

hhpberlin  
**Blaue Hefte**

**Studienarbeit Probabilistische  
Vorwärtsberechnung  
bauordnungsrechtlichkonformer  
Nutzungen zur Bewertung der  
Personensicherheit im Brandfall**

Philipp Lenz



Ingenieure für Brandschutz



Technische  
Universität  
Braunschweig

## Studienarbeit

# Probabilistische Vorwärtsberechnung bauordnungsrechtlich konformer Nutzungen zur Bewertung der Personensicherheit im Brandfall

Philipp Lenz, B.Sc.  
Matrikelnummer XXXXXXXXXX

Vorgelegt bei: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Zehfuß  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Betreuer: Lisa Sander, M.Sc. (TU Braunschweig)  
Dr.-Ing. Christoph Klinzmann (hhpberlin)

Erstellt bei: hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, Hamburg

Oktober 2019





Aufgabenstellung für die

## Studienarbeit

von Philipp Lenz (Matr.-Nr. [REDACTED])

zum Thema

### **Probabilistische Vorwärtsberechnung bauordnungsrechtlich konformer Nutzungen zur Bewertung der Personensicherheit im Brandfall**

Neben der Erfüllung der präskriptiven bauordnungsrechtlichen Anforderungen zur Einhaltung der Schutzziele nach den §§ 3 und 14 der Musterbauordnung [1] werden vermehrt leistungsorientierte Ansätze auf Basis von Ingenieurmethoden herangezogen, um die Einhaltung der Schutzziele nachzuweisen. Derzeit existiert in Analogie zum Sicherheitskonzept für die Bemessung von Bauteilen im Brandfall allerdings noch kein Sicherheitskonzept zur Bewertung der Personensicherheit im Brandfall. Erste umfangreiche probabilistische Untersuchungen von Albrecht [2], [3] zeigen, dass Parameter und Komponenten sowie deren Sensitivitäten des Sicherheitskonzeptes von Bauteilen auch nicht auf die Schutzziele der Eigen- und Fremddrettung von Personen übertragen werden können. Ferner enthalten die aktuellen Vorschriften, Normen und Richtlinien im Hinblick auf die Personensicherheit nur implizit einen Sicherheitszuschlag, der nicht quantifizierbar ist. Die präskriptiven Vorgaben werden entsprechend angewendet, ohne das Wissen welches Sicherheitsniveau dadurch erzielt wird.

Zur Quantifizierung des akzeptierten Sicherheitsniveaus sollen in einem ersten Schritt auf Grundlage der einschlägigen Sonderbauvorschriften repräsentative Nutzungen identifiziert und Beispielgeometrien entwickelt werden. Ziel ist es, minimale aber repräsentative Gebäudekubaturen herzuleiten, anhand derer die Schutzziele der Personensicherheit mit vereinfachten Berechnungsverfahren nachgewiesen werden können. Exemplarisch sollen in diesem Zuge für Versammlungsstätten und Verkaufsstätten vereinfachte Grundrisse erstellt werden, die als Standardsonderbauten angesehen werden können.

Anschließend können diese mit realen Sonderbauten, die ebenfalls die Anforderungen der Richtlinien und Verordnungen erfüllen, verglichen werden.

Im nächsten Schritt sollen für die Beispiel-Geometrien geeignete Brandszenarien und Personenbelegungen hergeleitet werden, die für die Bewertung der Personensicherheit im Brandfall relevant sein werden. Ferner soll untersucht werden, welche vereinfachten Ingenieurmethoden zur Berechnung der ausgewählten Brandszenarien und dem Nachweis der Leistungskriterien in den Beispiel-Geometrien angewendet werden können.

Unter der Berücksichtigung des fluchtbehindernden Leistungskriteriums „Höhe der raucharmen Schicht“ soll für die bauordnungsrechtlich konformen Grundrisse das gewählte Brandszenario die Dauer der Gewährleistung der raucharmen Schicht berechnet und der Zeit für die Entfluchtung des maßgeblichen Bereichs gegenüber gestellt werden. Abschließend kann ggf. eine probabilistische Berechnung auf Grundlage des Programms optiSlang und den identifizierten vereinfachten Modellen erfolgen.

Ziel ist es, dass mit Hilfe der Ergebnisse erste Erkenntnisse über die sichere Entfluchtung im Brandfall in baurechtlich konformen Sonderbauten Gebäuden erlangt werden.

### **Im Rahmen der Studienarbeit sollen folgende Aufgaben bearbeitet werden:**

1. Datenanalyse zu relevanten Einflussparametern hinsichtlich der Personensicherheit im Brandfall unter Berücksichtigung des Nachweises  $t_{\text{verfügbar}} > t_{\text{Räumung}}$  und Zusammenstellung der stochastischen Kennwerte (Mittelwert, Standardabweichung, Verteilungsfunktion).
2. Festlegung geeigneter repräsentativer Nutzungen und Gebäude, die die Anforderungen an die jeweiligen Bauordnungen und Richtlinien erfüllen (bauordnungsrechtlich konforme Lösungen).
3. Auswahl geeigneter Brand- und Entfluchtungsszenarien für die Bewertung der Personensicherheit und Recherche vereinfachter Modelle zur Berechnung. Exemplarisch soll die Anwendung vereinfachter Modelle unter der Berücksichtigung fluchtbehindernder Leistungskriterien (z.B. Höhe der raucharmen Schicht) für die ausgewählte Nutzung/Gebäude sowie die Berechnung von der Entfluchtungsdauer erfolgen.
4. Ggf. Durchführung einheitlicher probabilistischer Berechnungen mit z.B: optiSlang der ausgewählten Nutzungen/Gebäude unter Berücksichtigung gewählten fluchtbehindernder Leistungskriterien.
5. Darstellung und Erläuterung der Ergebnisse. Erworbene Erkenntnisse sind kritisch zu hinterfragen ebenso wie die Stärken und Schwächen der getroffenen Ansätze und der verwendeten Programme und Modelle.

### **Sonstiges**

Alle Ergebnisse sind nachvollziehbar zu dokumentieren. Während der Bearbeitung ist Kontakt mit den Betreuern zu halten, um z. B. den Bearbeitungsumfang abzusprechen. Die Arbeitsergebnisse sind in schriftlicher und digitaler Form einzureichen. Der Text der Arbeit und sämtliche digitalen Arbeitsmittel (z. B. verwendete Gesetzestexte, digitale (open access) Literatur, Zeichnungen, Berechnungen etc.) sind auf einem Datenträger beizufügen.

Sämtliche vom Fachgebiet Brandschutz bereitgestellten Unterlagen, die zur Bearbeitung dieser Arbeit ausgegeben werden, dürfen nur mit Zustimmung des Fachgebietes Brandschutz





# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Nomenklatur	VI
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Zuverlässigkeitsuntersuchungen zur Personensicherheit</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen der Personenstromanalyse . . . . .	3
2.2 Leistungsnachweiskriterium der Personensicherheit . . . . .	6
2.3 Probabilistisches Konzept in Bezug auf die Räumung . . . . .	7
2.4 Kapazitätsanalyse . . . . .	9
<b>3 Entwicklung von Beispielgeometrien</b>	<b>11</b>
3.1 Beispielgeometrie auf Grundlage der Muster-Versammlungsstättenverordnung . . . . .	11
3.2 Beispielgeometrie auf Grundlage der Muster-Verkaufsstättenverordnung . . . . .	15
3.3 Vergleich mit einem Kongresszentrum in Frankfurt am Main . . . . .	17
<b>4 Brand- und Entfluchtungssimulation</b>	<b>19</b>
4.1 Bemessungsbrandszenario . . . . .	19
4.1.1 Bemessungsbrand Versammlungsstätte . . . . .	19
4.1.2 Bemessungsbrand Verkaufsstätte . . . . .	20
4.2 Brandszenario . . . . .	21
4.3 Brandsimulation . . . . .	21
4.3.1 Brandmodellierung . . . . .	23
4.4 Entfluchtungsszenario . . . . .	25
4.4.1 Gehgeschwindigkeit . . . . .	25
4.4.2 Personendichte . . . . .	26
4.4.3 Spezifischer Personenstrom . . . . .	27
4.4.4 Alarmzeit . . . . .	27
4.4.5 Reaktionszeit (Premovementzeit) . . . . .	27
4.4.6 Detektionszeit . . . . .	28
4.4.7 Angewendete stochastische Modelle . . . . .	28
4.5 Die Modelle und ihre Einschränkungen . . . . .	29
<b>5 Zuverlässigkeitsanalyse und Ergebnisse</b>	<b>31</b>
5.1 Interaktion der Programme . . . . .	31
5.2 Ergebnisse zur Versammlungsstätte . . . . .	32
5.3 Ergebnisse zur Verkaufsstätte . . . . .	34
5.4 Ergebnisauswertung und -diskussion . . . . .	35
5.5 Ausblick . . . . .	37
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>39</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>A Code für Zuverlässigkeitsanalyse</b>	<b>44</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Phasen der Räumung in chronologischer Abfolge [Alb12]	5
3.1	Darstellung der Versamlungsstätte in Draufsicht	13
3.2	Darstellung der Versamlungsstätte in Seitenansicht	13
3.3	Darstellung der Versamlungsstätte in Cfast	14
3.4	Darstellung der Verkaufsstätte in Draufsicht	16
3.5	Darstellung der Verkaufsstätte in Seitenansicht	16
3.6	Darstellung der Verkaufsstätte in Cfast	17
4.1	Gegenüberstellung von Rechenaufwand und Genauigkeit [Alb12, S.32]	22
4.2	Zonenmodell	23
4.3	$t^2$ -Modell	23
4.4	Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei der Versamlungsstätte	24
4.5	Brandentwicklung bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate [Hos13]	25
5.1	Interaktion der Programme	32
5.2	Sensitivitäten im Bezug auf RSET in der Versamlungsstätte	33
5.3	Sensitivitäten im Bezug auf ASET in der Versamlungsstätte	33
5.4	Sensitivitäten im Bezug auf RSET in der Verkaufsstätte	34
5.5	Sensitivitäten im Bezug auf ASET in der Verkaufsstätte	35

# Tabellenverzeichnis

4.1	Grundlegende Eigenschaften von Zonen- und Feldmodellen (vgl. [Hos13, S.90]) . . . . .	22
4.2	Standardwerte für $\alpha$ und $t_g$ [Hos13] . . . . .	25
4.3	Stochastisches Modell für die Untersuchung der Versammlungsstätte . . . . .	29
4.4	Stochastisches Modell für die Untersuchung der Verkaufsstätte . . . . .	29



# Nomenklatur

## Lateinische Bezeichnungen

$A$	Fläche [ $m^2$ ]
$A_g$	geometrische Öffnungsfläche [ $m^2$ ]
$B$	Breite des Rettungsweges [m]
$F_s$	spezifischer Personenstrom [ $\frac{P}{m*s}$ ]
$L_{Max}$	maximale Weglänge [m]
$L_{Min}$	minimale Weglänge [m]
$N$	Personenanzahl [-]
$p_f$	Versagenswahrscheinlichkeit, probability of failure [ $\frac{1}{a}$ ]
$p_s$	Wahrscheinlichkeit einer sicheren Entfluchtung, probability of success [ $\frac{1}{a}$ ]
$Q$	Wärmefreisetzungsrate [kW]
$RW$	Rettungsweglänge [m]
$t_d$	Detektionszeit [s]
$t_g$	Brandentwicklungszeit [s]
$t_r$	Reaktionszeit [s]
$t$	Branddauer ohne Berücksichtigung der Schwelbrandphase [s]
$v$	Gehgeschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]
$V$	Variationskoeffizient [-]

## Griechische Bezeichnungen

$\alpha$	Brandentwicklungsfaktor [ $\frac{kW}{s^2}$ ]
$\alpha$	Sensitivitätsfaktor [-]
$\beta$	Sicherheitsindex
$\kappa$	Sicherheitsfaktor
$\mu$	Mittelwert
$\sigma$	Standardabweichung

## Indizes

<i>erf.</i>	erforderlich
<i>Max</i>	maximal
<i>Min</i>	minimal
<i>Vk</i>	Verkaufsstätte
<i>vorh.</i>	vorhanden
<i>VStätt</i>	Versammlungstätte
<i>zul.</i>	zulässig
<i>Zu</i>	Zuluft

## Abkürzungen

<i>ARSM</i>	Adaptive Response Surface Method, Antwortflächenverfahren
<i>ASET</i>	available safe egress time, verfügbare Entfluchtungszeit
<i>BMA</i>	Brandmeldeanlage
<i>Cfast</i>	Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport
<i>CFD</i>	Computer Fluid Dynamics, Feldmodelle
<i>DIN</i>	Deutsches Institut für Normung
<i>EN</i>	Europäische Normung
<i>HBO</i>	Hessische Bauordnung
<i>MBO</i>	Muster-Bauordnung
<i>MVStättVO</i>	Muster-Versammlungsstättenverordnung
<i>MVkVO</i>	Muster-Verkaufsstättenverordnung
<i>NFPA</i>	National Fire Protection Association
<i>NIST</i>	National Institute of Standards and Technology
<i>NRA</i>	Natürliche Rauchabzugsanlage
<i>RiMEA</i>	Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen
<i>RSET</i>	required safe egress time, benötigte Entfluchtungszeit
<i>RWA</i>	Rauch-Wärmeabzugsanlage
<i>SFPE</i>	Society of Fire Protection Engineers
<i>vfdb</i>	Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V.

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Sicherheit der Gebäudenutzer hat oberste Priorität im Brandschutzingenieurwesen. Ein wichtiger Aspekt hierbei bleibt die sichere Entfluchtung der Personen im Falle eines Brandes. Grundsätzlich müssen hierzu die Personen den betroffenen Abschnitt verlassen haben, bevor die schädlichen Auswirkungen des Brandes die Fliehenden verletzen können.

Zurzeit werden Gebäude hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit der Personensicherheit nur bezüglich der Einhaltung etwaiger Richtlinien und Bauordnungen betrachtet. Ist die Einhaltung gegeben, darf davon ausgegangen werden, dass das von der Gesellschaft akzeptierte Maß an Zuverlässigkeit bzw. Risiko erreicht wird. Weiterhin ist die Anwendung von Ingenieurmethoden zur Überprüfung der Einhaltung der Schutzziele möglich. Das Sicherheitsniveau bleibt dabei unbekannt und ist nicht quantifizierbar. Bei Bestandsbauten oder Gebäuden mit besonderer Nutzung kann es jedoch vorkommen, dass die Richtlinien und Bauordnungen nicht angewendet werden können bzw. die Vorgaben verletzt werden. In diesen Fällen sollte das Sicherheitsniveau quantifiziert werden.

In dieser Arbeit werden zwei fiktive Beispielgeometrien aus der Muster-Versammlungsstättenverordnung und der Muster-Verkaufsstättenverordnung hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Evakuierung untersucht. Hierzu werden Szenarien zum Brand sowie zur Evakuierung entwickelt und anschließend probabilistisch verglichen. Die ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten sollen dann eine Aussage über das vorhandene Sicherheitsniveau ermöglichen. Im folgenden Kapitel werden die notwendigen Grundlagen zur Personensicherheit und Personenstromanalyse erläutert. Außerdem wird das dazugehörige probabilistische Konzept vorgestellt und das Räumungsszenario mithilfe der Kapazitätsanalyse beschrieben. Das dritte Kapitel widmet sich der Bildung der Beispielgeometrien. Hierzu werden die entscheidenden Paragraphen aus den Sonderbauvorschriften benannt und angewendet. Abschließend wird in diesem Kapitel die fiktive Versammlungsstätte mit einer real existierenden Versammlungsstätte verglichen. Die hhpberlin GmbH hat zu diesem Gebäude einen Brandschutznachweis erstellt und dieses Material für diese Studienarbeit zur Verfügung

gestellt. Im vierten Kapitel werden typische Brandszenarien für das jeweilige Gebäude nutzungsspezifisch erarbeitet. Die Simulation des Brandes geschieht in dieser Arbeit mithilfe des Programms Cfast der Version 7.2.2. Zur Vervollständigung der stochastischen Modelle werden die Parameter zur Räumung festgelegt. Die eigentliche Zuverlässigkeitsanalyse wird in Kapitel 5 veranschaulicht. Die Berechnungen zur Zuverlässigkeitsanalyse werden mit dem Programm optiSLang 7.4.0 vorgenommen. Zur Interaktion der unterschiedlichen Programme wurde ein Skript mit MATLAB R2015b erstellt, welches die probabilistische Berechnung automatisiert. Abschließend werden die Ergebnisse in diesem Kapitel vorgestellt und diskutiert.

# Kapitel 2

## Zuverlässigkeitsuntersuchungen zur Personensicherheit

Zuverlässigkeitsbewertungen sind bei der Bauteilbemessung etabliert. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Bauteil nicht versagt, wird hierbei als Zuverlässigkeit bezeichnet. Da ein Versagen immer in Betracht gezogen werden muss bzw. nicht auszuschließen ist, werden in DIN EN 1990 (vgl. [Deu90]) Zuverlässigkeitsklassen vorgegeben. Dazu werden bauliche Anlagen in Schadensfolgeklassen CC und Zuverlässigkeitsklassen RC eingestuft und dabei akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_f$  pro Jahr genannt. Beispielsweise gilt bei Tribünen eine akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f = 10^{-7}$  (1/a). Ein solches Konzept ist in Bezug auf die Personensicherheit bisher nicht vorhanden.

Die Personensicherheit wird durch unterschiedliche bauliche, anlagentechnische und organisatorische Maßnahmen beeinflusst. Auszugsweise verringern Rauch-Wärmeabzugsanlagen (RWA) als anlagentechnische Maßnahme die Rauch- und Hitzeeinwirkung auf die Personen. Diesen Anlagen werden ebenfalls Zuverlässigkeiten und Versagenswahrscheinlichkeiten zugeordnet, welche in einer Systemanalyse mitbetrachtet werden müssen. Eine solche Systemanalyse wird in dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt. In diesem Kapitel sollen die unterschiedlichen Einflussfaktoren der Entfluchtung, die dazugehörigen Nachweiskriterien und das probabilistische Konzept vorgestellt werden. Abschließend wird das Verfahren zur Bestimmung der Räumungszeit beschrieben.

