



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Bachelor of Engineering (B.E.)

Herr  
**Martin Petermann**

Nachweis einer ausreichend,  
raucharmen Schicht nach  
DIN 18232-2 anhand von  
Brandschutzingenieurmethoden an  
einem fiktiven Gebäudemodell

Hamburg , 2019

Fakultät Life Sciences

# Bachelorarbeit

Nachweis einer ausreichend,  
raucharmen Schicht nach  
DIN 18232-2 anhand von  
Brandschutzingenieurmethoden an  
einem fiktiven Gebäudemodell

Autor:

**Herr Martin Petermann**

Studiengang:

**Rettungsingenieurwesen**

Erstprüfer:

**Herr Prof. Dr. Dipl.-Ing. Bernd Kellner  
(HAW Hamburg)**

Zweitprüfer:

**Herr Dipl.-Ing. Tim Wackermann  
(Ingenieurbüro T. Wackermann GbR)**

Einreichung:

**Hamburg, 25. Oktober 2019**

## Bibliografische Beschreibung:

Petermann, Martin: Thema - Nachweis einer ausreichend, raucharmen Schicht nach DIN 18232-2 anhand von Brandschutzingenieurmethoden an einem fiktiven Gebäudemodell

44 Seiten, 12 Abbildungen, 5 Anhänge, 6 Diagramme

Hamburg, Angewandte Hochschule für Wissenschaften, Fakultät Life Sciences, Bachelorarbeit, 2019

### **Abstract**

Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund einer fiktiven Problemstellung ein beispielhafter Nachweis einer raucharmen Schicht in einer papierverarbeitenden Industriehalle im Brandfall erbracht. Der Nachweis wird dabei mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes geführt.

Hierbei werden zunächst Ingenieurmethoden des Brandschutzes erläutert, Schutzziele konkretisiert und ein maßgebliches Bemessungsszenario erarbeitet. Das Bemessungsszenario wird sich in vier verschiedene Ausführungsvarianten der Rauchableitung unterscheiden, die sich an der Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau sowie an der DIN 18232-2 orientieren.

Die Ausführungsvarianten werden anschließend hinsichtlich der zu erreichenden Schutzziele ausgewertet und miteinander verglichen.

Zum Erbringen des Nachweises einer raucharmen Schicht, erfolgen numerische Entrauchungsberechnungen für die jeweilige Ausführungsvariante.

## Inhaltsverzeichnis

<i>Abbildungsverzeichnis</i> .....	III
<i>Diagrammverzeichnis</i> .....	IV
<i>Abkürzungsverzeichnis</i> .....	V
1 Einleitung .....	1
2 Ingenieurmethoden des Brandschutzes .....	3
2.1 Allgemein .....	3
2.2 Einsatz von Ingenieurmethoden .....	4
2.2.1 Brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken .....	4
2.2.2 Evakuierungsberechnungen .....	5
2.2.3 Entrauchungsberechnungen .....	5
2.3 Akzeptanz von Ingenieurmethoden .....	6
3 Bauordnungsrechtliche Schutzziele .....	9
4 Nachzuweisende Schutzziele .....	11
4.1 Nachweis der Personensicherheit (Rettung von Menschen).....	11
4.2 Nachweis für das Ermöglichen wirksamer Löscharbeiten ..	12
4.3 Das Nachweiskriterium – die Höhe der raucharmen Schicht .....	12
5 Modelauswahl der Entrauchungsberechnung.....	14
6 Das Musterbeispiel .....	16
6.1 Objektbeschreibung.....	16
6.2 Gebäudenutzung.....	16
6.3 Rechtsgrundlagen .....	17
6.4 Abweichende Rettungsweglänge.....	18
7 Berechnungsgrundlagen .....	19
7.1 Rauchabzugsanlagen .....	19
7.1.1 MIndBauRL .....	19
7.1.2 DIN 18232-2.....	19
7.2 Brandlastermittlung.....	22
7.3 Berechnung der Brandverlaufskurve nach VDI 6019-1.....	22
7.3.1 Brandphase 2.....	23

7.3.2	Brandphase 3 und Brandphase 5 .....	24
8	Variantenbeschreibung.....	26
8.1	Variante 1 - MIndBauRL (Abschnitt 5.7.1.1) .....	27
8.2	Variante 2 - MIndBauRL (Abschnitt 5.7.1.1) .....	29
8.3	Variante 3 - MIndBauRL (Abschnitt 5.7.1.3) .....	31
8.4	Variante 4 – DIN 18232-2 .....	33
9	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	36
10	Fazit .....	38
	<i>Literatur</i> .....	39
	<i>Anhänge</i> .....	41
	<i>Eidesstattliche Erklärung</i> .....	44

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Grundriss der Industriehalle.....	16
Abb. 2: Tabelle 2 DIN 18232-2 – Bemessungsgruppen .....	21
Abb. 3: Tabelle 3 DIN 18232-2 – Notwendige Rauchabzugsfläche ...	21
Abb. 4: Ausführung Variante 1.....	27
Abb. 5: Ausführung Variante 2.....	29
Abb. 6: Ausführung Variante 3.....	32
Abb. 7: Ausführung Variante 4.....	34
Abb. 8: Visualisierung Smokeview Variante 1 .....	41
Abb. 9: Visualisierung Smokeview Variante 2 .....	41
Abb. 10: Visualisierung Smokeview Variante 3-1.....	42
Abb. 11: Visualisierung Smokeview Variante 3-2.....	42
Abb. 12: Visualisierung Smokeview Variante 4 .....	43

## Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate .....	25
Diagramm 2: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 1 .....	28
Diagramm 3: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 2 .....	30
Diagramm 4: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 3 .....	33
Diagramm 5: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 4 .....	35
Diagramm 6: Vergleich der Höhe der raucharmen Schicht.....	37

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Aw</b>	aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche
<b>CFAST</b>	Consolidated Model of Fire and Smoke Transport
<b>DIN</b>	Deutsches Institut für Normung
<b>EN</b>	Europäischen Normen
<b>ETK</b>	Einheits-Temperaturzeitkurve
<b>MBO</b>	Musterbauordnung
<b>MIndBauRL</b>	Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau
<b>MVkVO</b>	Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten
<b>MVStätt</b>	Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten
<b>NIST</b>	National Institute of Standards and Technology
<b>RWA</b>	Rauch- und Wärmeabzugsanlage
<b>VDI</b>	Verein Deutscher Ingenieure
<b>VDMA</b>	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
<b>vfdb</b>	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes



## 1 Einleitung

Der Brandschutz gewinnt in der Gebäudeplanung zunehmend an Bedeutung, somit sind inzwischen Brandschutznachweise und -konzepte ein wichtiger Bestandteil des Bauantrags.

Die Einhaltung der Anforderungen des baulichen Brandschutzes, die Schutzziele und baulichen Anforderungen an Gebäude, werden seitens der Bundesländer in der jeweiligen Landesbauordnung geregelt. Hier werden in Bezug auf den Brandschutz qualitative Schutzziele vorgegeben, die es mit Hilfe von definierten materiellen Vorschriften zu erfüllen gilt [1].

Für Anlagen und Räume besonderer Art und Nutzung, welche in § 2 (4) MBO geregelt sind, können darüber hinaus weitere Anforderungen oder auch Erleichterungen gestellt werden. Die sogenannten Sonderbauten nach § 2 (4) MBO unterteilen sich in geregelte und ungeregelte Bauten. Für geregelte Sonderbauten existieren Sonderbauverordnungen in denen die Anforderungen und Erleichterungen definiert sind. Die Anforderungen der ungeregelten Sonderbauten, für die es keine Sonderbauverordnung gibt, werden individuell für das jeweilige Bauvorhaben mit einem Brandschutzkonzept oder Brandschutznachweis festgelegt [2][3][4].

Durch moderne und anspruchsvolle Architektur werden Abweichungen von den deskriptiven Vorschriften immer häufiger. Auch durch Nutzungsänderungen bestehender Gebäude können heutige materielle Vorgaben häufig nicht eingehalten werden.

