURF ID='SUPPLY', VEL=-0.8, COLOR='GREEN'/

&SURF ID='EXHAUST\_CEILING', VOLUME\_FLOW=11.52, COLOR='BLUE'/

&SURF ID='EXHAUST', VOLUME\_FLOW=1.92, COLOR='BLUE'/

*Partikel:*

&INIT ID='Ignitor', PART\_ID='Ignitor Particle', N\_PARTICLES=1,  
XYZ=13.65,4.5,0.65/

&INIT ID='Ignitor', PART\_ID='Ignitor Particle', N\_PARTICLES=1,  
XYZ=13.75,4.5,0.65/

&INIT ID='Ignitor', PART\_ID='Ignitor Particle', N\_PARTICLES=1,  
XYZ=13.85,4.5,0.65/

*Objekte:*

&OBST ID='Seat cushion', XB=12.95,14.55,4.1,4.9,0.2,0.6, SURF\_ID='Upholstery'/

&OBST ID='Right armrest', XB=12.75,12.95,4.1,4.9,0.0,0.9, SURF\_ID='Upholstery'/

&OBST ID='Left armrest', XB=14.55,14.75,4.1,4.9,0.0,0.9, SURF\_ID='Upholstery'/

&OBST ID='Back cushion', XB=12.95,14.55,4.7,4.9,0.6,1.2, SURF\_ID='Upholstery'/

&OBST ID='Floor', XB=0.0,40.0,0.0,36.0,-0.2,0.0, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Front Wall', XB=0.0,40.0,0.0,0.0,0.0,2.4, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Left Wall', XB=0.0,0.0,0.0,36.0,0.0,2.4, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Right Wall', XB=40.0,40.0,0.0,36.0,0.0,2.4, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Back Wall', XB=0.0,40.0,36.0,36.0,0.0,2.4, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Ceiling', XB=0.0,40.0,0.0,36.0,2.4,2.6, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Front Wall2', XB=0.0,40.0,0.0,0.0,2.6,5.0, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Left Wall2', XB=0.0,0.0,0.0,36.0,2.6,5.0, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Right Wall2', XB=40.0,40.0,0.0,36.0,2.6,5.0, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Back Wall2', XB=0.0,40.0,36.0,36.0,2.6,5.0, SURF\_ID='Steel'/

&OBST ID='Ceiling2', XB=0.0,40.0,0.0,36.0,5.0,5.2, SURF\_ID='Steel'/

&HOLE XB=10.0,29.0,10.5,21.5,2.3,2.7/

*Rauchabzugssystem:*

Exhausts and Inlets:

&VENT ID='INLET01', XB=1.0,3.449,1.0,3.449,0.0,0.0,  
SURF\_ID='SUPPLY',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='INLET02', XB=36.551,39.0,1.0,3.449,0.0,0.0,  
SURF\_ID='SUPPLY',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='INLET03', XB=1.0,3.449,32.551,35.0,0.0,0.0,  
SURF\_ID='SUPPLY',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='INLET04', XB=36.551,39.0,32.551,35.0,0.0,0.0,  
SURF\_ID='SUPPLY',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='EXHAUST\_C01', XB=1.0,39.0,1.0,35.0,5.0,5.0,  
SURF\_ID='EXHAUST\_CEILING',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='EXHAUST01', XB=8.0,9.0,8.0,9.0,2.4,2.4,  
SURF\_ID='EXHAUST',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='EXHAUST02', XB=30.0,31.0,8.0,9.0,2.4,2.4,  
SURF\_ID='EXHAUST',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='EXHAUST03', XB=8.0,9.0,23.0,24.0,2.4,2.4,  
SURF\_ID='EXHAUST',CTRL\_ID='smoke'/

&VENT ID='EXHAUST04', XB=30.0,31.0,23.0,24.0,2.4,2.4,  
SURF\_ID='EXHAUST',CTRL\_ID='smoke'/

*Output - Schnittebenen und Sensoren:*

&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=2.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.1/

&SLCF QUANTITY='VISIBILITY', PBZ=4.6/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=4.6/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=4.7/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=0.0/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=2.4/

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBZ=5.0/

&DEVC ID='T\_1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1,12,2/

&DEVC ID='T\_2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1,24,2/

&DEVC ID='T\_3', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1,12,4.6/

&DEVC ID='T\_4', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1,24,4.6/

*Kommunikation der Meshes untereinander ermöglichen:*

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [XMAX]', SURF\_ID='OPEN',  
XB=10.0,10.0,0.0,9.0,0.0,2.5/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN',  
XB=0.0,10.0,9.0,9.0,0.0,2.5/

[...]