### 2.1 Grundlagen der Personenstromanalyse

Die Gewährleistung der Personensicherheit zählt zu den vorrangigen Zielen des Brandschutzes. Dabei stellen die vom Gesetzgeber akzeptierten und als sicher definierten Lösungen die präskriptiven Vorgaben in den jeweiligen Bau- und Sonderbauordnungen dar. Hier werden je nach Gebäudetyp und Rahmenbedingungen Anforderungen an die Rettungs-

weggestaltung oder an den anlagentechnischen Brandschutz gestellt. Eine weitere Variante ist der sogenannte leistungsorientierte Ansatz im Bereich der sicheren Entfluchtung. Bei diesem Personensicherheitsnachweis wird überprüft, ob die benötigte Zeit zur sicheren Selbstrettung der Personen „required safe egress time“ (RSET) die verfügbare Zeit zur sicheren Selbstrettung „available safe egress time“ (ASET) nicht übersteigt. Dies stellt jedoch nur einen qualitativen Nachweis dar, welcher durch einen Sicherheitsfaktor  $\kappa$  ergänzt werden kann. Die Gleichung lautet wie folgt:

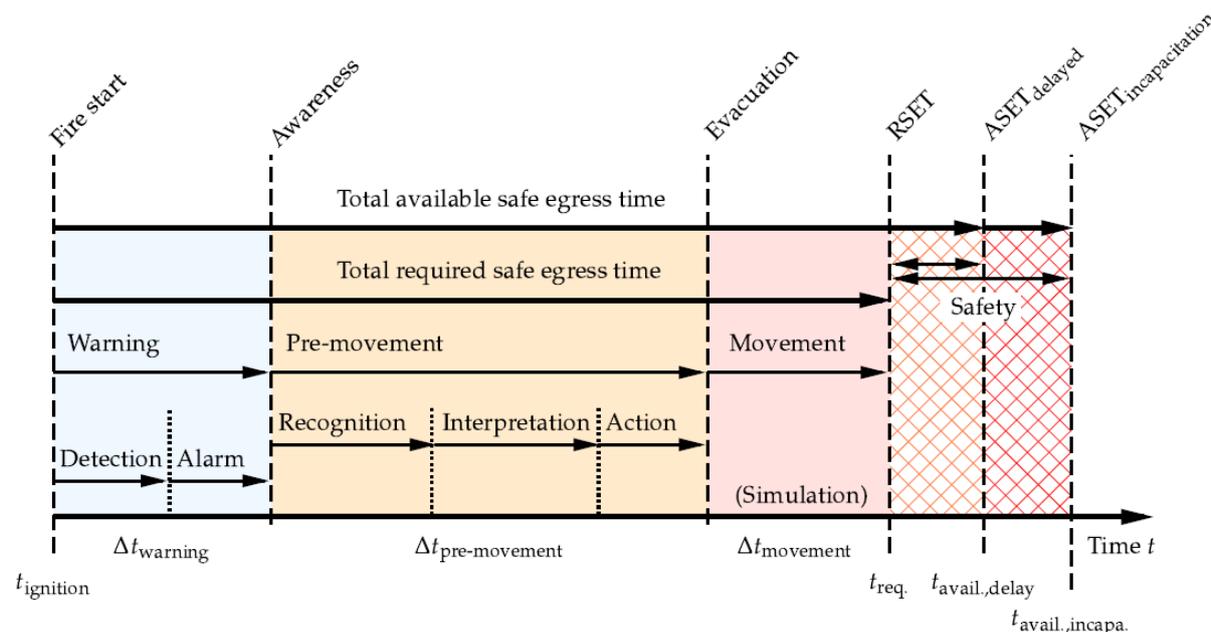
$$ASET \geq RSET * \kappa \quad (2.1)$$

mit $\kappa$ : Sicherheitsfaktor	[–]
ASET: available safe egress time	[s]
RSET: required safe egress time	[s]

Die Räumungszeit RSET setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen, wie folgend dargestellt (vgl. [Hos13], S. 270):

$$t_{evacuation} = t_{detection} + t_{alarm} + t_{premovement} + t_{movement} \quad (2.2)$$

Die Detektionszeit  $t_{detection}$  entspricht der Zeit von der Entstehung des Brandes bis zur Detektion, die Alarmzeit  $t_{alarm}$  ist die Zeitspanne von Detektion bis zur Alarmierung. Die Reaktionszeit  $t_{premovement}$  beschreibt die Zeitspanne von der Alarmierung bis zu ersten Fluchtbewegungen und die Fluchtzeit  $t_{movement}$  den Beginn von Fluchtbewegungen bis zum Erreichen des sicheren Bereiches. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 2.1 veranschaulicht.



**Abb. 2.1:** Phasen der Räumung in chronologischer Abfolge [Alb12]

Im Wesentlichen lassen sich die Einflüsse auf die Räumung durch drei maßgebliche Faktoren zusammenfassen: Gebäudegeometrie, Personen, Brandrauch und Feuer (vgl. [Zeh19]). Brandrauch und Feuer werden hierbei als gemeinsamer Faktor betrachtet. Diese Faktoren sind dementsprechend auch entscheidend für die probabilistischen Betrachtungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit.

### Gebäudegeometrie

Die Länge und Breite der Rettungswege, die Art der Nutzung und die Überschaubarkeit der Geometrie beeinflussen die Orientierung und Bewegungsfreiheit der Personen.

### Brandrauch und Feuer

Maßgeblich für die verfügbare Entfluchtungs- und Räumungszeit sind die während des Brandszenarios entstehenden Brandgase und das Feuer. Die unmittelbaren Auswirkungen von Brandrauch und Feuer lassen sich in drei wesentliche Aspekte aufteilen:

1. Lichttrübende Wirkung des Brandrauches: Einschränkende Wirkung von Erkennungsweiten, welche von vielfältigen Parametern abhängig sind. Hier zu nennen sind z.B. die Eigenschaften und Dichte der Rauchpartikel
2. Toxische Wirkung des Brandrauches: Handlungsunfähigkeit oder auch Tod der Personen durch Sauerstoffmangel aufgrund einer Kohlenstoffmonooxidvergiftung
3. Thermische Wirkung von Brandrauch und Feuer: Handlungsunfähigkeit durch thermischen Schock wie z.B. Hitzeschock oder Verbrennungen

### Personen

Der Faktor Mensch stellt einen großen Unsicherheitsfaktor hinsichtlich der Erreichung

des Schutzzieles dar. Seine Reaktion auf ein Brandereignis hängt von unterschiedlichen physischen, wie z.B. die Mobilität betreffend, und auch psychischen Aspekten, wie z.B. Bewusstseinsveränderung durch den Konsum von Alkohol, ab. Außerdem sind das Verständnis für Gruppenbildung, Panikverhalten und andere menschliche Verhaltensmuster wesentlich für eine Personenstromanalyse. Aus Untersuchungen von Brandereignissen ergaben sich bspw. folgende typische Verhaltensmuster (vgl. [Hof14]):

- Es wird zur Flucht der gleiche Weg genommen, der zuvor zum Erreichen des Aufenthaltsortes benutzt wurde
- Hinweisschilder werden häufig nicht beachtet
- Alarmierungen werden bei häufiger Wiederholung kaum mehr Bedeutung beigemessen
- Eine gerade stattfindende Handlung konkurriert mit der Reaktion auf einen Feueralarm

Es wird deutlich, dass die Entwicklung eines probabilistischen Konzepts auf vielen unterschiedlichen Annahmen basiert. Diese werden in den kommenden Kapiteln getroffen und begründet.

## 2.2 Leistungsnachweiskriterium der Personensicherheit

Die Nachweiskriterien bestimmen die Grenzparameter für eine sichere Räumung. Eine sichere Entfluchtung ist ab dem Zeitpunkt nicht mehr möglich, wenn ein Grenzparameter überschritten wurde. Die Zeitdauer bis zum Erreichen des Grenzparameters stellt dann die sichere bzw. verfügbare Räumungszeit ASET dar. Folgende Nachweiskriterien für die Personensicherheit sind vertreten:

1. Höhe der raucharmen Schicht
2. Ausprägung der raucharmen Schicht
  - Auswirkungen toxischer Gase anhand der FED-Methode (Fractional Effective Dose)
  - Optische Dichte pro Weglänge bzw. die Erkennungsweite
3. Thermische Wirkung von Rauchgasen

In dieser Arbeit wird das Kriterium der Höhe der raucharmen Schicht verwendet. Hierbei handelt es sich um ein konservatives Kriterium, welches ab dem Zeitpunkt anschlägt, an dem eine bestimmte Höhe der raucharmen Schicht unterschritten wird. Üblich sind Schichthöhen von 2,5 m bis 3,5 m (vgl. [Hos13], S.247). Es bleibt also die Betrachtung

individueller Beeinträchtigungen der Personen durch Brandrauch, wie in den anderen Kriterien abgebildet, aus und nur die konkrete Ausdehnung der Rauchgase wird untersucht. Zonenmodelle eignen sich besonders für die Darstellung von raucharmen Schichten. Für die Simulation des Zonenmodells wurde das Programm Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Cfast) verwendet. Für die Bestimmung von ASET wurde in dieser Arbeit eine raucharme Schichthöhe von 2,5 m gewählt. Gemäß DIN 18232-2 (vgl. [Deu07]) ist dies die angestrebte Mindesthöhe für eine raucharme Schicht. Diese Schichthöhe wird auch in der brandschutztechnischen Detailstellungnahme von hhpberlin GmbH für den Brandschutznachweis der real existierenden Versammlungsstätte in Frankfurt, welches in Kapitel 3 vorgestellt wird, verwendet.

## 2.3 Probabilistisches Konzept in Bezug auf die Räumung

Die Räumung unterscheidet sich von der Evakuierung insofern, dass bei der Evakuierung die organisierte Verlegung aus einem gefährdeten Gebiet gemeint ist, während die Räumung das angeordnete Verlassen bezeichnet und somit dieser Begriff für diese Arbeit maßgeblich sein soll. (vgl. [Zeh19]) Wie bereits erwähnt, ist die Personensicherheit im Gebäude sichergestellt, wenn die verfügbare Räumungszeit größer als die benötigte Räumungszeit ist. Dieser Zusammenhang wird in folgender Gleichung veranschaulicht:

$$ASET - RSET \geq 0 \tag{2.3}$$

Dies ist ähnlich zum Sicherheitskonzept bei der Bauteilbemessung, wobei ASET dem Widerstand R und RSET der Einwirkung S entsprechen würde. Daraus und aus Gleichung 2.3 resultierend ausgedrückt erhalten wir die Wahrscheinlichkeit einer sicheren Entfluchtung  $p_s$  folgendermaßen:

$$P[ASET - RSET \geq 0] = p_s \tag{2.4}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  ermittelt sich folgendermaßen:

$$P[ASET - RSET \leq 0] = p_f \tag{2.5}$$

Wobei folgender Zusammenhang gilt:

$$1 - p_s = p_f$$

Die Grenzzustandsfunktion zur Personensicherheit lautet in diesem Fall:

$$Z = ASET - RSET \quad (2.6)$$

$Z$  ist eine weitere Zufallsvariable, welche den Sicherheitsabstand zwischen ASET und RSET abbildet. Für den Mittelwert  $\mu$ , der Standardabweichung  $\sigma$  und dem Variationskoeffizienten  $V$  gelten dementsprechend folgende Gleichungen:

$$\mu_z = \mu_{ASET} - \mu_{RSET} \quad (2.7)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{ASET}^2 + \sigma_{RSET}^2} \quad (2.8)$$

$$V_z = \frac{\sigma_z}{\mu_z} \quad (2.9)$$

Der Sicherheitsindex  $\beta$  findet sich ebenfalls in DIN EN 1990 als Vorgabe für die Tragwerksplanung. Die Formel für unseren Fall lautet folgendermaßen:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_{ASET} - \mu_{RSET}}{\sqrt{\sigma_{ASET}^2 + \sigma_{RSET}^2}} \quad (2.10)$$

Mit den dargestellten Gleichungen lässt sich anschließend eine Verteilungsfunktion ausgeben, anhand dessen eine probabilistische Einschätzung vorgenommen werden kann. ASET und RSET bestehen jeweils aus unterschiedlichen stochastischen Parametern bzw. Basisvariablen. Die verfügbare Räumungszeit ASET wird anhand einer Brandsimulation bestimmt, wobei die streuenden Größen bspw. die Wärmefreisetzungsrates oder die Brandentwicklungsgeschwindigkeit darstellen. Im Falle der notwendigen Räumungszeit stellt die Gehgeschwindigkeit der Personen eine Basisvariable dar. Die Variablen werden aus Statistiken gebildet und mit Verteilungsfunktionen angegeben. Um den Anteil der Beispielvariable RSET am Gesamtversagen zu bestimmen, existieren sogenannte Sensitivitäts- bzw. Wichtungsfaktoren  $\alpha$ . Diese berechnen sich für die herangezogenen Beispiele folgenderweise:

$$\alpha_{RSET} = \frac{\sigma_{RSET}}{\sqrt{\sigma_{ASET}^2 + \sigma_{RSET}^2}} \quad (2.11)$$

## 2.4 Kapazitätsanalyse

Es sind unterschiedliche Methoden zur Ermittlung von Räumungszeiten etabliert, welche im Folgenden kurz vorgestellt werden. Zu den vereinfachten Verfahren zählen die deskriptiven Bemessungsverfahren, wie schon im Kapitel 2.1 erwähnt. Aufgrund der Gebäudekomplexität oder einer hohen Anzahl von Personen kann es notwendig sein, den schon erwähnten leistungsorientierten Ansatz zu wählen und eine ingenieurmäßige Berechnung der Räumungszeit vorzunehmen. Hierfür sind unterschiedliche Personenstrommodelle vorhanden. Diese reichen von einfachen Handrechenverfahren bis zu komplexen rechnergestützten Simulationsmodellen. Gemäß vfdb-Leitfaden (vgl. [Hos13], S. 274) werden diese in zwei Hauptgruppen unterteilt:

1. hydraulische Modelle (Strömungsmodelle), inklusive Netzwerkmodelle
2. Individualmodelle (mikroskopische Modelle)

Die hydraulischen Modelle können weiterführend unterteilt werden in vereinfachte Handrechenverfahren, wie die Kapazitätsanalyse, oder in Verfahren, die auch dynamische Prozesse einer Menschenmenge berücksichtigen. Die erste Hauptgruppe hat gemäß SFPE (Society of Fire Protection Engineers) [NM02, S.3-367] folgende Grundannahmen gemeinsam:

- alle Personen beginnen gleichzeitig mit der Räumung
- es gibt keine Unterbrechungen in dem sich mit Beginn der Räumung ausbildenden Personenstrom (z.B. durch individuelle Handlungsentscheidungen)
- alle Personen sind ausreichend mobil, sodass sie mit der Gruppenbewegung mithalten können

Es handelt sich hierbei um optimistische Annahmen, die Unsicherheiten in der Planung erzeugen, welche dann gegebenenfalls mit Sicherheitszuschlägen, wie in Gleichung 2.1 verdeutlicht, berücksichtigt werden müssen. Die zweite Hauptgruppe der Individualmodelle berücksichtigt das unterschiedliche Verhalten von Einzelpersonen durch den mikroskopischen Ansatz. Für eine genauere Beschreibung der Individualmodelle sei auf die Fachliteratur verwiesen. In dieser Arbeit soll das Verfahren der Kapazitätsanalyse Anwendung finden. Begründung hierfür sind sowohl die Einfachheit der in Kapitel 3 gewählten Beispielgeometrien, wofür die Kapazitätsanalyse ausreichend ist, als auch die Einfachheit dieses Handrechenverfahrens, welches die Implementierung mittels der Programme optiSLang und MATLAB erleichtern soll. Des Weiteren wurde dieses Verfahren auch von hhpberlin GmbH im Brandschutznachweis für das Kongresszentrum in Frankfurt verwendet.

Der Ansatz der Kapazitätsanalyse basiert auf den Relationen der Kapazität eines Wegeelements (z.B. Notausgang) in Abhängigkeit von seiner Breite und eventuell weiteren

Parametern (z.B. Stufenabmessungen). Eingabegrößen sind die Weglänge  $L$ , die Fluchtwegbreite  $B$ , die Gehgeschwindigkeit  $v$  und der spezifische Personenstrom  $F_s$ . Der spezifische Personenstrom enthält die Anzahl der Personen, die ein Wegelement pro Zeit- und Breitereinheit passieren können. Für  $F_s$  gilt hierbei folgender Zusammenhang:

$$\text{spezifischer Personenstrom } F_s \left[ \frac{P}{m \cdot s} \right] = \text{Personendichte } \left[ \frac{P}{m^2} \right] * \text{Gehgeschwindigkeit } v \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (2.12)$$

$F_s$  ergibt sich also aus der Personendichte und der Gehgeschwindigkeit  $v$ .