Diese Gebäude können oftmals nicht mehr mit Hilfe von deskriptiven bauordnungsrechtlichen Vorgaben geplant und realisiert werden. Der Gesetzgeber schafft für diese Fälle mit einem Abweichungsantrag die Möglichkeit die Vorgaben der entsprechenden Landesbauordnung zu lockern. Hierbei muss das zu erreichende Schutzziel anderweitig gewährleistet werden [5].

Neben der Möglichkeit materielle Anforderungen mit Anlagetechnik zu kompensieren, kann das Sicherheitsniveau durch einen Nachweis mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes eingehalten werden [6].

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird eine fiktive Industriehalle betrachtet, welche aufgrund einer Überschreitung der Rettungsweglänge den Anforderungen der MIndBauRL nicht genügt.

Demnach soll das Sicherheitsniveau mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes untersucht werden, um gegebenenfalls Kompensationsmaßnahmen, welche mit einem wirtschaftlichen Mehraufwand verbunden sind, zu vermeiden.

Hierbei wird sich die Industriehalle in verschiedenen Ausführungen der Rauchableitung nach MIndBauRL sowie nach DIN 18232-2 unterscheiden. Die Ausführungen werden im Anschluss hinsichtlich der zu erreichenden Schutzziele ausgewertet und miteinander verglichen.

Um das Sicherheitsniveau einzuhalten, soll hierzu eine ausreichend raucharme Schicht für die Personenrettung und für die Durchführung von wirksamen Löscharbeiten sichergestellt werden, um eine beispielhafte Überschreitung der Rettungsweglänge zu vertreten.

Der Nachweis einer raucharmen Schicht soll mittels numerischer Entrauchungsberechnung mit dem Programm CFAST nachgewiesen werden.

## 2 Ingenieurmethoden des Brandschutzes

### 2.1 Allgemein

In heutigen Brandschutzkonzepten gehören Nachweise durch Ingenieurmethoden des Brandschutzes immer mehr dazu, insbesondere dann, wenn Sonderbauten und bauliche Anlagen von präskriptiven Bauvorschriften abweichen.

Für die Bewertung des notwendigen Sicherheitsniveaus und zur Bemessung und Berechnung von notwendigen Schutzmaßnahmen sind Ingenieurmethoden ein Ansatz auf dem Gebiet des Brandschutzes. Sie tragen dazu bei, risikogerecht und wirtschaftlich zu planen sowie zu bewerten.

Unbestritten ist, dass heutige Brandschutzkonzepte für immer komplexer werdende Bauwerke mit der Umsetzung der deskriptiven Vorschriften nur noch bedingt vereinbar sind [7].

Diese Arbeit soll aufzeigen wie eine beispielhafte Abweichung der Rettungsweglänge durch Methoden des Brandschutzingenieurwesens untersucht werden kann, um die jeweiligen Schutzziele auf diese Art und Weise zu erreichen bzw. nachzuweisen.

Die Grundlage für die Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden leitet sich aus § 3 (1) und § 67 (1) der Musterbauordnung, in der Fassung von November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss vom 22.02.2019, ab:

#### *„§3 Allgemeine Anforderungen*

*(1) Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden; dabei sind die Grundanforderungen an Bauwerke gemäß Anhang I der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 zu berücksichtigen. Dies gilt auch für die Beseitigung von Anlagen und bei der Änderung ihrer Nutzung.“*

#### *„§ 67 Abweichungen*

*(1) Die Bauaufsichtsbehörde kann Abweichungen von Anforderungen dieses Gesetzes und aufgrund dieses Gesetzes erlassener Vorschriften zulassen, wenn sie unter Berücksichtigung des Zwecks der jeweiligen Anforderung und unter Würdigung der öffentlich-rechtlich geschützten nachbarlichen Belange mit den*

*öffentlichen Belangen, insbesondere den Anforderungen des § 3 Absatz 1 vereinbar ist.“ [4].*

Hieraus ergibt sich, dass Abweichungen von den deskriptiven Vorschriften eine zusätzliche Genehmigung der Bauaufsichtsbehörde benötigen. Dies gilt auch, wenn mit Hilfe von Brandschutzingenieurmethoden ein gleichwertiges Sicherheitsniveau bzw. die Erfüllung der bauordnungsrechtlichen Schutzziele nachgewiesen wird.

Hierzu werden die bauordnungsrechtlichen Schutzziele im Kapitel 3 näher spezifiziert. Nachfolgend werden zunächst die wesentlichen Hauptanwendungsbereiche der Ingenieurmethoden des Brandschutzes erläutert.

## **2.2 Einsatz von Ingenieurmethoden**

Brandschutzingenieurmethoden lassen sich anhand des Anwendungsbereiches und des Berechnungsverfahrens differenzieren. Es wird zwischen expliziten (analytischen) Methoden wie Handrechenverfahren, rechnerische Nachweise und den physikalischen sowie numerischen Methoden (Computersimulationen) unterschieden [5].

### **2.2.1 Brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken**

Die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine Bemessung mit rechnerischen Verfahren, auch allgemeine Rechenverfahren genannt, findet im baulichen Brandschutz einen immer größer werdenden Anwendungsbereich. Als Gründe dafür lassen sich wirtschaftlichere Konstruktionen durch schlankere Neubauten sowie das Ersparen von Ertüchtigungsmaßnahmen im Bestandsbau anführen.

Ein rechnerisches Verfahren hierzu ist beispielsweise die Heißbemessung. Mit dieser Simulationsmethode kann untersucht werden, wie lange ein belastetes Bauteil einer Brandbeanspruchung standhält. Die Dauer bis zum rechnerischen Versagen des Bauteils wird als Feuerwiderstandsdauer bezeichnet und bezieht sich auf die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK).

Für die Simulation eines Brandes werden numerische Simulationen genutzt, wodurch man durch eine thermische Analyse die Temperaturbelastung des

Bauteils ermittelt und anschließend durch eine mechanische Analyse überprüft, ob das jeweilige Bauteil der auftretenden Belastung standhält.

Die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Tragwerken kann aber auch durch einfache Handrechenverfahren oder Tabellenverfahren erfolgen [8].

### **2.2.2 Evakuierungsberechnungen**

Eine Evakuierungsberechnung kann, wie auch die brandschutztechnische Bemessung, auf unterschiedliche Weise erfolgen und wird grundlegend für den Nachweis einer rechtzeitigen Entfluchtung erbracht.

Grundsätzlich erfolgt die Ausführung von Rettungswegen in Gebäuden durch die Vorschriften des Baurechts wie beispielsweise der MVStätt oder der MVkVO.

Wenn Gebäude neben der eigentlichen Nutzung für Veranstaltungen mit hoher Besucherzahl genutzt werden - beispielsweise Bahnhöfe, Flughäfen oder Einkaufszentren -, sind Evakuierungsberechnungen unabdingbar.

Zudem finden Evakuierungsberechnungen auch Schwachstellen in der Gebäudestruktur, weshalb sich Rettungswegbreiten gegenüber den deskriptiven Vorschriften verringern lassen können. Es kann aber auch dazu führen, dass diese sich gegenüber den Vorschriften vergrößern [9].

Grundlegend wird zwischen den hydraulischen Modellen sowie den Individualmodellen unterschieden. Hierbei wird beim hydraulischen Modell, welche auch Personenstromanalyse genannt wird, nicht jede Person einzeln betrachtet, sondern ein Personenstrom der sich wie ein Fluid mithilfe von Methoden der Strömungsmechanik abbildet. Beim Individualmodell wird das Verhalten jeder einzelnen fiktiven Person berechnet.

Die Evakuierungsberechnung lässt sich je nach Komplexität auch mit einfachen Handrechenverfahren durchführen [10].

### **2.2.3 Entrauchungsberechnungen**

Eine Entrauchungsberechnung, welche in dieser Arbeit Anwendung findet, beruht auf mathematisch-physikalischen Modellen.

Je nach Brandszenarium oder angestrebtem Schutzziel kommen unterschiedliche Brandmodelle zum Einsatz, welche sich auf Grund des mathematischen, physikalischen und numerischen Verfahrens in Zonen- und Feldmodelle unterscheiden lassen.