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [XMAX]', SURF\_ID='OPEN',  
XB=20.0,20.0,9.0,18.0,0.0,2.5/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN',  
XB=10.0,20.0,18.0,18.0,0.0,2.5/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh06 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN',  
XB=10.0,20.0,10.5,18.0,2.5,2.5/

[...]

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh31 [XMAX]', SURF\_ID='OPEN',  
XB=30.0,30.0,27.0,36.0,2.5,5.0/

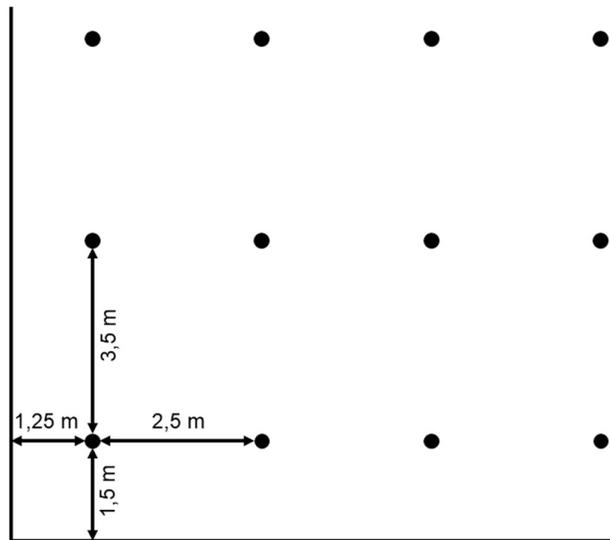
*Definierung des Innenraumes als eine Druckzone:*

&ZONE ID='ZONE\_01', XB=1.0,39.0,1.0,35.0,1.8,4.8/

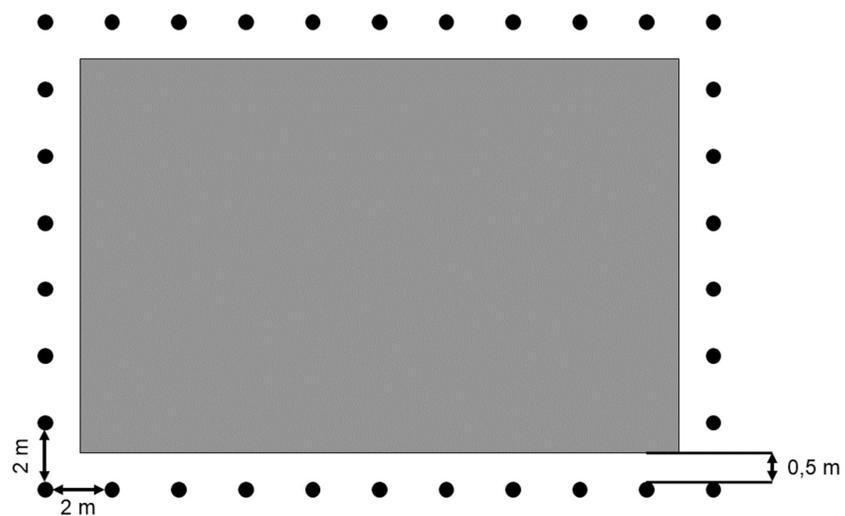
&TAIL/

## B Abbildungen Raster – Wassernebeldüsen und Rauchmelder

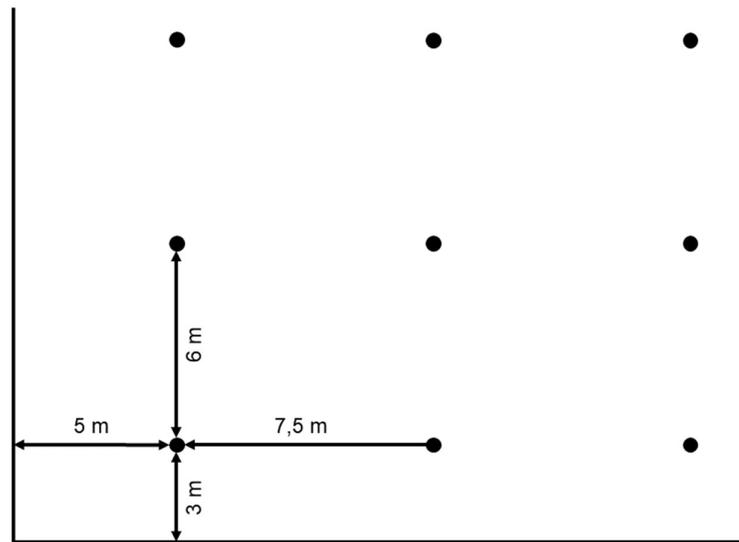
### a Abstände und Raster des Wassernebellöschsystems