Die Fluchzeit  $t_{movement}$  ergibt sich aus dem größeren Wert der beiden Zeiten  $t_{weg}$  oder  $t_{passage}$ :

$$t_{Flucht} = \max \begin{cases} t_{passage} \\ t_{weg} \end{cases}$$

$t_{weg}$  stellt die Zeit für den zurückzulegenden Weg dar und  $t_{passage}$  die Zeit für das Passieren des Wegelements mit der geringsten Durchlasskapazität. Die beiden Zeiten berechnen sich folgendermaßen:

$$t_{weg} = \frac{L_{Max}}{v} \quad (2.13)$$

mit  $L_{Max}$  : maximale Weglänge [m]  
 $v$ : Gehgeschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]

$$t_{Passage} = \frac{L_{Min}}{v} * \frac{N}{F_s * B} \quad (2.14)$$

mit  $L_{Min}$  : minimale Weglänge [m]  
 $N$ : Personenanzahl [—]  
 $B$ : Breite des Rettungsweges [m]

$L_{Max}$  ist hierbei der längste Rettungsweg, während  $L_{Min}$  den kürzesten Weg bis zum Notausgang darstellt.  $N$  ist die Gesamtzahl der dieses Wegelement passierenden Personen und  $B$  die Breite des Wegelementes.

# Kapitel 3

## Entwicklung von Beispielgeometrien

In diesem Kapitel wird die Entwicklung von zwei Beispielgeometrien vorgestellt. Als Entwurfsgrundlage dienen jeweils die Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO)[Fac05] und die Muster-Verkaufsstättenverordnung (MVkVO)[Fac95]. Bei den entworfenen Geometrien handelt es sich um einfache und nicht komplexe Entwürfe, um mit diesen möglichst repräsentative Nutzungen zu verwenden. Darauf wird sich ein Vergleich mit einem realen Sonderbau anschließen.

### 3.1 Beispielgeometrie auf Grundlage der Muster-Versammlungsstättenverordnung

Dargestellt werden soll ein Foyer bzw. eine Eingangshalle. Die Versammlungsstätte soll nach §2 (3) Musterbauordnung (MBO)[Bau02] der Gebäudeklasse 3 entsprechen. Der Anwendungsbereich der MVStättVO gibt eine Mindestbesucherzahl von 200 Besuchern vor. Zur genauen Ermittlung der Besucherzahl wird auf das Kapitel 4 verwiesen. Zur weiteren Bemessung der Rettungswegbreiten wird eine Personendichte von  $2 \text{ Pers./m}^2$  angenommen, wie für sonstige Stehplätze. Die Versammlungsstätte wird erdgeschossig angenommen. Versammlungsstätten benötigen ebenfalls nach §6 (2) in jedem Geschoss mit Aufenthaltsräumen zwei unabhängige Rettungswege. Weiterhin werden für ein Geschoss mit 800 Besuchern nach §6 (4) zwei eigens zugeordnete Rettungswege erforderlich. §6 (5) schreibt außerdem vor, dass für Aufenthaltsräume mit Flächen über  $100 \text{ m}^2$  oder mit mehr als 100 Besuchern die beiden Rettungswege möglichst weit auseinander liegen und entgegengesetzt sein sollten. Die zu ermittelnde Breite ist auf die Ausgänge gleichmäßig aufzuteilen.

Die maximale Rettungsweglänge liegt bei 30 m nach §7 (1). Die Verordnung eröffnet die Möglichkeit einer Verlängerung des Rettungsweges ab einer lichten Höhe von 5 m für alle 2,5 m, um 5 m Rettungsweglänge zusätzlich zu bemessen. Dabei darf eine Entfernung

von 60 m jedoch nicht überschritten werden. Die Musterbauordnung schreibt nach §47 eine Mindesthöhe für Aufenthaltsräume von 2,4 m vor. In dieser Beispielgeometrie wird eine lichte Höhe von 3,8 m, in Anlehnung an die Arbeiten von Albrecht und Hosser [AH09], gewählt, sodass ein maximaler Rettungsweg von 30 m gilt. §7 (4) 2. gibt vor, dass für alle 200 Personen je 1,2 m Breite des Rettungsweges vorhanden sein muss. Die lichte Mindestbreite eines Rettungsweges muss 1,2 m betragen. Die Entfernung wird in Lauflinie bestimmt (§7(6)). Für die Versammlungsstätte wurden Seitenlängen von 40 m gewählt. Die Fläche ergibt sich dann folgendermaßen:

$$A_{VStätt} = 40 \text{ m} * 40 \text{ m} = 1600 \text{ m}^2$$

mit  $A_{VStätt}$  : Fläche der Versammlungsstätte [m<sup>2</sup>]

Demnach befinden sich wie oben schon erläutert nach folgender Berechnung 3200 Personen in der Beispielgeometrie:

$$Besucheranzahl = 1600 \text{ m}^2 * \frac{2 \text{ Pers.}}{\text{m}^2} = 3200 \text{ Pers.}$$

Diese Zahl gilt jedoch ausschließlich für die Bemessung der erforderlichen Rettungswegbreiten und wird bei der Ermittlung des stochastischen Modells angepasst. Somit ergibt sich eine Gesamtbreite der Rettungswege zu:

$$B_{erf.} = 3200 \text{ Pers.} * \frac{1,2 \text{ m}}{200 \text{ Pers.}} = 19,2 \text{ m}$$

mit  $B_{erf.}$  : erforderliche Breite des Rettungsweges [m]

Mit zwei Rettungswegen erhalten wir 9,6 m Breite pro Rettungsweg. Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2 veranschaulichen die Beispielgeometrie für die weiteren Betrachtungen.

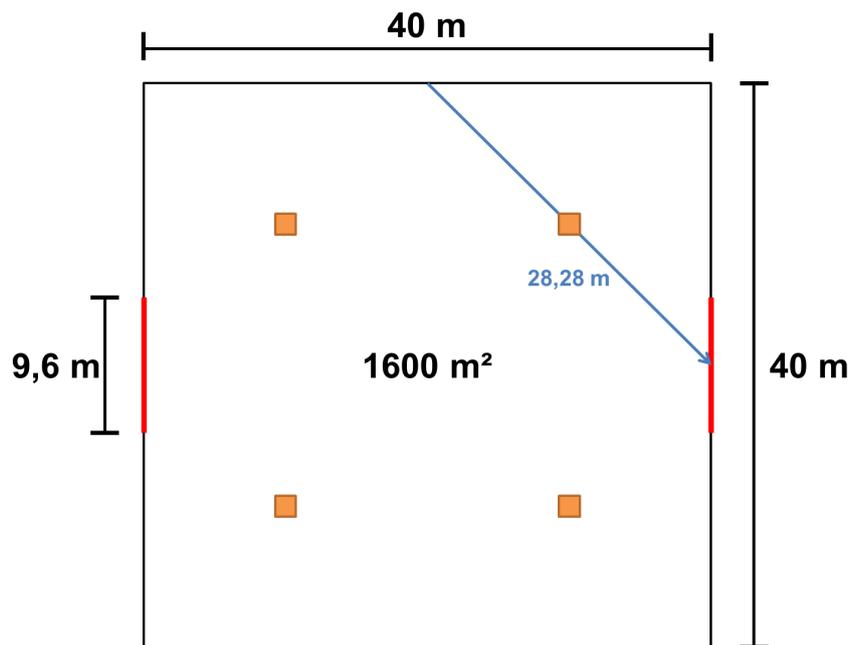


Abb. 3.1: Darstellung der Versammlungsstätte in Draufsicht



Abb. 3.2: Darstellung der Versammlungsstätte in Seitenansicht

Die Bestimmung der maximalen Rettungsweglänge erfolgte rechnerisch:

$$RW_{vorh.} = \sqrt{2 * 20^2} = 28,28 \text{ m} < 30 \text{ m} = RW_{zul.}$$

mit  $RW_{vorh.}$  : vorhandene Rettungsweglänge [m]

$RW_{zul.}$  : zulässige Rettungsweglänge [m]

Die MVStättVO bestimmt mit dem § 16 auch Vorgaben zur Rauchableitung. Demnach müssen Versammlungsräume wie bei Versammlungsstätten mit mehr als  $50 \text{ m}^2$  eine Rauchabführung zur Unterstützung der Brandbekämpfung vorweisen. Auch wenn die Rauchableitung als Schutzziel die Brandbekämpfung und nicht die sichere Entfluchtung von Personen hat, hat diese maßgeblichen Einfluss auf die Verrauchung der Beispielgeometrie, wie auch in Albrecht und Hosser [AH09] deutlich wird, und wird deshalb berücksichtigt. §16 (2) 3. schreibt vor, dass für Versammlungsräume mit mehr als  $1000 \text{ m}^2$  für alle  $400 \text{ m}^2$  Grundfläche mindestens eine Rauchabzugsanlage mit mindestens  $1,5 \text{ m}^2$  aerodynamisch wirksamer Öffnungsfläche vorhanden sein muss. Die geometrischen Öffnungsflächen  $A_g$  der Rauchabzugsanlagen berechnen sich mit dem Ausströmfaktor 0,7

folgendermaßen:

$$A_g = \frac{A_w}{0,7} = \frac{1,5 \text{ m}^2}{0,7} = 2,142 \text{ m}^2$$

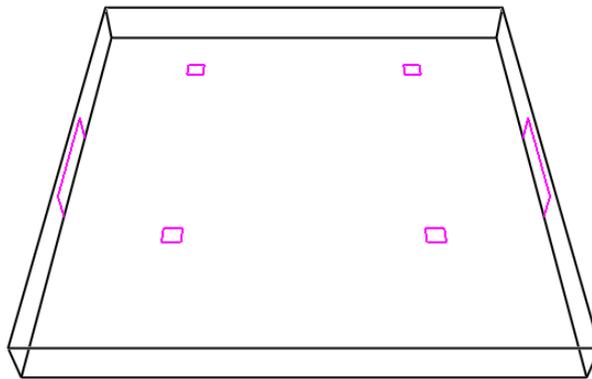
mit  $A_g$  : geometrische Öffnungsfläche [m<sup>2</sup>]

Bei einer Grundfläche von  $1600 \text{ m}^2$  werden somit vier Rauchabzugsanlagen benötigt. Die Rauchabzugsanlagen werden gleichmäßig im Dach, wie in Abbildung 3.1 orange abgebildet, angeordnet. Die vorgeschriebene Zuluftfläche von  $12 \text{ m}^2$  ist bei einer Ausgangshöhe von  $2,5 \text{ m}$  ebenfalls gegeben:

$$A_{Zu,vorh.} = 19,2 \text{ m} * 2,5 \text{ m} = 48 \text{ m}^2 > 12 \text{ m}^2 = A_{Zu,erf.}$$

mit  $A_{Zu,vorh.}$  : vorhandene Zuluftfläche [m<sup>2</sup>]

$A_{Zu,erf.}$  : erforderliche Zuluftfläche [m<sup>2</sup>]



**Abb. 3.3:** Darstellung der Versammlungsstätte in Cfast

Es wird angenommen, dass etwaige Toiletten, wie in §12 (1) gefordert, außerhalb dieses Versammlungsraumes vorhanden und für die Besucher zugänglich sind.

Ein weiterer Aspekt ist das Vorhandensein einer Brandmeldeanlage (BMA), welche gemäß §20 (1) für Versammlungsstätten mit einer Grundfläche größer  $1000 \text{ m}^2$  vorgeschrieben ist. Diese müssen aus automatischen und nichtautomatischen Brandmeldern bestehen und Alarmierungs- und Lautsprechereinrichtungen besitzen, um Besucher zu alarmieren und Anweisungen zu geben. Für diese Arbeit wird deshalb eine automatische BMA mit Alarmierungs- und Lautsprechereinrichtungen angenommen. Die BMA detektiert die Brandkenngröße Rauch.

## 3.2 Beispielgeometrie auf Grundlage der Muster-Verkaufsstättenverordnung

Als Maßgabe soll ein einzelner Verkaufsraum entwickelt werden, welcher einer Filiale einer weitverbreiteten Einzelhandelskette entsprechen soll. Das Gebäude entspricht ebenfalls der Gebäudeklasse 3 nach §2 (3) Musterbauordnung (MBO). Gemäß §1 gilt die Musterverkaufsstättenverordnung (MVkVO) nur für Verkaufsstätten, welche eine Gesamtfläche von mind. 2000  $m^2$  haben, sodass die Fläche der gewählten Beispielgeometrie diesen Wert nicht unterschreiten darf. Das Beispiel für diese Arbeit wird deshalb folgende Ausmaße haben:

$$A_{V_k} = 40 \text{ m} * 50 \text{ m} = 2000 \text{ m}^2$$

mit  $A_{V_k}$  : Fläche der Verkaufsstätte [ $m^2$ ]

Für die Beispielgeometrie wird ein erdgeschossiges Gebäude angenommen, dessen Fußboden vollständig auf Höhe der Geländeoberfläche liegt. Die lichte Höhe beträgt wie bei der Versammlungsstätte 3,8 m. Es wird weiterhin angenommen, dass keine Sprinkleranlage vorhanden ist, was die Modellierung in Cfast vereinfachen soll und nach §20 (1) 1. für erdgeschossige Verkaufsstätten zulässig ist. Nach §6 (1) 3. müssen bei erdgeschossigen Verkaufsstätten ohne Sprinkleranlage Brandabschnitte mit nicht mehr als 3000  $m^2$  gebildet werden. Dies entfällt, da die gewählte Fläche der Beispielgeometrie unter 3000  $m^2$  liegt.

Laut §10 (1) müssen für jeden Verkaufsraum, Aufenthaltsraum und Ladenstraße mindestens zwei unabhängige Rettungswege zu Ausgängen ins Freie oder zu Treppenträumen notwendiger Treppen in jedem Geschoss vorhanden sein. Nach §10 (2) darf im Verkaufsraum eine maximale Entfernung von 25 m zum nächsten Ausgang ins Freie oder Treppenraum notwendiger Treppen bestehen, welches dann den ersten Rettungsweg bildet. In der Beispielgeometrie werden keine Ladenstraßen oder notwendigen Flure modelliert, sodass etwaige Verlängerungen des ersten Rettungsweges auf 35 m Entfernung, wie in §10 (3) und (4) erläutert, entfallen. Es wird angenommen, dass die Verkaufsstätte durch Hauptgänge durchzogen ist, damit der nächste Hauptgang immer in 10 m Entfernung erreichbar ist, wie in §10 (5) vorgegeben. Die Breite der Hauptgänge beträgt nach §13 (4) 2 m. In Abbildung 3.4 ist die Anordnung der Hauptgänge (grün) veranschaulicht. Die Rettungsweglänge von 25 m darf in Luftlinie bemessen werden, während die Lauflinie 35 m nicht überschreiten darf.

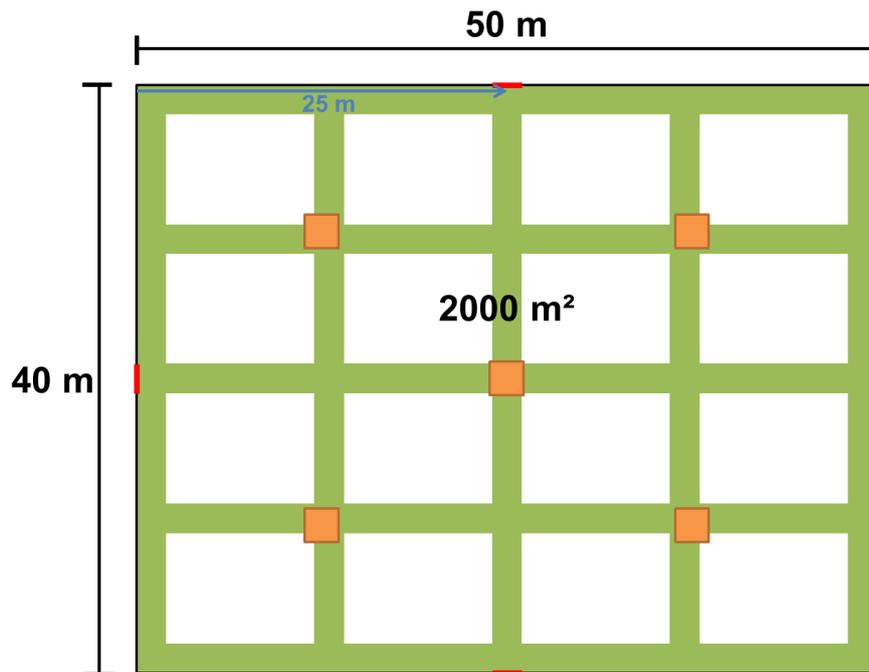


Abb. 3.4: Darstellung der Verkaufsstätte in Draufsicht

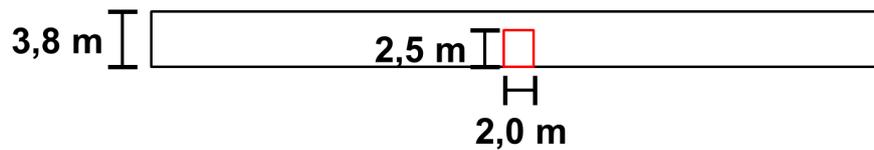


Abb. 3.5: Darstellung der Verkaufsstätte in Seitenansicht

§14 (2) schreibt vor, dass Ausgänge aus einem Verkaufsraum mit einer Fläche über  $500 \text{ m}^2$  mindestens  $2 \text{ m}$  breit sein müssen. In Ausgängen aus Geschossen müssen nach §14 (3) ebenfalls Mindestbreiten von  $2 \text{ m}$  eingehalten werden, sodass alle Ausgänge der Beispielgeometrie die Mindestbreite von  $2 \text{ m}$  haben. Für die Gesamtbreite aller Ausgänge muss gemäß §14 (3) für alle  $100 \text{ m}^2$  der Fläche  $30 \text{ cm}$  Ausgangsbreite vorliegen. Demnach ergibt sich folgendes Berechnungsergebnis:

$$B_{erf.} = \frac{30 \text{ cm}}{100 \text{ m}^2} * 2000 \text{ m}^2 = 600 \text{ cm} \hat{=} 6,0 \text{ m}$$