Die Grundlage der Zonenmodelle bildet die Ausbildung von zwei Gasschichten während des Brandes. Einer wärmeren Rauchgasschicht sowie einer darunterliegenden kälteren Luftschicht. Die Gase innerhalb der jeweiligen Zone ruhen. Außer dem Plume-Massenstrom findet kein Massenaustausch statt. Die Zonenmodelle unterteilen sich wiederum in Mehrzonenmodelle und Mehrraum-Zonenmodelle. Bei Mehrraum-Zonenmodellen ist es im Gegensatz zu den Mehrzonenmodellen möglich den Massen- und Energieaustausch über mehrere Räume hinweg zu berechnen.

Feldmodelle nutzen die physikalischen Prinzipien der Energie-, Massen- und Impulserhaltung, wobei das Geometriemodell des Gebäudes in viele miteinander vernetzte Zellen unterteilt wird. Physikalische Größen wie Temperatur, Druck, Dichte und Rauchgaskonzentration lassen sich als Funktion von Ort und Zeit genau ermitteln [10][11].

Durch die Anwendung dieser Simulationsrechnungen können Aussagen über die Verrauchung von Rettungs- und Angriffswegen getroffen werden. Zudem lassen sich brandschutztechnische Einrichtungen wie Rauchabzüge oder Anlagen für maschinelle Entrauchungen dimensionieren und optimieren [11].

### **2.3 Akzeptanz von Ingenieurmethoden**

Das Sicherheitsniveau und somit die Schutzziele durch einen Nachweis mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes zu belegen, wird in Deutschland derzeit kritisch beurteilt. In anderen Ländern sind Ingenieurmethoden hingegen die Regel für die Sicherstellung der brandschutztechnischen Schutzziele.

Im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens ist in Deutschland eine strukturierte und plausible Nachweisführung mit Hilfe von Richtlinien und Leitlinien erforderlich.

Die Anwendung von Ingenieurmethoden kann nur durch eine genehmigte Abweichung, aber nicht als gleichwertige Lösung herangezogen werden. Somit entscheidet die Behörde bzw. der jeweilige Prüfer, ob der geführte Nachweis das entsprechende Schutzziel erreicht oder nicht. Eine solche Entscheidung ist

immer eine Frage der Akzeptanz des Prüfers und wird derzeit nur als Sonderlösung genehmigt.

Ein Grund dafür ist der fehlende Wissensstand vieler Fachplaner, Prüfer und Behördenmitarbeiter. Denn für das Erstellen ingenieurgemäßer Nachweise sind genaue Kenntnisse der Numerik und Strömungsmechanik erforderlich. Die Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden kann nur mit einem entsprechenden Wissensstand erfolgen. Prüfer zeigen wenig Akzeptanz, wenn sie das jeweilige Verfahren nicht grundlegend verstehen. Zudem lassen sich Manipulationen und Scheinlösungen bei einem fehlenden Wissensstand nicht finden [5].

In mehreren Normen, technischen Regeln und Richtlinien wurden in den letzten Jahren einzelne Aspekte der Ingenieurmethoden für die Erstellung von leistungsorientierten Brandschutzkonzepten betrachtet und deren Anwendung beschrieben. Durch die Veröffentlichung des vfdb-Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ im Jahr 2006, hat die Anwendung von Ingenieurmethoden eine erhöhte Akzeptanz der Genehmigungsbehörden erfahren [12]. Die bisherige Entwicklung zeigt der derzeitige Leitfaden in der dritten Auflage [10].

Diese Leitfäden dienen aber lediglich der Orientierung. Die Herausforderung ist hierbei, dass Schutzziele allein meist nur durch die materiellen Anforderungen beschrieben sind. Ein Nachweis mit Brandschutzingenieurmethoden dagegen erfordert die Übersetzung von qualitativen Schutzzielen in quantitative Leistungskriterien.

Ein wichtiger Schritt für die Anwendung von Ingenieurmethoden und Nachvollziehbarkeit der Nachweise ist die Norm „DIN 18009-1 Brandschutzingenieurwesen – Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung“ [13]. Diese Norm wurde im September 2016 veröffentlicht und stellt allgemeine Informationen über den Stand der Anwendung des Brandschutzingenieurwesens zur Verfügung. Gleichzeitig dient sie der Vereinheitlichung der Anwendung von Methoden und Verfahren.

Sie beschreibt Grundsätze für die Anwendung von Methoden und Verfahren des Brandschutzingenieurwesens. Diese umfassen unter anderem die Bemessung von Maßnahmen des Brandschutzes, um die bauordnungsrechtlichen Schutzziele zu erfüllen.

Diese Norm ist ein wichtiger Schritt zur Beseitigung der Probleme im Rahmen von Brandschutzkonzepten und Brandschutznachweisen - seitens der

Ingenieure mit der Anwendung als auch seitens der Bauaufsicht mit der Akzeptanz sowie der Nachvollziehbarkeit der Nachweise [7].



### 3 Bauordnungsrechtliche Schutzziele

Mit Gesetzen, Vorschriften und Richtlinien sollen gesellschaftlich vereinbarte Schutzziele zum Brandschutz erreicht werden, wobei jeder Benutzer einer baulichen Anlage einen Anspruch darauf hat [14].

Die Brandschutzanforderungen der Bauordnungen basieren grundsätzlich auf vier Schutzziele. Diese müssen bei einem Abweichen von Brandschutzanforderungen der MBO bzw. der Landesbauordnungen, wie es in unserem Fall eine beispielhafte Überschreitung der Rettungsweglänge ist, anderweitig sichergestellt werden [15].

Die bauordnungsrechtlichen Schutzziele werden unter § 14 MBO definiert:

#### *„§ 14 Brandschutz*

*Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“ [4].*

Die aus § 14 MBO hervorgehenden vier Schutzziele, welche in allen Bundesländern vereinheitlicht sind, werden nun nachfolgend erläutert.

#### Entstehung eines Brandes vorbeugen

Um einem Brand vorzubeugen, gibt es Anforderungen an die Brennbarkeit der Baustoffe. Sie dienen dazu, dass eine Brandentstehung unmittelbar am Brandherd verhindert oder mindestens behindert wird. Zudem führen auch Brandschutzanforderungen an Feuerungsanlagen sowie die Forderung nach Blitzschutzanlagen dazu, dass der Entstehung eines Brandes vorgebeugt wird [16].

#### Ausbreitung eines Brandes vorbeugen

Der Brandausbreitung wird durch die Einteilung der Gebäude in Brandabschnitte sowie durch raumabschließende Bauteile vorgebeugt. Die

Bauteile besitzen je nach brandschutztechnischer Anforderung einen Widerstand gegen Feuer sowie ggf. zusätzlich gegen Rauch. Zu raumabschließenden Bauteilen zählen unter anderem Wände, Decken und Türen [17].

#### Rettung von Menschen und Tieren ermöglichen

Dieses Schutzziel soll die Eigenrettung erleichtern und wird durch Rettungs- und Fluchtwege innerhalb sowie außerhalb des Gebäudes, als auch durch die Beleuchtung und Kennzeichnung von Rettungswegen umgesetzt [17].

#### Wirksame Löscharbeiten ermöglichen

Um wirksame Löscharbeiten zu ermöglichen, können Maßnahmen zur Rauchfreihaltung oder Entrauchung erforderlich sein, aber auch fest installierte Leitungen für die Löschwasserversorgung vorgesehen werden [17].

## 4 Nachzuweisende Schutzziele

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine fiktive Industriehalle betrachtet, welche eine Rettungswegüberschreitung und somit Abweichung der nach MIndBauRL geforderten Anforderungen aufweist.

Aufgrund dieser Abweichung müssen die nach § 14 MBO geforderten Schutzziele anderweitig erreicht werden. Hierzu soll eine raucharme Schicht nachgewiesen werden, um die Personenrettung sowie das Ermöglichen von wirksamen Löscharbeiten sicherzustellen.

Zunächst sollen die zu betrachtenden Schutzziele genauer betrachtet werden.