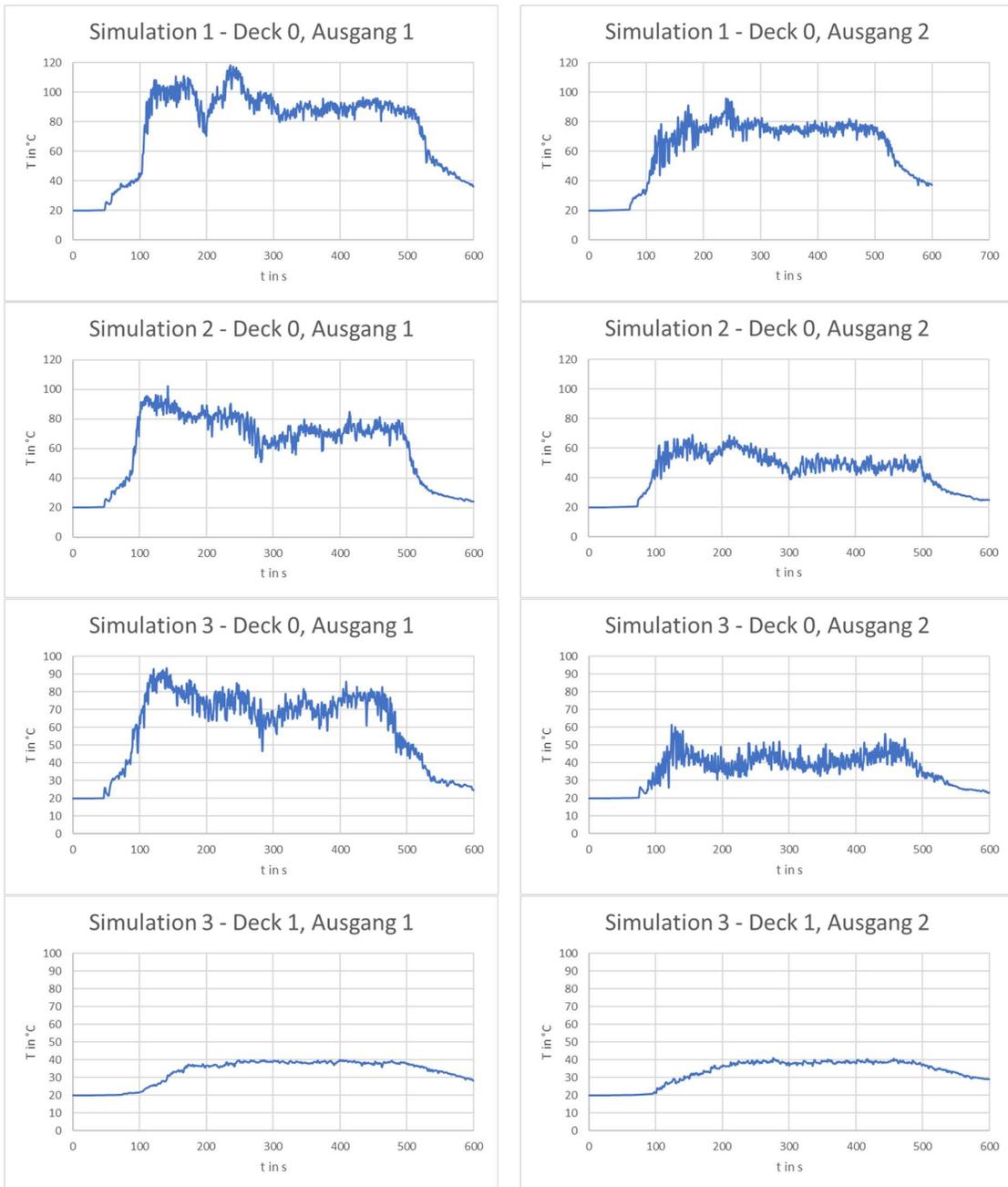
### b Positionen der Düsen des Wassernebelvorhangs