Gewählt wurden in der Beispielgeometrie vier Ausgänge, um die Rettungsweglängen einzuhalten. Somit erhalten wir folgende Gesamtbreite:

$$B_{vorh.} = 2,0 \text{ m} * 4 = 8,0 \text{ m} > 6,0 \text{ m} = B_{erf.}$$

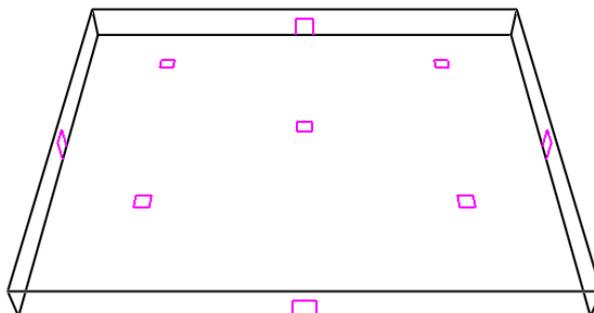
mit  $B_{vorh.}$  : vorhandene Breite des Rettungsweges [m]

Die Ausgangshöhe beträgt für alle Ausgänge 2,5 m. Die maximale Rettungsweglänge beträgt in der gewählten Geometrie 25 m wie in Abbildung 3.4 dargestellt. Der §16 (1) schreibt für Verkaufsstätten mit Verkaufsräumen und Aufenthaltsräumen mit mehr als 50  $m^2$  Grundfläche eine Rauchableitung vor. §16 (2) 3. schreibt vor, dass in Verkaufsräumen mit mehr als 1000  $m^2$  für alle 400  $m^2$  Grundfläche ebenfalls, wie bei MVStättVO, mindestens eine Rauchabzugsanlage mit mindestens 1,5  $m^2$  aerodynamisch wirksamer Öffnungsfläche vorhanden sein muss. Diese müssen im oberen Raumdrittel angeordnet sein. Abbildung 3.6 veranschaulicht die gleichmäßige Anordnung der Rauchabzugsanlagen. Die vorgeschriebene Zuluftfläche von 12  $m^2$  pro 1600  $m^2$  ist bei einer Ausgangshöhe von 2,5 m ebenfalls gegeben:

$$A_{Zu,vorh.} = 4 * 2 m * 2,5 m = 20 m^2 > 12 m^2 = A_{Zu,erf.}$$

mit  $A_{Zu,vorh.}$  : vorhandene Zuluftfläche [ $m^2$ ]

$A_{Zu,erf.}$  : erforderliche Zuluftfläche [ $m^2$ ]



**Abb. 3.6:** Darstellung der Verkaufsstätte in Cfast

Gemäß §20 müssen keine automatischen Brandmeldeanlagen angenommen werden, wenn geschultes Personal während der Betriebszeit ausreichend vorhanden ist. Zur Vergleichbarkeit der beiden Entfluchtungsszenarien von Versammlungsstätte und Verkaufsstätte wird die gleiche BMA vorausgesetzt wie in der vorigen Beispielgeometrie zur MVStättVO.

### 3.3 Vergleich mit einem Kongresszentrum in Frankfurt am Main

Dieser Abschnitt widmet sich dem Vergleich der gewählten Beispielgeometrie auf Basis der Muster-Versammlungsstättenverordnung mit einem real existierenden Gebäude, welches ebenfalls den Anforderungen der MVStättVO entspricht. Bei dem Gebäude handelt es sich um ein Kongresszentrum in Frankfurt am Main. Das Bauwerk ist teilunterkellert

und besitzt fünf oberirdische Geschosse. Für dieses Gebäude wurde von der „hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH“ unter anderem eine brandschutztechnische Detailstellungnahme angefertigt. Rechtliche Grundlagen dieser Prüfung waren unter anderem die Hessische Bauordnung (HBO) und die MVStättVO. Der Neubau soll als Versammlungsstätte genutzt werden mit bis zu 2.400 Personen gleichzeitig. Vorgesehen sind verschiedenste Nutzungen von Foyers bis hin zu Versammlungsräumen.

Das Kongresszentrum hat insgesamt vier Foyers mit dem Foyer Ost, West, Nord 1 und Nord 2. Für diesen Vergleich wird das Foyer Nord 1 im Erdgeschoss genauer betrachtet. Wie auch in den vorigen Kapiteln wurde für die Bemessung eine Personendichte von  $2 \text{ Pers./m}^2$  für sonstige Stehplätze angesetzt. Die Höhe des Foyers Nord 1 beträgt 4,03 m, wobei die lichte Raumhöhe betrachtet wird, um dies mit der Beispielgeometrie zu vergleichen. Die Annahme einer lichten Raumhöhe von 3,80 m ist also im Vergleich mit dem Realbeispiel ausreichend plausibel. Die Höhe der Türen in Nordrichtung betragen 2,60 m, in Ostrichtung 2,70 m und in den Treppenräumen 2,135 m. Somit liegt die gewählte Höhe mit 2,50 m im mittleren Bereich der drei Werte. Die Türbreiten in Nordrichtung liegen bei 2,0 m, in Ostrichtung bei 2,48 m und im Treppenhaus bei 1,01 m, was unsere Annahme mit 2,0 m Breite hinreichend begründet.

Ebenfalls vorhanden ist eine Alarmierungs- und Lautsprecheranlage, welche im Gefahrenfall alle Personen alarmieren kann. Der Räumungsalarm geschieht rein akustisch mit Sprachdurchsagen im öffentlichen Bereich. Außerdem ist es möglich, Durchsagen mit Hinweisen über die Lautsprecher abzugeben. Dies ist vergleichbar mit der Situation in den Beispielgeometrien und hat einen maßgeblichen Einfluss auf das Entfluchtungsszenario, welches im nachfolgenden Kapitel erläutert wird. Sämtliche Foyers des Gebäudes werden maschinell entraucht. Die Foyers der jeweiligen Geschosse sind durch ein Atrium miteinander verbunden. Das Atrium hingegen wird natürlich entraucht. Die Foyers werden durch Rauchschränken in kleinere Abschnitte mit maximal  $600 \text{ m}^2$  unterteilt, sodass eine Rauchausbreitung von einem Rauchabschnitt in den nächsten verhindert bzw. zeitlich verzögert wird. Hierdurch unterscheidet sich das Foyer aus der Beispielgeometrie, da keine Rauchschränken vorgesehen sind.

# Kapitel 4

## Brand- und Entfluchtungssimulation

### 4.1 Bemessungsbrandszenario

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Bemessungsbrandszenarios erläutert. Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass zwischen dem Bemessungsbrand und dem Brandszenario unterschieden werden muss. Der Bemessungsbrand beschreibt den Brandverlauf anhand von Brandparametern, welche auch als Quellterme bezeichnet werden und den zeitlichen Verlauf dieser Kenngrößen vorgeben. Das Brandszenario bestimmt die Abfolge der zeitlichen Ereignisse sowie die Anfangs- und Randbedingungen. Es muss erwähnt werden, dass sogenannte „worst case“-Szenarien, deren Randbedingungen sehr unwahrscheinlich sind, gemäß vfdb-Leitfaden [Hos13] überwiegend nicht berücksichtigt werden müssen. In dieser Arbeit soll ein „worst credible“-Szenario als Grundlage gebildet werden, welches die schlimmsten anzunehmenden und während der gesamten Lebensdauer des Objekts eintretenden Randbedingungen beschreibt.

#### 4.1.1 Bemessungsbrand Versammlungsstätte

Die untersuchte Versammlungsstätte stellt ein Foyer dar, welches einer Eingangshalle gleichen soll. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich im Foyer geringe Brandlasten befinden, da der Bereich überwiegend frei von Möbeln und anderen Gegenständen sein soll. Für diese Arbeit soll der Brand eines Empfangstresens bzw. einer Rezeption in der Mitte des Raumes simuliert werden. Der vfdb-Leitfaden [Hos13, S.75] gibt hierfür Angaben und Abschätzungen zur Ermittlung von Quelltermen für eine Eingangshalle an. Hierbei werden ein vorhandener Empfangstresen und wenig Möbelstücke mit geringer Polsterung angegeben. Die Brandentwicklungszeit  $t_g$  beträgt 450 s, welche die Zeitdauer bis zum Erreichen von 1 MW darstellt, und eine Wärmefreisetzungsrate von  $240 \frac{kW}{m^2}$ . Der vfdb-Leitfaden [Hos13] geht nochmal explizit auf die Brandentwicklungszeiten, abhängig von der Nutzungsart und den Stoffgruppen, ein. Für eine Hotelrezeption ergibt sich demnach

eine mittlere Brandentwicklungsgeschwindigkeit (vgl. S.54). Diese entspricht einer Brandentwicklungszeit von 300 s. Frey [Fre14, S.114/115] hat unterschiedliche experimentelle Brandkurven aufgelistet. Für einen Mehrfacharbeitsplatz, welcher mit einer Rezeption oder einem Empfangstresen vergleichbar ist, wurde eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 3035 kW mit einer Brandfläche von 15,8 m<sup>2</sup> ermittelt. Wird die Brandfläche auf die Wärmefreisetzungsrate des vfdb-Leitfadens übertragen und beide Werte multipliziert, ergibt sich eine maximale Wärmefreisetzung von 3792 kW. Albrecht [Alb13] verwendet für den Brand in einer Versammlungsstätte ein „Standard-Szenario“ mit einer maximalen Wärmefreisetzungsrate von 4000 kW und einer Standardabweichung von 800 kW, was einem Variationskoeffizienten von 20 % entspricht. Die Brandentwicklungszeit liegt bei Albrecht bei 250 s. Für das stochastische Modell in dieser Arbeit wird aufbauend auf den erläuterten Daten eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 3500 kW verwendet mit einer Standardabweichung von 700 kW, was ebenfalls dem Variationskoeffizienten von 20 % entspräche. In Anlehnung an die Brandentwicklungszeit von Albrecht und Hosser [AH11] wird eine Brandentwicklungszeit von 300 s, was der mittleren Brandentwicklungsgeschwindigkeit aus den vfdb-Vorgaben entspricht, gewählt und eine Standardabweichung von 50 s.

Durch unterschiedliche Studien, wie z.B. in Albrecht und Hosser [AH09] veranschaulicht, wird gezeigt, dass die Brandlast keinen bedeutenden Einfluss auf die probabilistische Betrachtung von Räumungsszenarien hat. Die Auswirkungen beschränken sich auf die Branddauer im  $t^2$ -Modell. In Räumungsszenarien ist demnach vor allem die Brandentwicklungsphase entscheidend und weniger die Vollbrandphase. Es wird deshalb auf die Aufstellung von stochastischen Parametern für die Brandlast verzichtet.

### 4.1.2 Bemessungsbrand Verkaufsstätte

Wie schon in Kapitel 3.2 erläutert, soll die betrachtete Verkaufsstätte eine Einkaufsfiliale darstellen. Der vfdb-Leitfaden sieht für einen Laden eine schnelle Brandentwicklungsgeschwindigkeit vor, was einer Brandentwicklungszeit von 150 s entspricht. Weiterhin finden sich im vfdb-Leitfaden Orientierungswerte für ein Einkaufszentrum. Demnach ist die Brandentwicklungszeit ebenfalls 150 s und die Wärmefreisetzungsrate liegt bei 250  $\frac{kW}{m^2}$  bzw. 380  $\frac{kW}{m^2}$ . In dieser Arbeit soll ein Brand einer Warenablage im Verkaufsraum simuliert werden. Hierfür wird auf die von NIST (National Institute of Standards and Technology) durchgeführten Kiosk-Versuche [Mit96] zurückgegriffen. Bei den Untersuchungen handelt es sich um 1,2 m x 1,2 m große und 2,1 m hohe hölzerne Stände für den Verkauf von T-Shirts, an denen die Brandleistungen ermittelt wurden (vgl. [Fre14, S.110]). Albrecht [Alb13] hat hierfür folgendes stochastisches Modell entwickelt. Eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 1645 kW mit einer Standardabweichung von 200 kW. Die Brandentwicklungszeit liegt bei 400 s mit einer Standardabweichung von 100 s. Obwohl

diese Werte die vfdb-Empfehlungen überschreiten, wird das stochastische Modell von Albrecht übernommen, da dieses besonders geeignet für einen typischen Bemessungsbrand in einer Einkaufsfiliale ist.

## 4.2 Brandszenario

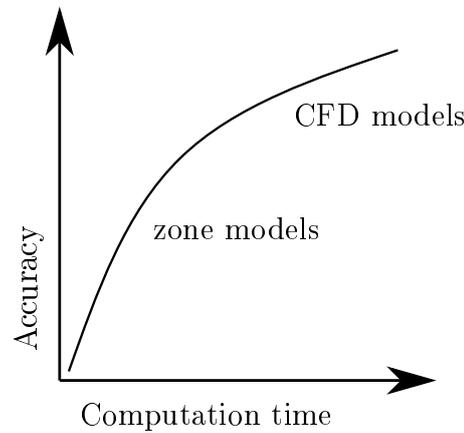
Die Bedingungen hinsichtlich der Raumgeometrie und der Personenanzahl wurden in Kapitel 3 für beide Nutzungen beschrieben. Die Ventilationsbedingungen sind für das Bemessungsbrandszenario relevant. Wie in den jeweiligen Sonderbauordnungen vorgegeben, sind Rauchabzugsanlagen vorgeschrieben, die während des Brandes geöffnet sind. Fenster wurden in Kapitel 3 nicht weiter erläutert, da sie lediglich als manuell öffnbar angenommen werden und dadurch als Ventilationsöffnung nicht angesetzt werden. Eine Zerstörung der Verglasung durch etwaige Temperatureinwirkung wird konservativ nicht angesetzt, da es keine direkte Brandeinwirkung auf die Fenster gibt, weil sich die Brände während der Räumungszeitdauer in der Mitte des Raumes befinden. Die beschriebenen Türöffnungen werden als Ventilationsöffnungen angesetzt. Die Begründung für diese Annahme ist, dass es sich bei den Türen ausschließlich um Fluchtmöglichkeiten handelt und diese während der Räumungszeitdauer geöffnet sein werden. Diese Annahme wird getroffen, weil in dieser Arbeit vertiefend auf die Entfluchtung eingegangen werden soll.

## 4.3 Brandsimulation

Dieser Abschnitt widmet sich dem Zonenmodell und dem Programm Cfast in der näheren Betrachtung. Die Zonenmodelle basieren auf der Bildung von zwei Schichten bzw. Zellen pro Abschnitt. Diese beiden Schichten sind eine kältere rauchgasarme bzw. rauchgasfreie Schicht und eine wärmere rauchgashaltige Schicht. Gemäß vfdb (vgl. [Hos13, S. 98]) befindet sich dieser Zustand überwiegend in der Pre-Flashover-Phase eines Brandes. Die hierbei verwendeten Gleichungen bestehen aus den Erhaltungssätzen der Masse sowie Energie und werden auf die jeweiligen Zonen angewendet. Für jede Schicht ist das Gas durch Masse, innere Energie, Temperatur, Dichte und das Volumen definiert. Die beiden Schichten sind durch eine horizontale Trennfläche getrennt. Durch diese Trennfläche findet kein Massenaustausch statt, abgesehen vom Plume-Massenstrom. Dabei besitzt jede Schicht eine einheitliche mittlere Temperatur. Weiterhin werden die Fluide innerhalb der Zonen als ruhend angenommen, abgesehen vom Plume, ceiling jet und den Ventilationsöffnungen. Der Druck ist eine Funktion der Höhe und Zeit.(vgl. [Hos13])

Die Trennung zwischen einer Rauchgasschicht und einer Luftschicht beim Zonenmodell sind ausreichend genau für die Betrachtung einer raucharmen Schichthöhe und wurde deshalb für diese Arbeit gewählt. Eine genauere Beobachtung von Rauchströmungen und Rauch- und Temperaturkonzentrationen entfallen bei dieser Betrachtung. Hierfür wären

sogenannte Feld- bzw. CFD-Modelle (Computational Fluid Dynamics - Modelle) notwendig, welche jedoch den Rechenaufwand enorm erhöhen würden, wie in Abbildung 4.1 verdeutlicht.



**Abb. 4.1:** Gegenüberstellung von Rechenaufwand und Genauigkeit [Alb12, S.32]

Eine ausführlichere Aufstellung der Eigenschaften der Modelle liefert der vfdb-Leitfaden in Tabelle 4.1. Cfast ist ein sogenanntes Mehrraum-Zonenmodell, welches sich optimal für

Eigenschaft	Zonenmodell	Feldmodelle
Geometrierfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Lüftungserfassung	angenähert	angenähert bis exakt
Wärmefreisetzung	angenähert	angenähert
Modellaufwand	gering	hoch
Aussagen	global bzw. Mittelwerte	lokal
Validierung	aufwendig	aufwendig
Rechenaufwand	gering bis mittel	hoch

**Tabelle 4.1:** Grundlegende Eigenschaften von Zonen- und Feldmodellen (vgl. [Hos13, S.90])

die Darstellung eines Zweizonenmodells eignet. Es ist also möglich, mehrere Räume bzw. Segmente durch Öffnungen zu verbinden, durch die eine Weiterleitung des Brandrauches geschehen kann. Wie in Abbildung 4.2 zu erkennen ist, bilden sich deutlich zwei Schichten aus. Im oberen Bereich befindet sich die wärmere Rauchschiicht und im unteren Bereich die kühlere Luftschicht. Der sich ausbildende Kegel stellt den Plume dar, durch den die erhitzenden Gase nach oben steigen. An der Decke verteilen sich die Gase dann und füllen den Raum. Diese Deckenströmungen werden auch „ceiling jet“ genannt. Die Trennlinie bzw. Schichtgrenze ist dabei die Linie, an der der relative Druck null ist. In der oberen Schicht herrscht ein Überdruck, welcher die Gase aus Öffnungen ausströmen lässt. In der unteren Schicht herrscht Unterdruck, sodass ein Einströmen von Luft in den Brandraum hervorgerufen wird, was in Abbildung 4.2 rechts an der Öffnung dargestellt ist.