### 4.1 Nachweis der Personensicherheit (Rettung von Menschen)

Um einen Nachweis der Personensicherheit zu erbringen, müssen die Rettungswege ausreichend lange über den zu erwartenden Entfluchtungszeitraum benutzbar bleiben.

Das Schutzziel wird grundsätzlich gemäß MBO durch das Ausbilden von notwendigen Treppen, notwendigen Fluren und einzuhaltenden Rettungsweglängen erreicht. Aber auch durch die Entrauchung von Treppen- und Kellerräumen sowie Fahrschächten von Aufzügen umgesetzt.

Für einen Sonderbau sind weitere Regelungen zu beachten. Hier können aufgrund der Nutzung Erleichterungen möglich sein, hier wäre unter anderem eine Verlängerung der Rettungsweglänge gemäß MIndBauRL zu nennen. Es können aber auch zusätzliche Anforderungen wie eine Löschanlage gefordert werden.

Um einen Nachweis der Personensicherheit mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes zu erbringen, stehen mehrere Kriterien zur Verfügung.

Als Nachweiskriterium für die Personensicherheit kann die Höhe der raucharmen Schicht, die Qualität der raucharmen Schicht sowie die thermischen Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion ermittelt werden.

Das einfachste und nachvollziehbarste Nachweiskriterium für die Personensicherheit und somit Selbstrettung ist die Höhe der raucharmen Schicht [10].

## **4.2 Nachweis für das Ermöglichen wirksamer Löscharbeiten**

Um den Nachweis für das Ermöglichen wirksamer Löscharbeiten zu erbringen, sollte in der Industriehalle ab Beginn des Löscheinsatzes eine ausreichend hohe raucharme Schicht zur Verfügung stehen.

Diese raucharme Schicht ist nötig, um eine ausreichende Sicht der Einsatzkräfte der Feuerwehr und damit die Durchführung von wirksamen Löscharbeiten zu gewährleisten [10].

Grundsätzlich wird das Schutzziel gemäß MBO durch das Ausbilden von Brandabschnitten, einzuhaltenden Rettungsweglängen, das unbehinderte Nutzen der Rettungswege als Angriffswege sowie ggf. durch das Vorhandensein von Löschanlagen eingehalten.

## **4.3 Das Nachweiskriterium – die Höhe der raucharmen Schicht**

Eine ausreichend hohe raucharme Schicht soll in dem hier betrachteten Fallbeispiel als Nachweiskriterium der zu erreichenden Schutzziele herangezogen werden und dient der Kompensation der Rettungswegüberschreitung.

Eine Rauchsicht bildet sich im Brandfall meist sehr schnell und oft auch in sehr großen Mengen aus. Sie enthält eine Vielzahl hochgiftiger Gase und Substanzen. Kommt es nicht zu einer Ausbildung einer raucharmen Schicht, reichen wenige Atemzüge im Brandrauch um das Bewusstsein zu verlieren, nur kurze Zeit später drohen irreversible Schäden bis hin zum Tod. Neben der Rauchsicht ist die Temperatur der Rauchsicht nicht unerheblich und kann lebensgefährliche Verbrennungen verursachen. Zudem verursacht der Brandrauch erhebliche Sachschäden. Die Rauchsicht stellt somit die größte Gefahr für die Selbst- und Fremdreueung dar und be- oder verhindert oft den schnellen und gezielten Löschanriff.

Die Höhe der raucharmen Schicht bzw. der Rauchsicht ist ein zentraler Ausgabeparameter von Zonenmodellen, wobei hier keine Einflüsse von Raumströmungen berücksichtigt werden können wie in Feldmodellen. Die Höhe der raucharmen Schicht ist im Allgemeinen ein sehr vereinfachtes Kriterium für die Personensicherheit, welches allein auf physikalischen Phänomenen und nicht auf Betrachtungen von Schadenseinwirkungen basiert [18].

Für die Höhe der raucharmen Schicht soll die Norm „DIN 18232-2 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen“ Anwendung finden [19].

Gemäß DIN 18232-2 ist die Höhe der raucharmen Schicht als Abstand zwischen der jeweils anzusetzenden Oberfläche des Fußbodens eines Raumes bis zur Rauchgasschichtunterseite definiert.

Hierfür ist eine Höhe der raucharmen Schicht von 2,50 m anzustreben und stellt im hiesigen Beispiel die Mindesthöhe für das Erreichen der nachzuweisenden Schutzziele dar.

## 5 Modelauswahl der Entrauchungsberechnung

Die Ermittlung der Verfügbarkeit einer ausreichend raucharmen Schicht in dem notwendigen Zeitraum soll mittels numerischen Entrauchungssimulationen unter Anbetracht der festgelegten Schutzziele erfolgen.

Bei der Bemessung anlagentechnischer Maßnahmen zur Rauchabführung aus einem Gebäude im Brandfall, wie die Sicherstellung der Rauchfreihaltung von Rettungswegen, werden häufig Zonenmodelle eingesetzt.

Das Zonenmodell unterteilt einen Raum in eine obenliegende heiße Rauchsicht und eine darunterliegende kalte raucharme Schicht. Der Austausch zwischen den Schichten erfolgt mittels des aufsteigenden Plumes. Es wird jeweils für eine Schicht eine homogene Temperatur und Luftzusammensetzung angenommen.

Nach dieser Modellvorstellung sammelt sich in weitgehender Näherung der realen Verhältnisse in der oberen Zone aufgrund des hydrostatischen Auftriebs der bei der Verbrennung erzeugte Brandrauch, in der unteren Zone befindet sich, mit Ausnahme des Brandbereichs, eine kalte Luftschicht, auf dem der spezifisch leichtere Brandrauch „schwimmt“. Die Temperatur wird in der jeweiligen Zone als konstant angenommen.

Das im Zuge dieses Nachweises verwendete Zonenmodell ist jedoch gegenüber einem Feldmodell nicht in der Lage, Einströmungen in die raucharme Schicht zu berechnen und darzustellen.

Auf Höhe der hier festgelegten Grenze von 2,50 m, zwischen raucharmer Schicht und der Rauchgasschicht, werden mit Hilfe von Feldmodellen neben der Temperatur, die optische Dichte, über die auch auf eine mögliche Ansammlung von toxischen Substanzen geschlossen werden kann, ermittelt und ausgewertet [10].

Da im Zuge dieses Nachweises nicht die Qualität der raucharmen Schicht beurteilt wird, sondern die Höhe, kann im Fallbeispiel auf ein Feldmodell verzichtet werden.

Die Modellierung der Brandausbreitung mit dem hier angestrebten Nachweis erfolgt mit dem Programm CFAST Version 7.4.2 des National Institute of Standards and Technology (NIST) of the United States Department of Commerce.

Die Visualisierung, der von CFAST ausgegebenen Daten, erfolgt mit dem Programm Smokeview Version 6.7.9, einem ebenso vom NIST entwickelten Programm.

### Zum Plume Modell

Die Auswahl des Plume Modells ist ein wichtiger Parameter zur Modellierung des Brandes. Als Plume wird die Rauchgassäule bezeichnet, die bei einem Brand kegelförmig aufsteigt, während sie aus der Umgebung immer mehr Luft mitführt und sich dadurch vergrößert.

Es gibt verschiedene Modelle, die sich nach Lage des Brandherds, der geometrischen Abmessung, der Struktur des Brandherds oder der Rauchgasquelle unterscheiden. Grundsätzlich wird zwischen einem Plume mit sowie ohne Ausbildung einer Heißgasschicht unterschieden.

CFAST nutzt ausschließlich das Modell nach McCaffrey. Dieses unterteilt den Plume in drei Bereiche. Die ständige Flamme als erstes Drittel der Zentralachse der Flamme, darüber die intermittierende Flamme, die „flackert“ und über der eigentlichen Flamme den Auftriebsplume [10].

Die Anwendung des Modells erfolgt unter Einhaltung und Beachtung der im Guide „CFAST User’s Guide, Volume 2, Mai 2019“ angegebenen Sachverhalte und Benutzungshinweise [20].