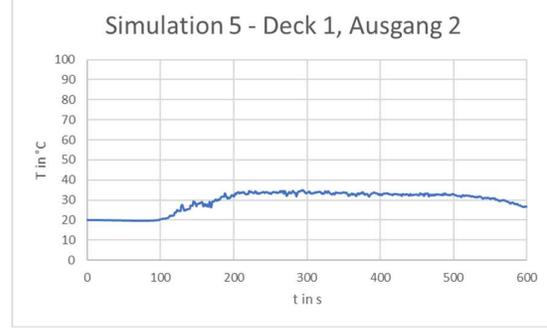
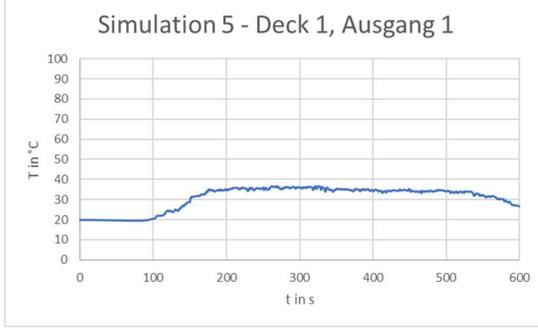
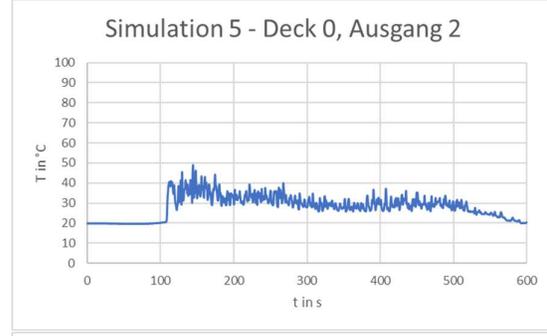
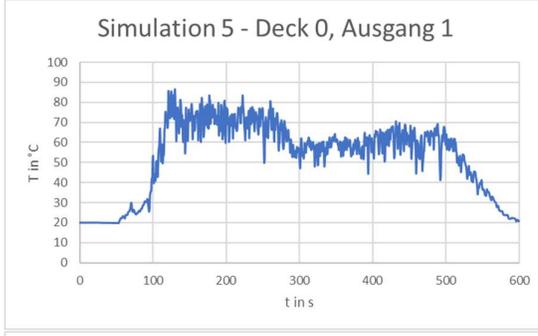
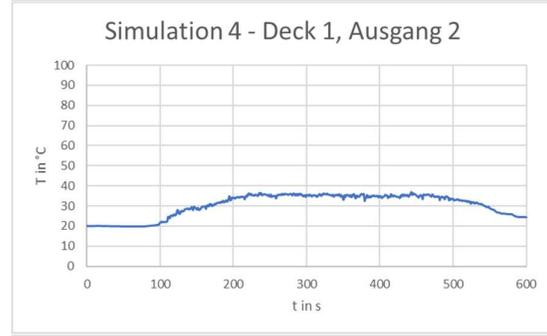
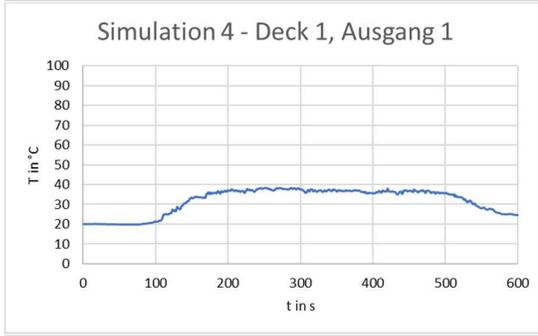
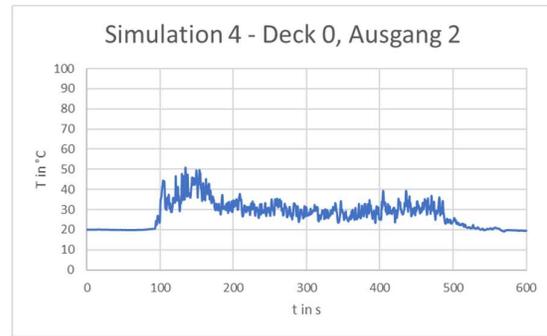
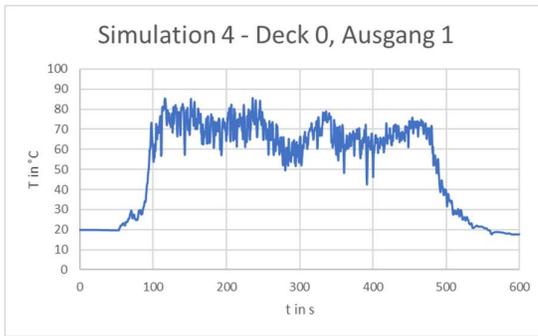


c Abstände und Raster der Rauchmelder



## C Temperaturverläufe an den Ausgängen





## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, Frederik Buhk, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle sinngemäß und wörtlich übernommenen Textstellen aus fremden Quellen wurden kenntlich gemacht.

Grabau, den .....

.....  
(Frederik Buhk)