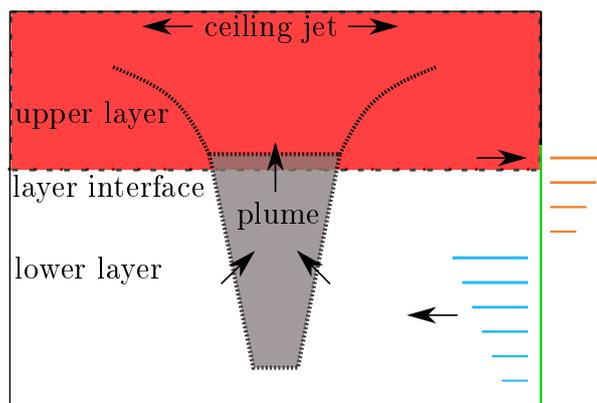
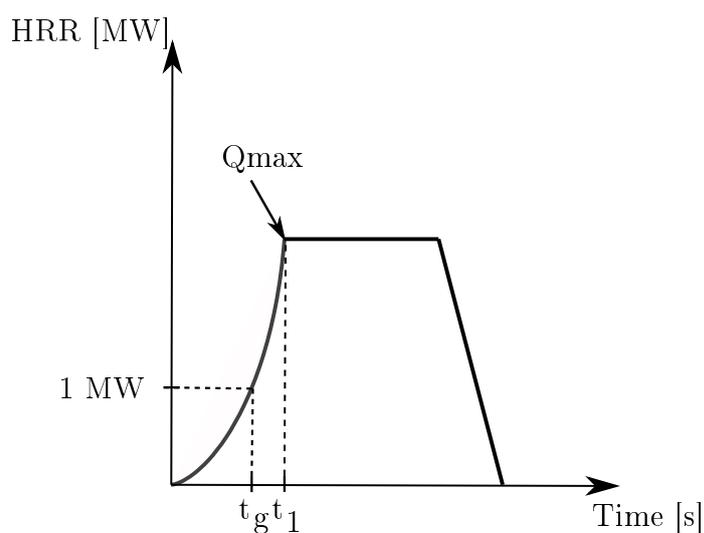


Abb. 4.2: Zonenmodell

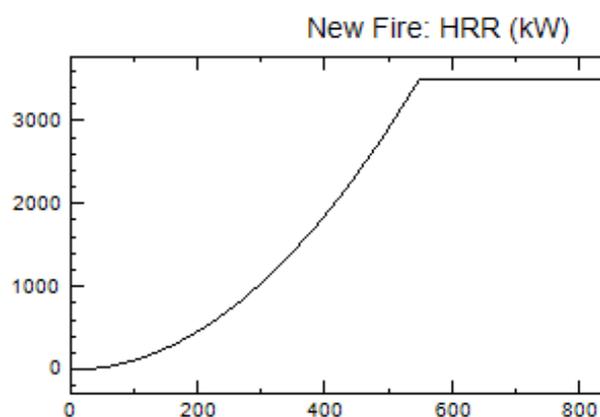
### 4.3.1 Brandmodellierung

In der Praxis gibt es unterschiedliche Bemessungsbrandmodelle, um den Brand in seiner zeitlichen Entwicklung mit seinen unterschiedlichen Parametern darzustellen. In dieser Arbeit wird die zeitliche Brandentwicklung anhand der Wärmefreisetzung verwendet. Die Brandausbreitungsphase wird mittels des  $t^2$ -Modells quadratisch dargestellt. Hierfür sind die maximale Wärmefreisetzungsrate  $Q_{max}$  und die Brandentwicklungsgeschwindigkeit entscheidend. Nach der Brandausbreitungsphase folgt die Vollbrandphase, die durch eine konstante Wärmefreisetzung gekennzeichnet ist und gleichzeitig die maximale Wärmefreisetzungsrate darstellt, wie in Abbildung 4.3 verdeutlicht. Abbildung 4.3 veranschaulicht außerdem den Zusammenhang zwischen Brandentwicklungszeit  $t_g$  und dem Erreichen einer Wärmefreisetzungsrate von 1 MW.

Abb. 4.3:  $t^2$ -Modell

Wie in der Abbildung 4.3 dargestellt, beginnt die Wärmefreisetzungsrate bei null. Es ist keine Schwelbrandphase vorgeschaltet bzw. eine Schwelbrandphase wird in diesen Brand-

simulationen nicht betrachtet. Die Vollbrandphase endet, wenn 70 % der Brandlast verbraucht sind und fällt danach linear ab. Für die Brandmodellierung wird sich primär auf die Brandentwicklungsphase und die Vollbrandphase konzentriert, wie schon in Unterabschnitt 4.1.1 auf Basis der Erkenntnisse von Albrecht und Hosser [AH09] erklärt. Der für diese Arbeit maßgebliche Brandverlauf als Darstellung in Cfast ist in Abbildung 4.4 wiedergegeben. Der Verlauf steigt dementsprechend quadratisch an und erreicht bis zur Sekunde 546 die maximale Wärmefreisetzungsrate von 3500 kW. Ähnlich ist der Verlauf im Fall der Verkaufsstätte mit angepassten Werten.



**Abb. 4.4:** Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei der Versammlungsstätte

Der Verlauf der Brandentwicklungsphase lässt sich mathematisch folgendermaßen ausdrücken [Hos13, S.52]:

$$Q = \alpha * t^2 \quad (4.1)$$

mit  $Q$  : Wärmefreisetzungsrate [kW]

$\alpha$  : Brandentwicklungsfaktor [kW/s<sup>2</sup>]

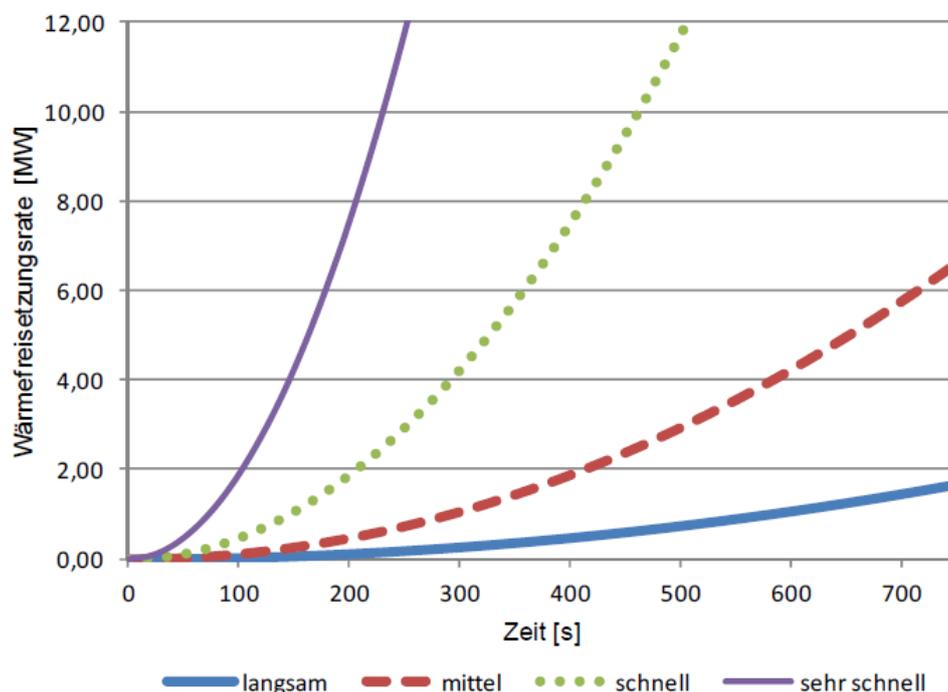
$t$  : Branddauer ohne Berücksichtigung der Schwelbrandphase [s]

Durch Umformung der Gleichung lässt sich  $t_1$  ermitteln:

$$t_1 = \sqrt{\frac{Q_{Max}}{\alpha}} \quad (4.2)$$

Mittels Gl. 4.2 wird für alle Bemessungsbrände der Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Wärmefreisetzungsrate berechnet und in Cfast eingegeben. Der Brandentwicklungsfaktor  $\alpha$  beeinflusst dabei die Brandverlaufskurve maßgeblich. Dieser ist abhängig von der Brandentwicklungszeit. Abbildung 4.5 veranschaulicht die Brandentwicklung in

Abhängigkeit von der Brandentwicklungsgeschwindigkeit.



**Abb. 4.5:** Brandentwicklung bis zum Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate [Hos13]

Je nach Brandentwicklungsgeschwindigkeit wird anhand Tabelle 4.2. der Brandentwicklungsfaktor  $\alpha$  ermittelt. Mittels des Brandentwicklungsfaktors kann anschließend der Brandverlauf gemäß Gl. 4.1 bestimmt werden, welcher Einfluss auf die Entwicklung des Zonenmodells in Cfast hat.

Brandentwicklung	Parameter $\alpha$ [ $kW/s^2$ ]	Dauer $t_g$ bis zum Erreichen von 1 MW Wärmefreisetzungsrate [s]
langsam	0,002931	600
mittel	0,011720	300
schnell	0,046890	150
sehr schnell	0,187600	75

**Tabelle 4.2:** Standardwerte für  $\alpha$  und  $t_g$  [Hos13]

## 4.4 Entfluchtungsszenario

### 4.4.1 Gehgeschwindigkeit

Gemäß vfdb-Leitfaden (vgl. [Hos13], S. 275) wird für eine moderate Auslastung eine Gehgeschwindigkeit  $V$  in der Ebene von 1,0 m/s angegeben. Nach Bryan [Bry02] erhalten wir für die Gehgeschwindigkeit in der Ebene ebenfalls 1,0 m/s mit einer Standardabweichung

von  $\sigma = 0,42$  m/s. Bei dieser Untersuchung wurden die unterschiedlichen Gehgeschwindigkeiten von mobilitätseingeschränkten und nicht eingeschränkten Personen verglichen und eine Gesamtgeschwindigkeit gebildet. Albrecht (vgl. [Alb12], S.128) verwendet für die Entfluchtungssimulation eine Gehgeschwindigkeit von 1,25 m/s mit einer Standardabweichung  $\sigma = 0,3$  m/s. Weidmann (vgl. [Wei93], S.53) ermittelte für die mittlere Gehgeschwindigkeit einen Wert von 1,34 m/s mit einer Standardabweichung von 0,26 m/s. Es wird aus der Literaturrecherche deutlich, dass es unterschiedliche Angaben gibt und es an einheitlichen stochastischen Werten mangelt. Für diese Arbeit wurde auf die Veröffentlichung von Albrecht [AH11] zurückgegriffen, welche auf den Untersuchungen von Purser [Pur02] basieren. Die ermittelte Gehgeschwindigkeit von 1,2 m/s mit einer Standardabweichung von 0,12 m/s befindet sich zwischen den oben genannten Werten und stellt somit eine ausgeglichene Annahme dar.

#### 4.4.2 Personendichte

Im Falle der Personendichte gibt der vfdb-Leitfaden für eine moderate Auslastung, wie im vorigen Kapitel, eine Personendichte von  $1,0 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  an. Für die vorliegende Versammlungsstätte muss gemäß MVStättVO §1 (2) eine Personendichte von  $2,0 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  für sonstige Stehplätze, was dem vorgestellten Foyer entsprechen würde, angenommen werden. Der vfdb-Leitfaden gibt außerdem Personenbelegungen entsprechend der Nutzungsarten an. Hiernach sollen für Foyers bzw. Eingangshallen ebenfalls  $1,0 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  angenommen werden. Albrecht (vgl. [Alb13]) verwendete für seine probabilistischen Betrachtungen in Bezug auf ein Atrium, welches einen Eingangsbereich darstellen soll, eine Personendichte von  $1,5 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  mit einer Standardabweichung von  $0,5 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$ . Diese Werte werden auch für das stochastische Modell dieser Arbeit verwendet, da es das Mittel der vorher beschriebenen Werte darstellen soll. Weiterhin wird mit den gewählten Werten gewährleistet, dass die Vorgabe von  $2,0 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  aus der MVStättVO nicht überschritten wird, was maßgeblich für die Ermittlung der Rettungswegbreiten in Kapitel 3 ist. Für unsere Verkaufsstätte erhalten wir ebenfalls unterschiedliche Angaben. Gemäß der Personenbelegung nach Nutzungsarten aus dem vfdb-Leitfaden soll eine Personenbelegung von  $0,3 - 0,5 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  für Verkaufsgeschäfte (vgl. S. 286) verwendet werden. Eine Angabe von  $0,1 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  gilt für Einkaufsmärkte für Großgerät, Möbel etc. RiMEA (vgl. [RiM16], S. 18) empfiehlt für ein Kaufhaus eine Personenbelegung von  $0,18 - 0,36 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$ , aufgrund von Untersuchungen der National Fire Protection Association (NFPA), anzusetzen. Für diese Arbeit soll eine Personenbelegung von  $0,5 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  verwendet werden, welche nach vfdb für ein Verkaufsgeschäft mit ebenerdigen Zugang und gleichzeitig der für die Kapazitätsanalyse vorgegebenen minimalen Auslastung gilt. Für die Standardabweichung wird ein Wert von  $0,125 \frac{\text{Pers.}}{\text{m}^2}$  gewählt, sodass wir für beide Personendichten (Foyer und Filiale) einen Variationskoeffizienten von 25% erhalten.

### 4.4.3 Spezifischer Personenstrom

Wie schon in Kapitel 2.4 verdeutlicht, ist der spezifische Personenstrom abhängig von der Personendichte und der Gehgeschwindigkeit. Deshalb wird von einem separaten stochastischen Modell für den spezifischen Personenstrom abgesehen. Dieser soll gemäß der Gleichung 2.5 automatisch berechnet werden.

### 4.4.4 Alarmzeit

Für die Simulationen wird gemäß MVkVO §20 (2) 2 und MVStättVO §20 (1) sowohl für die Einkaufsfiliale als auch für das Foyer das Vorhandensein einer automatischen Brandmeldeanlage angenommen. Weiterhin wird die Annahme getroffen, dass diese in ein Alarmierungssystem integriert ist. Durch das Vorhandensein der BMA, wie in Kapitel 3 erläutert, wird die Alarmzeit gleich null gesetzt, weil die Alarmierung der Personen im Raum unmittelbar mit der Detektion erfolgt. Es werden also zeitverzögernde Maßnahmen, wie das Bestätigen des Alarms z.B. durch eine eingewiesene Person, nicht betrachtet. Diese Annahme wird auch durch Purser [Pur03] gestützt:

**Level A1 alarm system:** Automatic detection activating an immediate general alarm to occupants of all affected parts of the building.

$\Delta t_a = \text{effectively zero}$

**Level A2 (two stage) alarm system:** Automatic detection providing a pre-alarm to security, manually (or automatic time-out delay) activated general alarm. For a voice alarm system add message x2.

$\Delta t_a = \text{time out delay (usually 2 or 5 minutes)}$

**Level A3 alarm system:** local automatic detection and alarm near fire or no automatic detection, with manually activated alarm.

$\Delta t_a = \text{likely to be long and unpredictable}$

Hiernach werden für die Alarmierungssysteme drei Kategorien gebildet. Unsere Annahme entspricht der Kategorie A1. Im Falle der automatischen Alarmierung werden alle betroffenen Bereiche ohne Zeitverzug alarmiert.

### 4.4.5 Reaktionszeit (Premovementzeit)

Zur Ermittlung einer Reaktionszeit wird sich ebenfalls an Vorgaben des vfdb-Leitfadens orientiert. Hierbei werden Unterscheidungen hinsichtlich der Nutzungsart, Güte des Alarmierungssystems, Gebäudekomplexität und der Qualität des Brandschutzmanagements vorgenommen. In dieser Arbeit wird die Nutzungsart Handel und Versammlungsstätte (B) mit einfach strukturierter Gebäudekomplexität (B1) und einem mittleren Brandschutzmanagement (M2) verwendet. Hierfür werden Reaktionszeiten von 1-3 min angenommen. In

der Arbeit von Hebben (vgl. [Heb08], S.23) wird auf Grundlage von Untersuchungen von Tubbs et al. [TM07] für andere Versammlungsstätten und Geschäfte eine Reaktionszeit von  $<2$  min unter der Annahme getroffen, dass ein Lautsprechersystem mit Sprachanweisungen vorhanden ist. In der Veröffentlichung von Schneider et al. [SOL14], basierend auf den Fire Engineering Guidelines [19996], wird ebenfalls eine Reaktionszeit von  $<2$  min für den Fall angegeben, dass eine Alarmsirene mit auf- und abschwelldem Ton sowie mit zusätzlichem optischen Informationssystem vorhanden ist. Diese Angaben decken sich auch mit der Reaktionszeit von 2 min, welche für die Entfluchtungssimulation des Kongresszentrums in Frankfurt verwendet wurde. Albrecht (vgl. [Alb12], S. 128) hat für die Reaktionszeit einen Wert von 90 s gewählt mit einer Standardabweichung von 25 s, welche sich im Bereich der vorher erläuterten Daten befindet und damit auch Grundlage dieser stochastischen Betrachtungen sein soll.

#### 4.4.6 Detektionszeit

Die Bestimmung dieses stochastischen Parameters ist schwierig vorzunehmen, weil dieser von vielen unterschiedlichen Einflüssen, wie z.B. der Raumhöhe, Melderart oder der Brandart und -größe, abhängig ist. Dementsprechend ist es auch schwierig, repräsentative Daten hierzu zu finden. Bei Dehne (vgl. [Deh03], S.70) wird eine Detektionszeit bei einer automatischen Brandmeldeanlagen mit 1,5 min angenommen. Frey (vgl. [Fre14], S.144) gibt an, dass typische Werte für die Detektionsdauer bei Vorhandensein einer Brandmeldeanlage zwischen 1 und 2 Minuten liegen. Albrecht (vgl. [Alb13]) wählt für die Warnzeit einen Wert von 60 s mit einer Standardabweichung von 15 s. Die Warnzeit beinhaltet gemäß Abb. 2.1 die Detektions- und Alarmzeit. Da in dem betrachteten Fall die Alarmzeit gleich null ist und im Abgleich mit den vorher genannten Angaben die Detektionszeit bei 1 bis 2 min liegt, wird für diese Arbeit eine Detektionszeit von 60 s mit einer Standardabweichung von 15 s gewählt. Dies entspricht einem Variationskoeffizienten von 25%.