## 6 Das Musterbeispiel

### 6.1 Objektbeschreibung

Bei der fiktiven Industriehalle handelt es sich um den Neubau einer Produktions- und Lagerhalle. Das Gebäude ist rechteckig mit den Außenabmessungen von 25,0 m x 80,0 m und hat eine Grundfläche von 2.000 m<sup>2</sup> (siehe Abb. 1). Es handelt sich um eine erdgeschossige Halle ohne Ebenen oder Einbauten mit einer Höhe von ca. 8,0 m.

Das Tragwerk des Gebäudes wird in Stahlbauweise errichtet. Die Wände sind außen mit Porenbetonplatten verkleidet. Die Dachkonstruktion besteht aus Stahlbindern mit aufgelegten Porenbetonplatten.

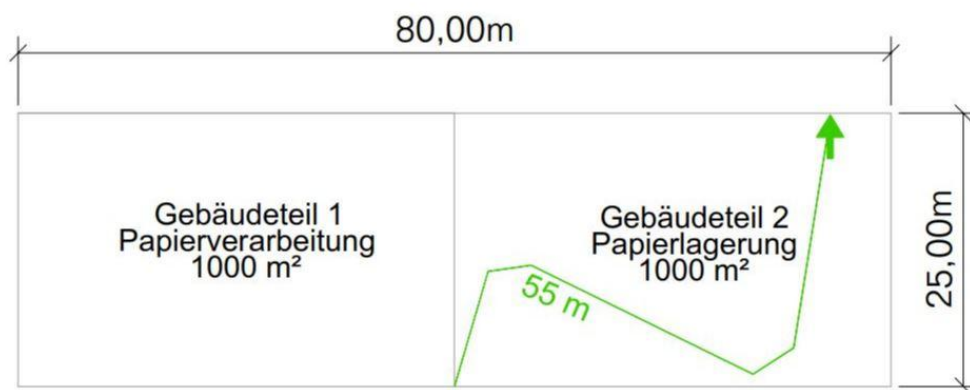


Abb. 1: Grundriss der Industriehalle

### 6.2 Gebäudenutzung

Der Gebäudeteil 1 der Industriehalle soll für die Papierverarbeitung genutzt werden. Die Papierlagerung befindet sich im Gebäudeteil 2 der Industriehalle. Die Lagerguthöhe beträgt 2,00 m.

Durch die Nutzung der Industriehalle zur Papierverarbeitung und -lagerung ist das brandschutztechnische Risiko als hoch einzustufen.



## 6.3 Rechtsgrundlagen

### Einstufung des Gebäudes

Das Gebäude wird gemäß § 3 (2) MBO als Gebäude der Gebäudeklasse 3 eingestuft, da der Fußboden  $\leq 7,0$  m und die Nutzungseinheit eine Fläche von mehr als 400 m<sup>2</sup> aufweist.

### Sonderbau

Es handelt sich um eine bauliche Anlage besonderer Art und Nutzung (Sonderbau). Im Einzelfall können gemäß § 51 MBO besondere Anforderungen gestellt werden, jedoch auch Erleichterungen gestattet werden.

### Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (MIndBauRL)

Der Geltungsbereich der MIndBauRL, Juli 2014, wird im Abschnitt 3 der Richtlinie festgelegt:

#### *„3 Begriffe*

##### *3.1 Industriebauten*

*Industriebauten sind Gebäude oder Gebäudeteile im Bereich der Industrie und des Gewerbes, die der Produktion (Herstellung, Behandlung, Verwertung, Verteilung) oder Lagerung von Produkten oder Gütern dienen.“ [21].*

Die Industriehalle wird als Produktions- und Lagerhalle genutzt und fällt somit in den Geltungsbereich der MIndBauRL.

Zudem regelt die Richtlinie insbesondere die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile, die Brennbarkeit der Baustoffe, die Größe der Brandabschnitte bzw. der Brandbekämpfungsabschnitte sowie die Anordnung, Lage und Länge der Rettungswege.

Die Industriehalle erhält keine besonderen Maßnahmen für die Brandmeldung und Brandbekämpfung, somit wird die Halle gemäß Abschnitt 3.12 MIndBauRL in die Sicherheitskategorie K 1 eingeordnet.

Hierdurch beträgt die zulässige Brandabschnittsfläche aufgrund feuerhemmender Umfassungsbauteile 3.000 m<sup>2</sup>. Die Brandabschnittsfläche unterschreitet die zulässige Brandabschnittsfläche von 3.000 m<sup>2</sup> gemäß Abschnitt 6 MIndBauRL.

#### **6.4 Abweichende Rettungsweglänge**

Die zulässige Rettungsweglänge wird gemäß MIndBauRL im Abschnitt 5.6.5 festgelegt:

*„5.6.5 Von jeder Stelle eines Produktions- oder Lagerraumes muss mindestens ein Ausgang ins Freie, ein Zugang zu einem notwendigen Treppenraum, zu einer Außentreppe, zu einem offenen Gang oder zu einem begehbaren Dach, ein anderer Brandabschnitt oder ein anderer Brandbekämpfungsabschnitt*

- *bei einer mittleren lichten Höhe von bis zu 5 m in höchstens 35 m Entfernung*
- *bei einer mittleren lichten Höhe von mindestens 10 m in höchstens 50 m Entfernung erreichbar sein.“ [21].*

Bei lichten Höhen zwischen diesen Werten darf linear interpoliert werden. Die lichte Höhe der Industriehalle beträgt 8,0 m. Der Interpolationswert und die somit zulässige Rettungsweglänge beträgt 44,0 m.

Die vorhandene Rettungsweglänge in der von uns betrachteten Industriehalle beträgt 55,0 m und überschreitet die zulässige Rettungsweglänge um 11,0 m (siehe Abb. 1).

Diese Abweichung von der nach MIndBauRL geforderten Rettungsweglänge ist nicht genehmigungsfähig. Die nach § 14 MBO geforderten Schutzziele müssen somit anderweitig erreicht werden. In unserem Fall soll hierzu der Nachweis einer raucharmen Schicht von 2,50 m durch eine Entrauchungssimulation nachgewiesen werden.

## 7 Berechnungsgrundlagen

### 7.1 Rauchabzugsanlagen

#### 7.1.1 MIndBauRL

Für Produktions- oder Lagerräume mit einer Größe von mehr als 200 m<sup>2</sup> ist gemäß Abschnitt 5.7.1.1 MIndBauRL eine ausreichende Rauchableitung ins Freie zu ermöglichen.

Eine ausreichende Rauchableitung ist sichergestellt, wenn die Öffnungsfläche im Dach oder im oberen Raumdrittel je 400 m<sup>2</sup> der Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät mit einer aerodynamisch wirksamen Fläche von 1,5 m<sup>2</sup> besitzt.

Im Gegensatz dazu können gemäß Abschnitt 5.7.1.3 MIndBauRL maschinelle Entrauchungsanlagen die Anforderungen erfüllen, wenn je 400 m<sup>2</sup> Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät oder eine Absaugstelle mit einem Luftvolumenstrom von 10.000 m<sup>3</sup>/h im oberen Raumdrittel angeordnet wird. Bei Räumen mit mehr als 1.600 m<sup>2</sup> Grundfläche genügt zu dem Luftvolumenstrom von 40.000 m<sup>3</sup>/h für die Grundfläche von 1.600 m<sup>2</sup> ein zusätzlicher Luftvolumenstrom von 5.000 m<sup>3</sup>/h je angefangene weitere 400 m<sup>2</sup> Grundfläche.

#### Zuluftflächen

Die Zuluftflächen nach Abschnitt 5.7.1.1 MIndBauRL müssen im unteren Raumdrittel von insgesamt mindestens 12 m<sup>2</sup> freiem Querschnitt vorhanden sein.

Nach Abschnitt 5.7.1.3 MIndBauRL müssen die Zuluftflächen im unteren Raumdrittel in solcher Größe und so angeordnet werden, dass eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s nicht überschritten wird.

#### 7.1.2 DIN 18232-2

Die Bemessung der Rauchableitung im Gebäude erfolgt alternativ zur MIndBauRL nach DIN 18232-2. Diese Norm umfasst Tabellen und Berechnungsverfahren zur Dimensionierung von raucharmen Schichten, um Anforderungen der unterschiedlichen Schutzziele gerecht zu werden.