#### 4.4.7 Angewendete stochastische Modelle

In dieser Arbeit werden alle stochastischen Annahmen als normalverteilt angenommen. Dadurch soll der Rechenaufwand, welcher bei der Transformation anderer Verteilungstypen in die Normalverteilung entstehen würde, eingespart werden. Die Normalverteilung stellt bei den zugrunde gelegten Parametern eine ausreichend genaue Annahme dar. Nichtsdestotrotz sollte bei einer tiefergehenden Betrachtung in der Realität auf vorherrschende Rahmenbedingungen geachtet werden und gegebenenfalls andere Verteilungstypen gewählt werden.

Parameter	Mittelwert $\mu$	Standardabweichung $\sigma$
max.Wärmefreisetzungsrate	3500 kW	700 kW
Brandentwicklungszeit	300 s	50 s
Gehgeschwindigkeit	1,2 m/s	0,12 m/s
Personendichte	1,5 $P./m^2$	0,5 $P./m^2$
Detektionszeit	60 s	15 s
Premovementzeit	90 s	25 s

**Tabelle 4.3:** Stochastisches Modell für die Untersuchung der Versammlungsstätte

Parameter	Mittelwert $\mu$	Standardabweichung $\sigma$
max.Wärmefreisetzungsrate	1645 kW	200 kW
Brandentwicklungszeit	400 s	100 s
Gehgeschwindigkeit	1,2 m/s	0,12 m/s
Personendichte	0,5 $P./m^2$	0,125 $P./m^2$
Detektionszeit	60 s	15 s
Premovementzeit	90 s	25 s

**Tabelle 4.4:** Stochastisches Modell für die Untersuchung der Verkaufsstätte

## 4.5 Die Modelle und ihre Einschränkungen

Nachteile der gewählten Annahmen und Modelle sollen hier kurz aufgezählt werden. Auch wenn die Wahl des Zonenmodells und die Modellierung durch Cfast für die Arbeit zweckmäßig ist, muss darauf hingewiesen werden, dass bei großen Räumen die Ausbildung einer deutlich definierten Rauchsicht nicht immer gegeben ist. Außerdem gilt, dass die Ermittlung der Schichten auf Basis einer Massen- und Temperaturbilanz geschieht. Turbulente Strömungen, die eventuell eine Einmischung von Rauch in die raucharme Schicht verursachen, werden nicht mitbetrachtet. Insofern besitzt das angesetzte Zonenmodell nur eingeschränkte Gültigkeit im Bezug auf die real vorkommenden Verhältnisse.

Eine weitere wichtige Abweichung von der Realität ist bei den Personeneigenschaften bzw. dem Verhalten der Personen zu finden. Durch die Anwendung des stochastischen Modells unterscheiden sich zwar die Personeneigenschaften unterschiedlicher Simulationsdurchläufe, aber während eines Simulationsdurchlaufs sind diese bei allen Personen identisch. In der Realität ist dies nicht gegeben. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, beginnen im Modell alle Personen gleichzeitig mit der Flucht und haben dabei die gleiche Gehgeschwindigkeit. Dadurch prägen sich Stauungen im Bereich der Ausgänge deutlicher aus, was in der Realität so nicht auftreten sollte, weil die Personen individuell auf den Alarm reagieren. Insgesamt wird kein individuelles Verhalten, wie in Kapitel 2.1 kurz erläutert, berücksichtigt, was sich in der Realität deutlich auf die Fluchtzeit auswirken kann. Weiterhin fehlen die Beeinflussung von Personen untereinander oder die Interaktion von Feuer bzw. Rauch und den fliehenden Personen. So kann auftretender Rauch und Hitze das

Personenverhalten deutlich beeinflussen. Hierzu wäre jedoch eine gemeinsame Simulation von Räumung und Brand nötig und keine getrennte Simulation wie in dieser Arbeit. Allerdings sind die gewählten Modelle und Annahmen ausreichend für die in dieser Arbeit betrachtete Aufgabenstellung.

Im Falle der Bemessungsbrände muss erwähnt werden, dass das Fehlen einer Schwelbrandphase Einfluss auf die verfügbare Räumungszeit ASET in der Realität hat. Diese würde ASET ggf. verlängern, was sich allerdings nur auf das gesamte Entfluchtungsszenario auswirkt, wenn dieser Schwelbrand direkt detektiert werden würde. Dies muss beim Übertragen der Szenarien auf die Realität berücksichtigt werden. Hinsichtlich des Brandverlaufs wurde ein ausreichend konservatives Vorgehen durch den Ansatz der maximal auftretenden Wärmefreisetzungsrates gewählt. Somit liegt die Wärmefreisetzungsrates der Simulationen überwiegend über den real vorkommenden Wärmefreisetzungsrates.

# Kapitel 5

## Zuverlässigkeitsanalyse und Ergebnisse

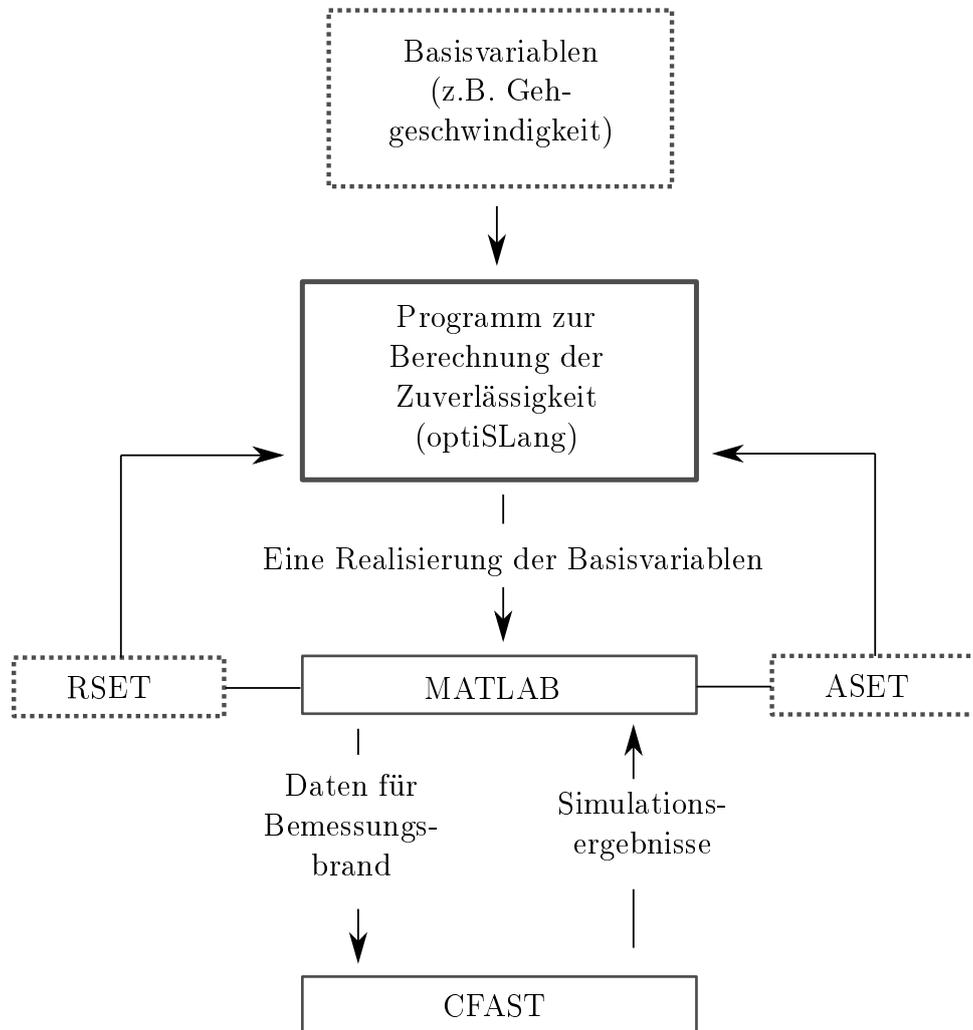
Dieses Kapitel widmet sich der eigentlichen probabilistischen Untersuchung der in vorigen Kapiteln erläuterten Szenarien. Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit bzw. der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  und der Sensitivitätsparameter  $\alpha$  wurde das Programm optiSLang von Dynardo verwendet. Es wurde weiterhin ein Skript mittels MATLAB programmiert, anhand dessen die Interaktion der Programme untereinander organisiert werden soll.

### 5.1 Interaktion der Programme

Zur Zuverlässigkeitsanalyse sind mehrere Berechnungsdurchläufe nötig, mit deren Ergebnissen optiSLang die Berechnung der Zuverlässigkeitsparameter vornehmen kann. Hierzu musste ein Interaktionspfad durchdacht und geplant werden, welcher die unterschiedlichen Arbeitsschritte mit den jeweils notwendigen Programmen sinnvoll verknüpft. In einem ersten Schritt erstellt optiSLang anhand der in Kapitel 4.4.7 vorgestellten stochastischen Modelle eine Realisierung der Basisvariablen. Die stochastischen Modelle werden in optiSLang eingegeben und die daraus gebildeten Basisvariablen von optiSLang an MATLAB ausgegeben. Im nächsten Schritt verwendet MATLAB die Daten bzgl. der Brandentwicklungszeit  $t_g$  und der maximalen Wärmefreisetzungsrate  $Q_{Max}$ , um die dazugehörige Cfast-Datei (.in-Dateiformat) mit dem Bemessungsbrandszenario zu schreiben. Dies geschieht anhand der Gleichung 4.1 und erzeugt einen Brandverlauf gemäß Abbildung 4.4. Weiterhin berechnet MATLAB mit den Basisvariablen der Personendichte, Gehgeschwindigkeit, Premovementzeit und Detektionszeit die benötigte Räumungszeit RSET. Nachfolgend simuliert Cfast das Bemessungsbrandszenario anhand der von MATLAB erstellten .in-Datei. Anschließend verwendet MATLAB die simulierten Daten aus Cfast. Hierzu wird aus einer Excel-Datei die vorhandene Räumungszeit ASET bestimmt. MATLAB sucht dabei den Zeitpunkt heraus, ab dem eine Schichthöhe von 2,50 m erreicht wird. Abgeschlossen wird dieser Interaktionskreislauf mit der Ausgabe von RSET und ASET an optiSLang durch MATLAB. Ein Teil des Programmcodes ist in kommentierter Fassung

im Anhang A zu finden.

Dieser Durchlauf ist in Abbildung 5.1 veranschaulicht und wurde insgesamt 1000-mal jeweils für die Versammlungsstätte und die Verkaufsstätte durchgeführt. In optiSLang wurde hierzu das Latin Hypercube Sampling verwendet.



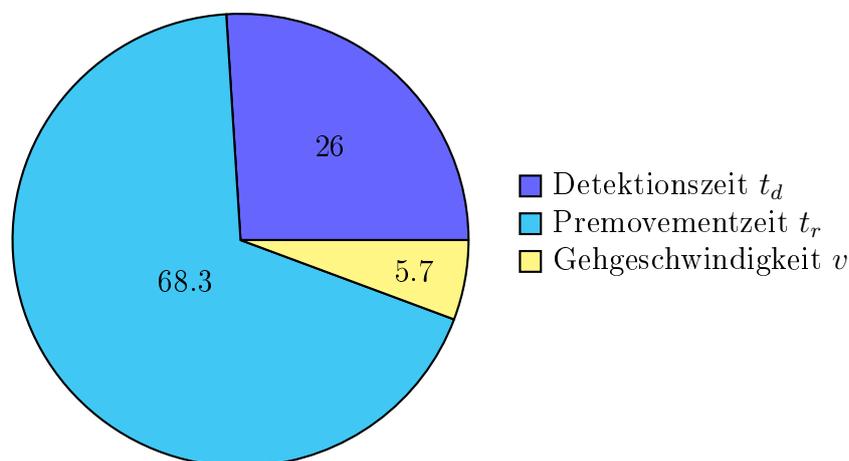
**Abb. 5.1:** Interaktion der Programme

In einem weiteren Schritt wurde anhand des erläuterten Interaktionskreislaufes die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  und der Sicherheitsindex  $\beta$  ermittelt. Hierzu wurde das Antwortflächenverfahren (Adaptive Response Surface Method - ARSM) in optiSLang verwendet. Anhand von jeweils 275 Durchläufen für Versammlungsstätte und Verkaufsstätte wurden die Ergebnisse ermittelt.

## 5.2 Ergebnisse zur Versammlungsstätte

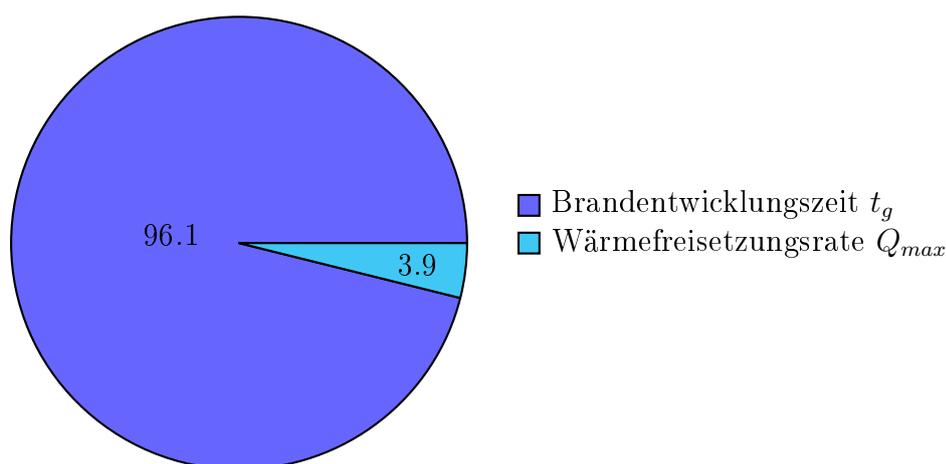
Die Ergebnisse zur probabilistischen Berechnung in der Versammlungsstätte sind in den folgenden Tortendiagrammen dargestellt. Abbildung 5.2 stellt hierbei die Sensitivitäten

der Variablen bzgl. der benötigten Räumungszeit RSET in der Versammlungsstätte dar. Den größten Wert mit 68,3 % erreicht hierbei die Premovementzeit bzw. die Reaktionszeit. Einen Wert von 26 % erreicht die Detektionszeit. Dagegen hat die Gehgeschwindigkeit eine Sensitivität von 5,7 % . Gemäß den Untersuchungen aus optiSLang hat der Parameter der Personendichte keine Sensitivität bzw. einen vernachlässigbar geringen Wert.



**Abb. 5.2:** Sensitivitäten im Bezug auf RSET in der Versammlungsstätte

In Abbildung 5.3 sind die Sensitivitäten bezüglich der vorhandenen Räumungszeit ASET in der Versammlungsstätte verdeutlicht. Den höchsten Wert mit 96,1 % erreicht der Parameter der Brandentwicklungszeit  $t_g$ . Die Wärmefreisetzungsrate  $Q_{max}$  liegt bei einem Sensitivitätsfaktor von 3,9 %.



**Abb. 5.3:** Sensitivitäten im Bezug auf ASET in der Versammlungsstätte

Folgende Ergebnisse ergab die Zuverlässigkeitsuntersuchung für die Versammlungsstätte:

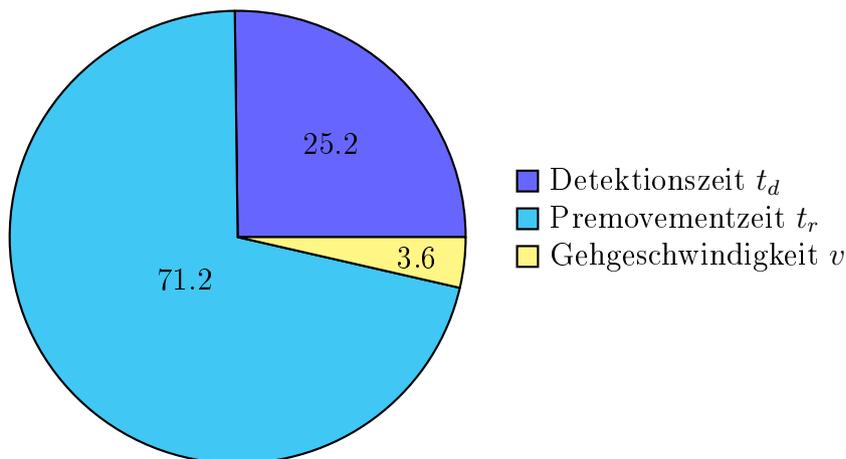
$$\text{Versagenswahrscheinlichkeit } p_f = 6,01 * 10^{-5}$$

$$\text{Sicherheitsindex } \beta = 3,845$$

Die in dieser Arbeit entwickelte bauordnungsrechtlich konforme Nutzung für eine Versammlungsstätte erreicht dementsprechend eine Versagenswahrscheinlichkeit von  $6,01 * 10^{-5}$  mit einem Sicherheitsindex von 3,845.

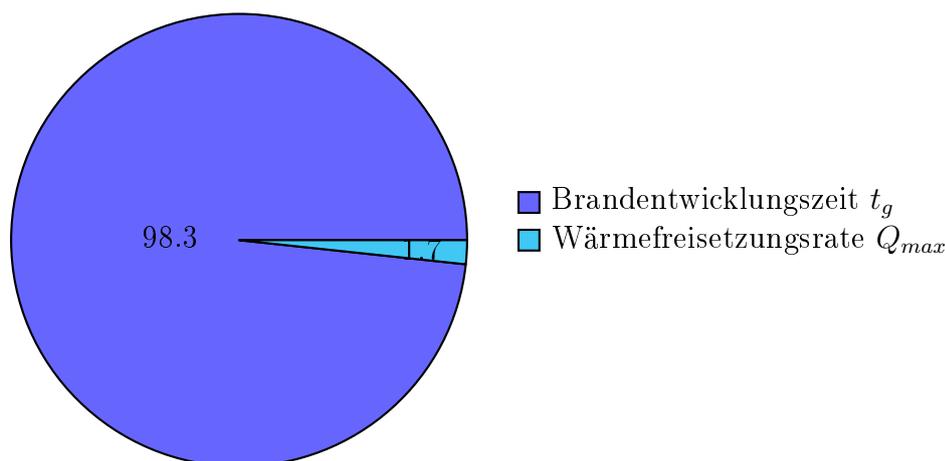
### 5.3 Ergebnisse zur Verkaufsstätte

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zur Verkaufsstätte sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Demnach liegt der größte Sensitivitätsfaktor ebenfalls bei der Premovementzeit mit 71,2 %. Für die Detektionszeit wurde ein Wert von 25,2 % ermittelt und der Wert für die Gehgeschwindigkeit liegt bei 3,6 %. Dies entspricht den Sensitivitäten für RSET. Auch hier wird kein Wert für die Personendichte angegeben.



**Abb. 5.4:** Sensitivitäten im Bezug auf RSET in der Verkaufsstätte

Im Bezug auf ASET in der Verkaufsstätte erreicht die Brandentwicklungszeit einen Wert von 98,3 % und die Wärmefreisetzungsrates einen Wert von 1,7 %. Diese Werte sind in Abbildung 5.5 veranschaulicht.



**Abb. 5.5:** Sensitivitäten im Bezug auf ASET in der Verkaufsstätte

Folgende Ergebnisse ergab die Zuverlässigkeitsuntersuchung für die Verkaufsstätte:

$$\text{Versagenswahrscheinlichkeit } p_f = 2,66 * 10^{-10}$$

$$\text{Sicherheitsindex } \beta = 6,209$$

Die erreichte Versagenswahrscheinlichkeit liegt bei  $2,66 * 10^{-10}$  mit einem Sicherheitsindex von 6,209 bei der Beispielgeometrie der Verkaufsstätte mit den beschriebenen Szenarien.

## 5.4 Ergebnisauswertung und -diskussion

In diesem Kapitel wird eine genauere Betrachtung und Interpretation der Ergebnisse erfolgen als auch ein Vergleich der unterschiedlichen Ergebnisse. Weiterhin wird ein Rückgriff auf Ergebnisse vergangener Studien vorgenommen und diese mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen.

Im Bereich der Sensitivitäten sind große Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen der Verkaufsstätte und der Versammlungsstätte zu erkennen. Die größte Differenz ist zwischen den Sensitivitätsfaktoren der Versammlungsstätte und der Verkaufsstätte im Bereich der Reaktionszeiten bzw. Premovementzeiten mit einem Wert von 2,9 % festzustellen. Diese geringen Differenzen zwischen den Sensitivitäten können vernachlässigt werden, sodass für beide Beispielgeometrien und die dazugehörigen Versuchsdurchläufe ein übereinstimmendes Ergebnis angenommen wird.

Die Sensitivitätsanalyse dieser Arbeit verdeutlicht, dass im Bereich der benötigten Entfluchtungszeit, also RSET, die angesetzte Reaktionszeit  $t_r$  einen großen Einfluss auf die Fluchtzeit der Personen hat. Mit 71,2 % in der Verkaufsstätte und 68,3 % in der Versammlungsstätte trägt die Phase, in der die Personen den Entschluss zur Flucht treffen, maßgeblich zum Gelingen einer sicheren Flucht bei. Ähnliche Ergebnisse werden auch in

den Ausfertigungen von [Sie11] beschrieben. Mit 25,2 % in der Verkaufsstätte und 26 % in der Versammlungsstätte hat die Detektionszeit  $t_d$  in beiden Fällen ebenfalls einen großen Einfluss auf das Ergebnis von RSET. Dieser Anteil liegt bei mehr als einem Viertel. Die Gehgeschwindigkeit  $v$  liegt bei beiden Versuchsaufstellungen im einstelligen Bereich mit 3,6 % in der Verkaufsstätte und 5,7 % bei der Versammlungsstätte und hat damit den geringsten Anteil am Ergebnis von RSET. Die Personendichte ist in beiden Fällen nicht relevant und erhält keinen Sensitivitätsfaktor.

Die Ergebnisauswertung verdeutlicht, dass für die in dieser Arbeit vorgenommene Ermittlung der verfügbaren Entfluchtungszeit vor allem die Phasen vor der eigentlichen Fluchtbewegung entscheidend sind. So haben sowohl die Detektionszeit als auch die Reaktionszeit gemeinsam einen Anteil von 96,4 % in der Verkaufsstätte bzw. von 94,3 % in der Versammlungsstätte am Ergebnis von RSET. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass bspw. eine Erhöhung der Reaktionszeit die Versagenswahrscheinlichkeit vergrößert. Eine Verringerung der Reaktionszeit würde dementsprechend RSET verringern und die Versagenswahrscheinlichkeit verkleinern. Dass die Gehgeschwindigkeit  $v$  nur einen geringen Einfluss in beiden Untersuchungen hat, liegt womöglich an der Ermittlung der Fluchtdauer mittels Kapazitätsanalyse wie in Kapitel 2 erläutert. In den gewählten Beispielgeometrien ist immer die Passagezeit, also die Zeit für das Passieren der Ausgänge maßgebend. Das Zurücklegen der Wegstrecke zum Ausgang wird nicht maßgeblich, weil sich ein Stau vor den Ausgängen bildet, wenn man die Kapazitätsanalyse als Grundlage wählt. Dieses Stauszenario ist für die beschriebenen Beispielgeometrien mit der gewählten Raumanordnung in der Wirklichkeit realistisch. Insofern bestätigt es, dass die Kapazitätsanalyse für die in dieser Arbeit beschriebenen Fälle ein ausreichend realitätsnahes Szenario beschreibt. Es kann festgehalten werden, dass eine Variation der Gehgeschwindigkeit kaum Einfluss auf das Endergebnis hat.

Bei der Betrachtung der verfügbaren Entfluchtungszeit ASET stellt sich der Einfluss der Brandentwicklungsdauer  $t_g$  deutlich hervor. Mit 98,3 % in der Verkaufsstätte bzw. 96,1 % in der Versammlungsstätte hängt die ASET nahezu ausschließlich von der Wahl der Brandentwicklungszeit ab. Diese Ergebnisse korrelieren auch mit den Ergebnissen aus den Arbeiten von [Alb12], [AH11] und [Sie10]. Die maximale Wärmefreisetzungsrate  $Q_{max}$  ist mit 1,7 % bei der Verkaufsstätte und 3,9 % bei der Versammlungsstätte fast unerheblich. Es darf also festgehalten werden, je schneller der Brand sich entwickelt, umso stärker ist die Rauchentwicklung und desto eher das Erreichen der kritischen Rauchschichthöhe. Dies entspricht ebenfalls den real zu erwartenden Verhältnissen.

Abschließend zur Betrachtung der Sensitivitäten bzgl. RSET und ASET kann festgehalten werden, dass die Werte im erwarteten Bereich liegen. Sie decken sich mit den Ergebnissen aus vorhergegangenen Studien und entsprechen den real zu erwartenden Verhältnissen.

Im Bereich der Versagenswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Versuchsdurchläufe sind Un-

terschiede deutlich erkennbar. Die Verkaufsstätte ist mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von  $2,66 * 10^{-10}$  deutlich sicherer, weil geringer, im Hinblick auf die Zuverlässigkeit, als die Versammlungsstätte mit  $6,01 * 10^{-5}$ . Auch die Sicherheitsindizes unterscheiden sich dementsprechend deutlich mit 6,205 für die Verkaufsstätte und 3,845 für die Versammlungsstätte. Als Ursache hierfür kommt unter anderem das Brandszenario in Frage. Hierbei sind die Brandentwicklungszeit und die maximale Wärmefreisetzungsrate unterschiedlich. Die Brandentwicklungszeit ist bei der Versammlungsstätte mit 300 s niedriger als bei der Verkaufsstätte. Außerdem ist die maximale Wärmefreisetzungsrate mit 3500 kW bei der Versammlungsstätte wesentlich höher als bei der Verkaufsstätte. Bei der Versammlungsstätte liegt dementsprechend ein sich schneller entwickelnder Brand mit einer größeren Wärmeentwicklung als bei der Verkaufsstätte vor. Dies führt tendenziell dazu, dass eine stärkere Rauchentwicklung zu verzeichnen ist und dadurch auch eine stärkere Verrauchung des Raumes. Dementsprechend wird auch die maßgebende raucharme Schichthöhe früher erreicht.

## 5.5 Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass eine Quantifizierung des Sicherheitsniveaus für die Personensicherheit im Brandfall möglich ist. So ist es z.B. im Fall der Versammlungsstätte möglich, wenn angenommen wird, dass ein Brand nur in der Mitte des Foyers am Empfangstresen entsteht. Bei einer Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in einer öffentlichen Versammlungsstätte mit  $p_1 = 2,0 * 10^{-2}$  [1/a] (vgl. [Hos13], S. 354) resultiert eine jährliche Versagenswahrscheinlichkeit von:

$$6,01 * 10^{-5} * 2,0 * 10^{-2} = 1,202 * 10^{-6} [1/a]$$

Dies wäre gemäß dem Richtwert aus dem vfdb-Leitfaden (vgl. [Hos13], S. 356) für eine Verkaufsstätte mit mittleren Schadensfolgen unterhalb der Grenze von  $1,3 * 10^{-6}$  [1/a]. Es könnten dann im Verlaufe der Untersuchungen Maßnahmen getroffen werden, die ein noch höheres Sicherheitsniveau erreichen oder bspw. kostensparende Maßnahmen getroffen werden, bei denen letztendlich die vorgegebenen Richtwerte erfüllt bleiben. Eine Variation der raucharmen Schichthöhe oder der Deckenhöhe könnten einen direkten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit haben. Wie in Abschnitt 5.4 angedeutet, ist das Brandszenario ebenfalls entscheidend für die Versagenswahrscheinlichkeit.

Um zukünftig ein standardisiertes Verfahren zur Ermittlung von Zuverlässigkeit zu entwickeln, müssen einheitliche nutzungsspezifische streuende Parameter mit Verteilungsfunktionen bestimmt werden. Weiterhin gilt es Nachweiskriterien, wie die raucharme

Schichthöhe, für den jeweiligen betrachteten Fall festzulegen. Hierfür bedarf es wahrscheinlich eigens entwickelter Programme, die eine einfache Handhabung für probabilistische Berechnungen ermöglichen. Abschließend müssen Richtwerte für Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsindizes im Bereich der Personensicherheit definiert werden.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung

In dieser Studienarbeit wurde eine Möglichkeit zur Quantifizierung des Sicherheitsniveaus der Personensicherheit im Brandfall aufgezeigt. Hierzu wurden in einem ersten Schritt das Nachweiskriterium der raucharmen Schichthöhe gewählt und erläutert. Weiterhin wurde die Bestimmung der Fluchtdauer anhand der Kapazitätsanalyse beschrieben, um dieses Verfahren für die weiteren Untersuchungen anzuwenden. Die probabilistischen Grundlagen im Bezug auf die Räumung wurden ebenfalls aufgestellt und erörtert. In einem weiteren Schritt wurden zwei Beispielgeometrien gebildet, welche als Grundlage für zwei probabilistische Versuchsdurchläufe dienten. Hierzu wurde eine Versammlungsstätte, welche als Foyer dienen sollte, und eine Verkaufsstätte eines herkömmlichen Einkaufsladen entworfen. Grundlage hierfür waren die Vorgaben aus der Muster-Versammlungsstättenverordnung als auch aus der Muster-Verkaufsstättenverordnung. Somit lagen schlussendlich zwei bauordnungsrechtlich konforme Nutzungen für die probabilistischen Berechnungen vor. Das Kapitel wurde mit einem Vergleich mit der Versammlungsstätte in Frankfurt abgeschlossen.

Das darauffolgende Kapitel widmet sich den Brand- und Entfluchtungsszenarien. Diese wurden nutzungsspezifisch abgewandelt. Auf der Basis von unterschiedlichen Literaturwerten wurden hierzu streuende Parameter für einen Bemessungsbrand ausgewertet und abschließend jeweils für Versammlungsstätte und Verkaufsstätte gewählt. Für das Brandszenario wurde das  $t^2$ -Modell verwendet, sodass die Brandentwicklungszeit  $t_g$  und die maximale Wärmefreisetzungsrate  $Q_{max}$  des Brandes eingesetzt werden mussten. Zur Brandmodellierung wurde das Programm Cfast verwendet, weil es sich aufgrund der Darstellung eines Zonenmodells besonders für das Konzept mit dem Nachweiskriterium einer raucharmen Schichthöhe eignet. Anhand dieser Zonenmodellierung mit einer raucharmen, kalten Zone und einer rauchhaltigen, warmen Zone konnte der Zeitpunkt für das Erreichen der 2,5 m Grenze für die raucharme Schichthöhe exakt bestimmt werden. Dieses Verfahren war Grundlage für die Bestimmung der verfügbaren Entfluchtungszeit ASET.

Für das Entfluchtungsszenario wurden ebenfalls anhand einer Literaturrecherche streuende Parameter für die jeweilige Nutzung ausgewählt. Die streuenden Parameter waren die Gehgeschwindigkeit  $v$ , Personendichte, Reaktionszeit  $t_r$  und Detektionszeit  $t_d$ . Diese wurden auf die typischen Gegebenheiten in einer Versammlungsstätte oder Verkaufsstätte angepasst. Beide stochastischen Modelle, also das Brand- bzw. Entfluchtungsszenario, basierten auf einer Normalverteilung. Zur Interaktion der Programme untereinander und der probabilistischen Auswertung wurde ein MATLAB-Skript geschrieben, anhand dessen die Bestimmung von ASET und RSET automatisch ablief. Eingebettet wurde das Skript in das Programm optiSLang, welches dann die Sensitivitätsanalyse und die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit durchführte. Für die Versammlungsstätte als auch Verkaufsstätte wurden hierfür jeweils insgesamt 1275 Berechnungsdurchläufe durchgeführt. Für die Bestimmung der Sensitivitäten wurde das Latin Hypercube Sampling verwendet und im Fall der Versagenswahrscheinlichkeit das Antwortflächenverfahren (Adaptive Response Surface Method - ARSM).

Abschließend wurden die Ergebnisse für die Versammlungsstätte als auch die Verkaufsstätte beschrieben, ausgewertet und diskutiert. Die Analysen machten deutlich, dass die Brandentwicklungszeit  $t_g$  den größten Einfluss auf die verfügbare Entfluchtungszeit ASET hat. Im Falle der benötigten Entfluchtungszeit RSET hat die Reaktionszeit  $t_r$  den größten Einfluss. Außerdem ergaben die Untersuchungen, dass die Detektionszeit  $t_d$  für RSET relevant ist. Dementsprechend ist der Zeitraum vor den eigentlichen Fluchtbewegungen entscheidend. Weiterhin wurden die Ergebnisse zur Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  eingeordnet und eine kurze zukünftige Perspektive auf diesen Bereich der probabilistischen Betrachtung der Personensicherheit im Brandfall gegeben.

# Literaturverzeichnis

- [19996] *Fire Engineering Guidelines*. Erste Auflage. Australia, Sydney : Fire Code Reform Centre, 1996.
- [AH09] ALBRECHT, C. ; HOSSER, D.: Probabilistic Assessment of performance criteria for egress design. In: *Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop* (2009), S. 163-176. <https://de.scribd.com/document/25545738/7-International-Probabilistic-Workshop>
- [AH11] ALBRECHT, C. ; HOSSER, D.: A Response Surface Methodology for Probabilistic Life Safety Analysis using Advanced Fire Engineering Tools. In: *Fire Safety Science* 10 (2011), S. 1059–1072. <http://dx.doi.org/10.3801/iafss.fss.10-1059>. – DOI 10.3801/iafss.fss.10–1059
- [Alb12] ALBRECHT, C.: *A risk-informed and performance-based life safety concept in case of fire*. Braunschweig, TU Braunschweig, Diss., 2012.
- [Alb13] ALBRECHT, C.: Probabilistische Risikoanalyse als Basis für die quantitative Bewertung der Personensicherheit in Atrien. In: *Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutztag 2013, Tagungsband, 25.-26.09.2013, S. 71-88. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig.* (2013)
- [Bau02] BAUMINISTERKONFERENZ: *Musterbauordnung MBO*, 2002. – Zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016
- [Bry02] BRYAN, J. L. ; DINENNO, P. (Hrsg.): *Behavioral Response to Fire and Smoke*. The SFPE Handbook of Fire Protection, Dritte Auflage. The National Fire Protection Association. März 2002.
- [Deh03] DEHNE, M.: *Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung*. Braunschweig, TU Braunschweig, Diss., 2003.
- [Deu90] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 1990:2010-12 - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*, 1990.
- [Deu07] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN 18232-2:2007-11 - Rauch- und*

- Wärmefreihaltung - Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau*, 2007.
- [Fac95] FACHKOMMISSION, Bauaufsicht: *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten (Muster-Verkaufsstättenverordnung - MVKVO)*, 1995. – zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014
- [Fac05] FACHKOMMISSION, Bauaufsicht: *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung - MVStättVO)*, 2005. – zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014
- [Fre14] FREY, P.: *Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden. Erste Auflage.* Basellandschaftliche Gebäudeversicherung. Medienservices Schwabe AG. Liestal, Schweiz. - ISBN: 978-3906819006. <http://bgv.blaetterkatalog.ch/b9059/catalog/index.html?data=b9059/b905911&lang=d#2>. Version: 2014
- [Heb08] HEBBEN, S.: *Leitfaden für die Erstellung von Evakuierungsgutachten auf der Grundlage von Personenstromsimulationen und deren Bewertung für die Genehmigungsbehörde.* Duisburg, Universität Duisburg-Essen, Diplomarbeit, 2008.
- [Hof14] HOFINGER: Problemfall Evakuierung: Der menschliche Faktor. In: *Sicherheitsingenieur* 2 (2014), S. 29-31. [https://www.team-hf.de/downloads/sicherheitsingenieur-2\\_2014-interview-g.-hofin.pdf](https://www.team-hf.de/downloads/sicherheitsingenieur-2_2014-interview-g.-hofin.pdf). – ISSN 0300–3329
- [Hos13] HOSSER, D.: *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes.* 3. Auflage. Altenberge, 2013.
- [Mit96] MITLER, H.: Input Data for Fire Modeling. In: *NISTR 6030, Band 1: 13th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety.* Gathersburg, März 1996.
- [NM02] NELSON, H. E. ; MOWRER, F. W.: Emergency Movement. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Dritte Auflage. National Fire Protection Association (NFPA).* Quincy, Massachusetts. (2002). ISBN 087765–451–4
- [Pur02] PURSER, D.: Toxicity Assessment of Combustion Products. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Dritte Auflage. National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, Massachusetts.* (2002)
- [Pur03] PURSER, D.: Behaviour and travel interactions in emergency situations and data needs for engineering design. In: *Pedestrian and evacuation dynamics conference. University of Greenwich.* (2003), S. 355–370.