Die Bemessung nach DIN 18232-2 setzt voraus, dass Rauchabschnittsflächen von maximal 1.600 m<sup>2</sup> geschaffen werden.

Die Rauchabschnittsfläche der Halle beträgt 2.000 m<sup>2</sup>. Die zulässige Rauchabschnittsfläche von 1.600 m<sup>2</sup> wird überschritten. Gemäß Abschnitt 6.2 DIN 18232-2 darf die Rauchabschnittsfläche auf maximal 2.600 m<sup>2</sup> erhöht werden, wenn die Rauchabzugsfläche nach Tabelle 3 DIN 18232-2 um 10 % je angefangene 100 m<sup>2</sup> erhöht wird.

### Brandentwicklungsdauer

Die nach DIN 18232-2 anzusetzende Brandentwicklungsdauer (Zeitspanne von Brandentstehung bis zur Brandbekämpfung) setzt sich wie folgt zusammen:

- Zeit von der Brandentstehung bis zur Brandmeldung: 10 min, keine automatischen Brandmelder nach der Norm „DIN EN 54-7 Brandmeldeanlagen - Teil 7: Rauchmelder“, die auf die Brandkenngroße Rauch ansprechen [22],
- Zeit von der Brandmeldung bis zum Beginn der Brandbekämpfung: 10 min, keine Werkfeuerwehr vorhanden.

Dadurch ergibt sich eine Brandentwicklungsdauer von insgesamt 20 min. Es wird aufgrund der Brandlast (vgl. 7.2) eine „mittlere“ Brandausbreitungsgeschwindigkeit angenommen. Somit ist gemäß Tabelle 2 der DIN 18232-2 die Bemessungsgruppe 5 für die Bemessung der Rauchableitungsflächen anzusetzen (siehe Abb. 2).

Tabelle 2 — Bemessungsgruppen

Anzusetzende Brandentwicklungsdauer (siehe 5.6)	Bemessungsgruppe bei einer Brandausbreitungsgeschwindigkeit		
	besonders gering	mittel <sup>a</sup>	besonders groß
min			
≤ 5	1	2	3
≤ 10	2	3	4
≤ 15	3	4	5
≤ 20 <sup>a</sup>	4	5 <sup>a</sup>	5 <sup>b</sup>
> 20	5	5 <sup>b</sup>	5 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Durchschnittswerte ohne besonderen Nachweis; bei der Verwendung dieser Durchschnittswerte ergibt sich hierbei die Bemessungsgruppe 5 (fett dargestellt).

<sup>b</sup> In diesen Fällen sind die Schutzziele dieser Norm allein durch NRA nicht erreichbar. Es sind weitere Maßnahmen zur Erreichung der Schutzziele erforderlich.

Abb. 2: Tabelle 2 DIN 18232-2 – Bemessungsgruppen

Die erforderliche Rauchabzugsfläche wird gemäß Tabelle 3 DIN 18232-2 bemessen (siehe Abb. 3). Demnach ist eine notwendige Rauchabzugsfläche von 4,6 m<sup>2</sup> erforderlich. Aufgrund der Überschreitung der maximal zulässigen Rauchabschnittsfläche um 400 m<sup>2</sup> erhöht sich die Rauchabzugsfläche um 40 %, somit beträgt diese 6,44 m<sup>2</sup>.

Tabelle 3 (fortgesetzt)

Raumhöhe <sup>a</sup>	Höhe der Rauchsicht <i>z</i> in m	Höhe der raucharmen Schicht <i>d</i> in m	Notwendige Rauchabzugsfläche <i>A<sub>w</sub></i> in m <sup>2</sup>				
			Bemessungsgruppe				
<i>h</i> in m			1	2	3	4	5
8,0	5,5	2,5	1,5	1,9	2,5	3,3	4,6
	5,0	3,0	2,1	2,8	3,6	4,8	6,5
	4,5	3,5	2,8	3,9	5,0	6,6	8,8
	4,0	4,0	3,6	5,2	6,9	8,9	11,7
	3,5	4,5	4,4	6,5	9,3	11,8	15,4
	3,0	5,0	5,4	8,1	11,9	15,7	20,2
	2,5	5,5	6,5	9,9	14,8	20,7	26,5
	2,0	6,0	8,4	12,2	18,6	27,2	34,9
	1,5	6,5	11,7	15,2	23,6	35,2	47,1
1,0	7,0	17,1	19,9	31,4	47,7	66,8	
	6,0	2,5	1,4	1,8	2,4	3,2	4,4
	5,5	3,0	2,0	2,6	3,4	4,5	6,2

Abb. 3: Tabelle 3 DIN 18232-2 – Notwendige Rauchabzugsfläche

## Zuluftfläche

Gemäß DIN 18232-2 sind Zuluftflächen vom 1,5-fachen der nach Tabelle 3 erforderlichen aerodynamisch wirksamen Öffnungsflächen je Rauchabschnitt zu schaffen.

## **7.2 Brandlastermittlung**

Um die oben genannten Schutzziele nachzuweisen, muss zunächst ein repräsentatives Bemessungsbrandszenarium ermittelt werden, aus dem die Randbedingungen für das zu untersuchende Ereignis hervorgehen.

In der papierverarbeitenden Industriehalle stellen senkrecht gelagerte Papierrollen, welche sich im Lager befinden, die größte Brandlast dar.

Die Papierrollen werden gebündelt und in Blöcken zu jeweils 15 Papierrollen gelagert. Aus den Abmessungen (Durchmesser einer Rolle = 1,40 m) ergibt sich eine Fläche von 29,4 m<sup>2</sup> bzw. 4,20 m x 7,00 m.

Für das maßgebende Brandszenario wurde für die Brandleistung ein Mittelwert von 319,5 kW/m<sup>2</sup> (274,0 kW/m<sup>2</sup> – 365,0 kW/m<sup>2</sup>) gewählt. Die Werte der flächenbezogenen Brandleistung wurden aus der Tabelle 1 der Norm „DIN 18230-3 Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 3: Rechenwerte“ für das Material: Schreib- und Druckpapier auf Rollen eng gewickelt, Rollen stehend, liegend oder auf Holzpaletten gelagert entnommen [23].

Als Brandentwicklungsgeschwindigkeit wird „schnell“ nach vfdb TB 04-01: „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ 3. Aufl. November 2013 Tabelle A4.1 angenommen.

## **7.3 Berechnung der Brandverlaufskurve nach VDI 6019-1**

Mit dem Berechnungsverfahren der Richtlinie „VDI 6019-1 - Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden“ können anhand tabellarischer Werte die zeitliche Entwicklung der Brandfläche sowie die Wärmefreisetzungsrates in Abhängigkeit des zu bewertenden Brandrisikos ermittelt werden [24].

Hierfür unterscheiden wir zwischen niedrigenergetischen Bränden mit geringer Wärmefreisetzungsrates (30kW – 300kW) und hochenergetischen Bränden. Für

das im vorherigen Abschnitt genannte Brandszenario wird ein hochenergetischer Brandverlauf gewählt.

Gemäß Abschnitt 3.2.3 der VDI 6019-1 beginnt die Betrachtung der Brandverläufe für hochenergetische Brände mit der fortentwickelten Brandphase 2.

Da in der betrachteten Industriehalle keine Feuerlöschanlage vorhanden ist, werden im Nachfolgenden nur die Brandphasen 2, 3 und 5 betrachtet.