- [RiM16] RiMEA: *Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 3.0.0.* Duisburg, März 2016.
- [Sie10] SIEMON, M.: *Sensitivitätsanalysen für numerische Verfahren im Brandschutz.* Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Studienarbeit, 2010.
- [Sie11] SIEMON, M.: *Zuverlässigkeitsorientierte Bewertung der sicheren Entfluchtung im Brandfall mit Hilfe von Ingenieurmethoden.* Braunschweig, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2011.
- [SOL14] SCHNEIDER, U. ; OSWALD, M. ; LEBEDA, C.: *Evakuierung bei Brandereignissen, Tagungsband / Brandschutz-Fachtagung.* Schloss Schallaburg bei Melk an der Donau, Österreich, Februar 2014. – Forschungsbericht
- [TM07] TUBBS, J. ; MEACHAM, B.: *Egress Design Solutions: A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning.* Erste Auflage. Wiley & Sons Verlag, 2007. – ISBN 978-0-471-71956-4
- [Wei93] WEIDMANN, U.: *Transporttechnik der Fußgänger. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen und Eisenbahnbau.* Zweite Auflage. ETH Zürich, 1993. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-000687810>. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-000687810>
- [Zeh19] ZEHFUSS, J.: *Ingenieurmethoden: Modelle für Brand- und Personenstromsimulationen.* 2019. – Vorlesungsskript.

# Anhang A

## Code für Zuverlässigkeitsanalyse

**MATLAB – Funktion zur Berechnung von RSET Versammlungstätte**

```
function [ rset ] = fluchtzeit( v,P,td,tr)
```

```
n=P*1600;  
f=P*v;  
tp=n/(f*19.2);  
tw=28.28/v;  
if(tp>tw)  
x=tp;  
else
```

**MATLAB – Funktion zur Berechnung des Brandentwicklungsfaktors  $\alpha$**

```
function [ alpha ] = brandentwicklungsfaktor( tg )
```

```
alpha=((tg-300)/(600-300))*(0.002931-0.011720)+0.011720;
```

```
end
```

**MATLAB – Funktion zur Berechnung von Zeitpunkt  $t_1$**

```
function [ t1 ] = brandentwicklungszeit( alpha,qmax )
```

```
t1=sqrt(qmax/alpha);
```

```
end
```

**MATLAB – Skript zur Zuverlässigkeitsanalyse der Verkaufsstätte**

```
% Skript zur Zuverlässigkeitsanalyse für OptiSLang –
```

---

```
Verkaufsstätte
if ~exist('OSL_REGULAR_EXECUTION','var')
    clear all;
    close all;
    OSL_REGULAR_EXECUTION = false;
end
% Inputs (define reference variables)
if OSL_REGULAR_EXECUTION == false
v = 1.2; %v = Gehgeschwindigkeit
P = 0.5; %P = Personendichte
td = 60; % td = Detektionszeit
tr = 90; % tr = Reaktionszeit
tg = 400; %tg = Brandentwicklungszeit
qmax = 1645; %qmax = maximale Wärmefreisetzungsrate
end
% Berechnung der Fluchtzeit
[rset] = fluchtzeit(v,P,td,tr);
% Berechnung des Brandentwicklungsfaktors
[alpha] = brandentwicklungsfaktor(tg);
% Berechnung der Brandentwicklungszeit t1
[t1] = brandentwicklungszeit(alpha,qmax);
% Berechnung der einzelnen Zeitpunkte für CFAST
t00=0;
t01=t1/10;
t02=2*t01;
t03=3*t01;
t04=4*t01;
t05=5*t01;
t06=6*t01;
t07=7*t01;
t08=8*t01;
t09=9*t01;
t10=t1;
t11=t10+300;
t12=t11+30;
t13=t12+30;
t14=t13+30;
t15=t14+30;
t16=t15+30;
```

```
t17=t16 +30;
t18=t17 +30;
t19=t18 +30;
t20=t19 +30;
t21=t20 +30;
t22=t21 +10;
% Berechnung der einzelnen Wärmefreisetzungsraten für CFAST
q00=0;
q01=qmax*10;
q02=4*q01;
q03=9*q01;
q04=16*q01;
q05=25*q01;
q06=36*q01;
q07=49*q01;
q08=64*q01;
q09=81*q01;
q10=qmax*1000;
q11=qmax*1000;
q12=81*q01;
q13=64*q01;
q14=49*q01;
q15=36*q01;
q16=25*q01;
q17=16*q01;
q18=9*q01;
q19=4*q01;
q20=q01;
q21=0;
q22=0;

% Datei im Schreibmodus öffnen

fid = fopen('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\
optiSLang\Verkaufsstaette\cfast7\Verkaufsstaette.in', 'w');

% Schreiben von Text:
% %s heisst String, \n erzeugt einen Zeilenumbruch
fprintf(fid, '%s\n', 'VERSN,7,Verkaufsstaette');
```

```

fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Scenario Configuration ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', 'TIMES,900,1,1,1 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'EAMB,293.15,101325,0 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'TAMB,293.15,101325,0,50 ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Compartments ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', 'COMPA,Comp 1,50,40,3.8,0,0,0,OFF,OFF,OFF,
                    50,50,50 ');

fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Vents ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', 'HVENT,1,2,1,2,2.5,0,19,,2,TIME,,0,1,0,1,
                    0,0 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'HVENT,1,2,2,2,2.5,0,19,,4,TIME,,0,1,0,1,
                    0,0 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'HVENT,1,2,3,2,2.5,0,24,,1,TIME,,0,1,0,1,
                    0,0 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'HVENT,1,2,4,2,2.5,0,24,,3,TIME,,0,1,0,1,
                    0,0 ');

fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,1,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,10,30 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,2,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,40,30 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,3,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,25,20 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,4,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,10,10 ');
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,5,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,40,10 ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Fires ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! ');
fprintf(fid, '%s\n', '!! New Fire ');
fprintf(fid, '%s\n', 'FIRE,1,25,20,0,1,TIME,0,0,0,0,New Fire ');
fprintf(fid, '%s\n', 'CHEMI,1,4,0,0,0,0.35,5E+07 ');
fprintf(fid, '%s', 'TIME, ');
fprintf(fid, '%g, ', t00, t01, t02, t03, t04, t05, t06, t07, t08,
t09, t10, t11, t12, t13, t14, t15, t16, t17, t18, t19, t20, t21, t22 );
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, '%s', 'HRR, ');

```

% %g ist Fixkomma-Notation, mehrere Werte werden geschrieben

```

fprintf(fid, '%g, ', q00, q01, q02, q03, q04, q05, q06, q07, q08,
q09, q10, q11, q12, q13, q14, q15, q16, q17, q18, q19, q20, q21, q22);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, '%s\n', 'SOOT,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,
0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,
0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01');
fprintf(fid, '%s\n', 'CO,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,
0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,
0.01,0.01,0.01,0.01,0.01,0.01');
fprintf(fid, '%s\n', 'TRACE,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0');
fprintf(fid, '%s\n', 'AREA,14.40,14.40,14.40,14.40,
14.40,14.40,14.40,14.40,14.40,14.40,14.40,14.40,14.40,
14.40,14.40,14.40,14.40,14.40,14.40,
14.40,14.40,14.40,14.40');
fprintf(fid, '%s\n', 'HEIGH,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0');

fclose(fid);

h=actxserver('WScript.Shell');
h.Run('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\
optiSLang\Verkaufsstaette\cfast7\CEdit.exe');% Cfast
starten
pause(3); %Warten bis Cfast geladen ist
h.AppActivate('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\
optiSLang\Verkaufsstaette\cfast7\CEdit.exe');% brings
cfast to focus
pause(2);
h.SendKeys('^o'); %Datei öffnen, Strg(Ctrl)+o
h.SendKeys('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\
optiSLang\Verkaufsstaette\cfast7\Verkaufsstätte.in~'); %sends
keystrokes
pause(3);
%h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste
h.SendKeys('{TAB}'); %Tabulator
h.SendKeys('{TAB}');
h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste
h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste

```

---

```
pause(5);
h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste
pause(1);
h.SendKeys('{F4}'); %ALT+F4, Programm schließen
pause(2);

%Auslesen der Ergebnisdatei
a = -1;

[matrix] = xlsread('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\
optiSLang\Verkaufsstaette\cfast7\
Verkaufsstaette_zone.csv',1,'D1:D903');

anzahlDaten = size(matrix,1);
for i=1:anzahlDaten
    if (matrix(i) <= 2.50)
        a=i;
        break; %beende Schleife vorzeitig, weil gewünschter
        Wert gefunden
    end
end

if a == -1
    %disp('Keine Übereinstimmung gefunden');
    aset = inf;
else
    a = num2str(a);
    A = 'A';
    zelle = [A a];
    %ausgabe = strxcat('A', a);
    [aset] = xlsread('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\
optiSLang\Verkaufsstaette\cfast7\
Verkaufsstaette_zone.csv',1,zelle);
end
```

```

% Skript zur Zuverlässigkeitsanalyse für OptiSLang –
  % Versammlungsstaette
% Check if MATLAB is called outside optiSLang
if ~exist( 'OSL_REGULAR_EXECUTION' , 'var' )
    clear all;
    close all;
    OSL_REGULAR_EXECUTION = false;
end
% Inputs (define reference variables)
if OSL_REGULAR_EXECUTION == false
v = 1.2; %v = Gehgeschwindigkeit
P = 1.5; %P = Personendichte
td = 60; % td = Detektionszeit
tr = 90; % tr = Reaktionszeit
tg = 300; %tg = Brandentwicklungszeit
qmax = 3500; %qmax = maximale Wärmefreisetzungsrate
end

% Herausziehen der Werte aus .txt-Datei von optiSLang
% benötigte Werte aus Excel-Datei lesen

% Berechnung der Fluchtzeit
[rset] = fluchtzeit(v,P,td,tr);
% Berechnung des Brandentwicklungsfaktors
[alpha] = brandentwicklungsfaktor(tg);
% Berechnung der Brandentwicklungszeit t1
[t1] = brandentwicklungszeit(alpha,qmax);
% Berechnung der einzelnen Zeitpunkte für CFAST
t00=0;
t01=t1/10;
t02=2*t01;
t03=3*t01;
t04=4*t01;
t05=5*t01;
t06=6*t01;
t07=7*t01;
t08=8*t01;
t09=9*t01;

```

---

```
t10=t1 ;
t11=t10 +300;
t12=t11 +30;
t13=t12 +30;
t14=t13 +30;
t15=t14 +30;
t16=t15 +30;
t17=t16 +30;
t18=t17 +30;
t19=t18 +30;
t20=t19 +30;
t21=t20 +30;
t22=t21 +10;
% Berechnung der einzelnen Wärmefreisetzungsraten für CFAST
q00=0;
q01=qmax*10;
q02=4*q01 ;
q03=9*q01 ;
q04=16*q01 ;
q05=25*q01 ;
q06=36*q01 ;
q07=49*q01 ;
q08=64*q01 ;
q09=81*q01 ;
q10=qmax*1000;
q11=qmax*1000;
q12=81*q01 ;
q13=64*q01 ;
q14=49*q01 ;
q15=36*q01 ;
q16=25*q01 ;
q17=16*q01 ;
q18=9*q01 ;
q19=4*q01 ;
q20=q01 ;
q21=0;
q22=0;

% Datei im Schreibmodus öffnen
```

```

fid = fopen( 'C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\optiSLang\
    Versammlungsstaette\cfast7\Versammlungsstaette.in', 'w' );

% Schreiben von Text:
% %s heisst String, \n erzeugt einen Zeilenumbruch
fprintf(fid, '%s\n', 'VERSN,7,Versammlungsstaette');
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Scenario Configuration');
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', 'TIMES,900,1,1,1');
fprintf(fid, '%s\n', 'EAMB,293.15,101325,0');
fprintf(fid, '%s\n', 'TAMB,293.15,101325,0,50');
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Compartments');
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', 'COMPA,Comp 1,40,40,3.8,0,0,0,OFF,OFF,OFF
    ,50,50,50');
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Vents');
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', 'HVENT,1,2,1,9.6,2.5,0,15.2,,1,TIME
    ,,0,1,0,1,0,0');
fprintf(fid, '%s\n', 'HVENT,1,2,2,9.6,2.5,0,15.2,,3,TIME
    ,,0,1,0,1,0,0');
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,1,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,10,10');
;
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,2,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,30,10');
;
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,3,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,30,30');
;
fprintf(fid, '%s\n', 'VVENT,2,1,4,2.142,2,TIME,,0,1,0,1,10,30');
;
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', '!! Fires');
fprintf(fid, '%s\n', '!!');
fprintf(fid, '%s\n', '!! New Fire');
fprintf(fid, '%s\n', 'FIRE,1,20,20,0,1,TIME,0,0,0,0,New Fire');
fprintf(fid, '%s\n', 'CHEMI,1,4,0,0,0,0.35,5E+07');

```

---

```

fprintf(fid , '%s ' , 'TIME, ');
fprintf(fid , '%g, ' , t00 ,t01 ,t02 ,t03 ,t04 ,t05 ,t06 ,t07 ,t08 ,t09 ,t10 ,
    t11 ,t12 ,t13 ,t14 ,t15 ,t16 ,t17 ,t18 ,t19 ,t20 ,t21 ,t22 );
fprintf(fid , '\n ');
fprintf(fid , '%s ' , 'HRR, ');
%g ist Fixkomma-Notation, mehrere Werte werden geschrieben
fprintf(fid , '%g, ' , q00 ,q01 ,q02 ,q03 ,q04 ,q05 ,q06 ,q07 ,q08 ,q09 ,q10 ,
    q11 ,q12 ,q13 ,q14 ,q15 ,q16 ,q17 ,q18 ,q19 ,q20 ,q21 ,q22 );
fprintf(fid , '\n ');
fprintf(fid , '%s\n ' , 'SOOT,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,
    0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,
    0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ');
fprintf(fid , '%s\n ' , 'CO
    ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,
    0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,0.01 ,
    0.01 ,0.01 ');
fprintf(fid , '%s\n ' , 'TRACE
    ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ');
fprintf(fid , '%s\n ' , 'AREA,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,
    15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,15.8 ,
    15.8 ,15.8 ,15.8 ');
fprintf(fid , '%s\n ' , 'HEIGH
    ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ');

fclose(fid );

h=actxserver('WScript.Shell');
h.Run('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\optiSLang\
    Versammlungsstaette\cfast7\CEdit.exe');%Cfast starten
pause(3); %Warten bis Cfast geladen ist
h.AppActivate('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\optiSLang
    \Versammlungsstaette\cfast7\CEdit.exe');%brings cfast to
    focus
pause(2);
h.SendKeys('^o'); %Datei öffnen, Strg(Ctrl)+o
h.SendKeys('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\optiSLang\
    Versammlungsstaette\cfast7\Versammlungsstätte.in~'); %sends

```

```

    keystrokes
pause(3);
%h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste
h.SendKeys('{TAB}'); %Tabulator
h.SendKeys('{TAB}');
h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste
h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste
pause(5);
h.SendKeys('{ENTER}'); %Enter-Taste
pause(1);
h.SendKeys('%{F4}'); %ALT+F4, Programm schließen
pause(2);

%Auslesen der Ergebnisdatei
a = -1;

[matrix] = xlsread('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\
    optiSLang\Versammlungsstaette\cfast7\Versammlungsstaette_zone.
    csv',1,'D1:D903');

anzahlDaten = size(matrix,1);
for i=1:anzahlDaten
    if (matrix(i) <= 2.50)
        a=i;
        break; %beende Schleife vorzeitig, weil gewünschter Wert
            gefunden
    end
end

end

if a == -1
    %disp('Keine Übereinstimmung gefunden');
    aset = inf;
else
    a = num2str(a);
    A = 'A';
    zelle = [A a];
    %ausgabe = strcat('A', a);

```

```
[aset] = xlsread('C:\Users\fgfsim\Desktop\SA_Philipp_Lenz\  
optiSLang\Versamlungsstaette\cfast7\  
Versamlungsstaette_zone.csv',1,zelle);
```

**end**

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, Philipp Lenz, geb. am [REDACTED], die vorliegende Studienarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet zu haben.

Braunschweig, 07.10.2019