### 7.3.1 Brandphase 2

Fortentwickelte Brandphase

#### Flächenbezogene Brandleistung

*Die maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate für unsere Brandlast (vgl. 7.2).*

$$\dot{q}_f = \frac{274 \text{ kW/m}^2 + 365 \text{ kW/m}^2}{2} = 319,5 \text{ kW/m}^2 \quad (1)$$

#### Geschwindigkeit der Brandentwicklung

„Schnell“

#### Brandintensitätskoeffizient

*VDI 6019-1, Tabelle 1: Brandintensitätskoeffizient (Parameter  $\alpha$  nach VdS 2827)*

$$\alpha = 0,047 \text{ kW/s}^2$$

#### Horizontale mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit

$$u = \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{q}_f}} = \sqrt{\frac{0,047 \text{ kW/s}^2}{319,5 \text{ kW/m}^2}} = 0,01213 \text{ m/s} \quad (2)$$

### Brandfläche

$$A = b * l = 4,2 \text{ m} * 7,0 \text{ m} = 29,4 \text{ m}^2 \quad (3)$$

### Dauer der Brandphase 2

$$\tau_2 = \frac{\sqrt{A_{\tau_2}}}{v} = \frac{\sqrt{29,4 \text{ m}^2}}{0,01213 \text{ m/s}} = 447 \text{ s} \quad (4)$$

### Maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate

$$\dot{Q}_{\tau_2} = \dot{q}_f * A_{\tau_2} = 319,5 \text{ kW/m}^2 * 29,4 \text{ m}^2 = 9393,3 \text{ kW} \quad (5)$$

## 7.3.2 Brandphase 3 und Brandphase 5

Konstante Brandphase und Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

### Zeitpunkt des Beginns der Brandphase 3

$$t_3 = \tau_2 = 447 \text{ s}$$

### Zeit bis zur Brandmeldung

VDI 6090-1, Tabelle 3: Zeiten  $t_a$  bis zur Brandmeldung

$$t_a = 600 \text{ s}$$

### Interventionszeit der Feuerwehr

VDI 6090-1, Tabelle 4: Interventionszeiten  $t_b$  der Feuerwehr

$$t_b = 780 \text{ s}$$



### Zeitpunkt bis zum Angriff der Feuerwehr

$$t_5 = t_a + t_b = 600 \text{ s} + 780 \text{ s} = 1380 \text{ s} \quad (6)$$

### Dauer der Brandphase 3

$$\tau_3 = t_5 - t_3 = 1380 \text{ Sekunden} - 447 \text{ Sekunden} = 933 \text{ s} \quad (7)$$

Das folgende Diagramm zeigt die berechnete Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit der Zeit sowie den zeitlichen Beginn der jeweiligen Brandphase (siehe Diagramm 1).

Die zeitliche Entwicklung der Brandfläche sowie die Wärmefreisetzungsrate in Abhängigkeit des zu bewertenden Brandrisikos ist die Grundlage der von CFAST benötigten Eingabeparameter für die Berechnung des Brandes.

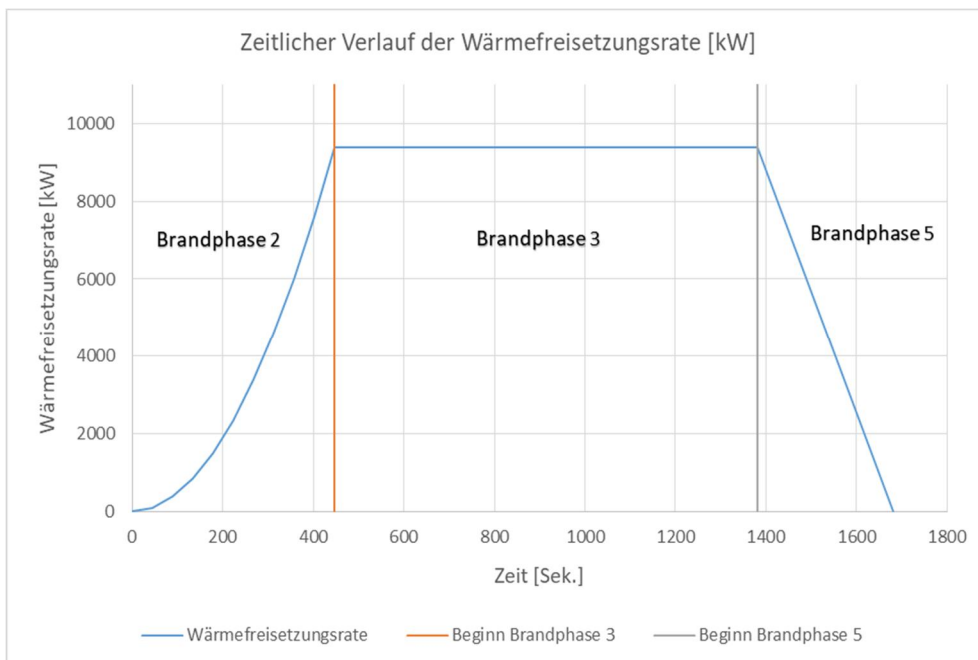


Diagramm 1: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate

## 8 Variantenbeschreibung

Um eine optimale Entrauchung der hier betrachteten Industriehalle zu finden, werden mehrere Varianten hinsichtlich der zu erreichenden Schutzziele ausgewertet und miteinander verglichen.

In der Variante 1 und der Variante 2 wurden die Zuluft- und Abluftflächen gemäß Abschnitt 5.7.1.1 MIndBauRL gewählt. Der Unterschied liegt in der Anordnung der Abluftflächen, welche sich in der Variante 1 im oberen Raumdrittel und in der Variante 2 im Dach befinden.

Bei der Variante 3 gemäß Abschnitt 5.7.1.3 MIndBauRL befinden sich maschinelle Rauchabzugsanlagen im oberen Raumdrittel.

In der Variante 4 wurde die Bemessung der Zu- und Abluftflächen nach der DIN 18232-2 durchgeführt.

Folgende Annahmen wurden für die jeweiligen Varianten getroffen:

- die Brandmeldung wird gemäß VDI 6090-1 mit 600 s (10 min) angesetzt, erst dann Öffnen die natürlichen Rauchabzugsöffnungen bzw. die maschinellen Rauchabzugsanlagen gehen in Betrieb,
- der Zeitpunkt bis zum Angriff der Feuerwehr wird gemäß VDI 6019-1 mit 1380 s angesetzt,
- die Evakuierungszeit ergibt sich gemäß VDMA Informationsblatt Nr. 3, Entrauchung von Räumen im Brandfall – Notwendige Zeiten für Entfluchtung, Rettung und Löschangriff, März 2005:

Brandmeldung	600 s
Reaktionszeit	180 s
Laufzeit (1,2 m/s)	60 s.

Somit ergibt sich gemäß VDMA Informationsblatt Nr. 3 eine Entfluchtungszeit von 840 s.

### 8.1 Variante 1 - MIndBauRL (Abschnitt 5.7.1.1)

Bei der Variante 1 sind die Öffnungsflächen gemäß Abschnitt 5.7.1.1 MIndBauRL im Dach anzuordnen, wobei je 400 m<sup>2</sup> der Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät mit einer aerodynamisch wirksamen Fläche von 1,5 m<sup>2</sup> vorzusehen ist.

Durch die Vorgabe für je 400 m<sup>2</sup> ein notwendiger Rauchabzug, lautet die Rechnung:

$$\text{Rauchabzugsgeräte} = \frac{2.000 \text{ m}^2}{400 \text{ m}^2} = 5$$

Somit werden 5 Rauchabzugsgeräte im Dach mit einer aerodynamisch wirksamen Fläche von 1,5 m<sup>2</sup> angeordnet (siehe Abb. 4). Die Rauchabzugsgeräte werden als Öffnungen im Dach mit der Abmessung von jeweils 1,2 m x 1,25 m ausgebildet. Es ergibt sich insgesamt eine Rauchabzugsfläche von 7,5 m<sup>2</sup>.

Als Zuluftflächen werden 12 Öffnungen mit einer Fläche von jeweils 1,0 m<sup>2</sup> im unteren Raum Drittel angeordnet (siehe Abb. 4). Die Öffnungen haben aerodynamisch wirksame Abmessungen von 1,0 m x 1,0 m. Es ergibt sich insgesamt eine Zuluftfläche von 12 m<sup>2</sup>.

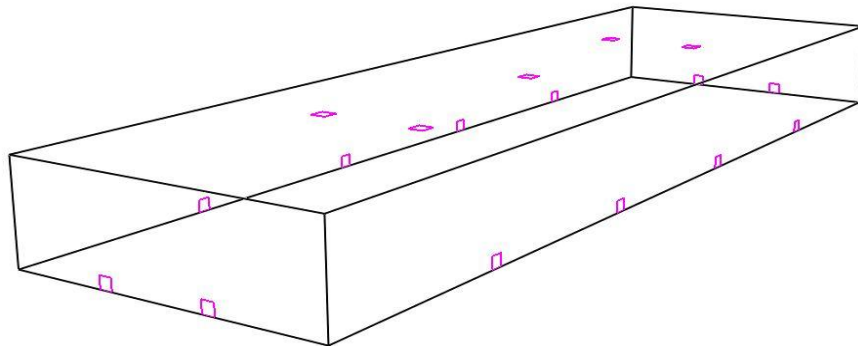


Abb. 4: Ausführung Variante 1

## Auswertung

Die Modellierung mit CFAST zeigt, dass die Grenze von 2,50 m für die Höhe der raucharmen Schicht nach 430 s unterschritten wird (siehe Diagramm 2). Der niedrigste Stand stellt sich im Bereich der maximalen Wärmefreisetzungsrate bei ungeöffneten Rauchabzügen ein.

In der Visualisierung ist zu erkennen, dass die Zuluftflächen vor dem Öffnen der Rauchabzugsöffnungen zu Abluftflächen werden (siehe Anhang, Abb. 8). Es entstehen negative Strömungsgeschwindigkeiten bei diesen Öffnungen. Durch die ungeöffneten Rauchabzugsöffnungen und Ausdehnung der heißen Rauchschrift (Überdruck) kann keine kühlere Luft nachströmen. Das führt dazu, dass die Rauchschrift sich der Umgebungstemperatur anpasst. Dadurch gibt es keine deutliche Temperaturdifferenz mehr zwischen den Gasschichten (Zonen), wodurch die Rauchschrift zu Boden sinkt.

Zum Ende der Evakuierungszeit nach 840 s ist die raucharme Schicht 2,17 m hoch. Durch das Unterschreiten der raucharmen Schicht ab 430 s ist eine sichere Flucht nicht gewährleistet.

Zum Zeitpunkt des Angriffs der Feuerwehr nach 1380 s hat sich die Höhe der raucharmen Schicht auf 2,84 m eingestellt. Eine Brandbekämpfung von Innen ist möglich.

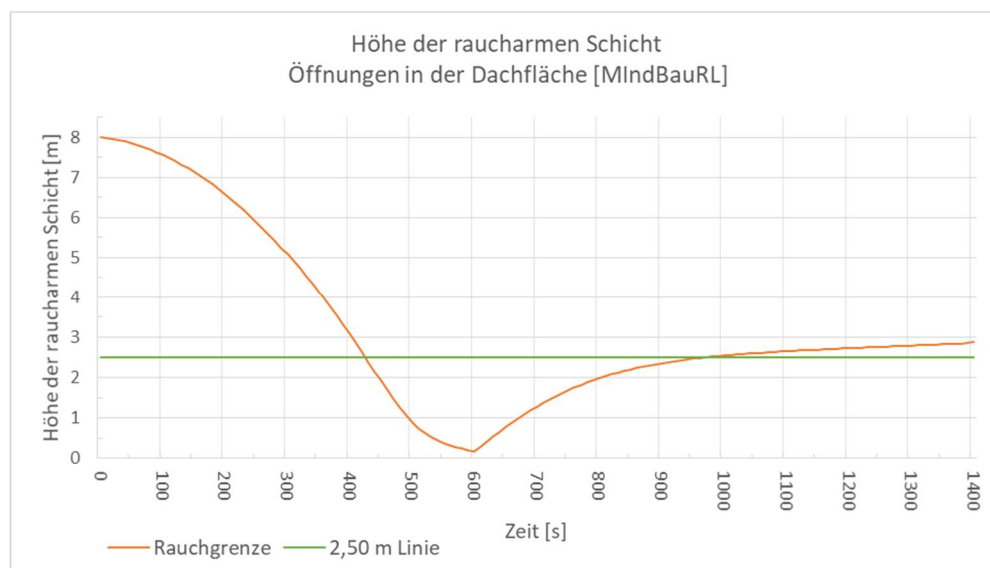


Diagramm 2: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 1

## 8.2 Variante 2 - MIndBauRL (Abschnitt 5.7.1.1)

Bei der Variante 2 sind im Gegensatz zur Variante 1 die Öffnungsflächen im oberen Raumdrittel anzuordnen, wobei je 400 m<sup>2</sup> der Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät mit einer aerodynamisch wirksamen Fläche von 1,5 m<sup>2</sup> vorzusehen ist.

Gleich der Variante 1 werden 5 Rauchabzugsgeräte, nun aber im oberen Raumdrittel, mit einer aerodynamisch wirksamen Fläche von 1,5 m<sup>2</sup> angeordnet.

Die Abluftflächen in der Außenwand werden in Form von Oberlichtern im oberen Drittel der Raumhöhe angeordnet. Es ist je Außenwand ein Oberlicht vorgesehen. Zudem befindet sich in der Seitenwand des Lagers ein zusätzliches Oberlicht (siehe Abb. 5). Die Öffnungen haben aerodynamisch wirksame Abmessungen von 0,4 m x 3,75 m und eine Brüstungshöhe von 6,5 m. Es ergibt sich insgesamt eine Rauchabzugsfläche von 7,5 m<sup>2</sup>.

Als Zuluftflächen werden ebenso 12 Öffnungen mit einer Fläche von jeweils 1,0 m<sup>2</sup> im unteren Raumdrittel angeordnet (siehe Abb. 5). Die Öffnungen haben aerodynamisch wirksame Abmessungen von 1,0 m x 1,0 m. Es ergibt sich insgesamt eine Zuluftfläche von 12 m<sup>2</sup>.

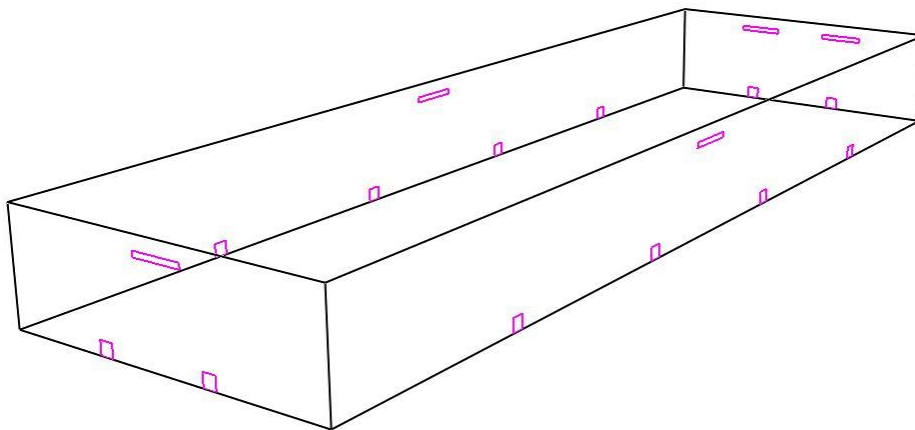


Abb. 5: Ausführung Variante 2

## Auswertung

Die Modellierung der Variante 2 zeigt, dass die Höhe der raucharmen Schicht von 2,50 m nicht für 840 s eingehalten werden kann und somit eine mögliche Selbstrettung der Menschen nicht möglich ist. Bereits nach 420 s beträgt die raucharme Schicht 2,50 m (siehe Diagramm 3).

Der niedrigste Stand stellt sich ähnlich wie bei der vorgehenden Variante im Bereich der maximalen Wärmefreisetzungsrate ein, bevor die Rauchabzüge geöffnet werden.

In der Visualisierung ist zu erkennen, dass ähnlich zur Variante 1 die Zuluftflächen, bevor die Rauchabzugsöffnungen öffnen, zu Abluftflächen werden (siehe Anhang, Abb. 9).

Zum Beginn der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr nach 1380 s beträgt die raucharme Schicht 2,67 m. Eine Brandbekämpfung von Innen ist möglich.

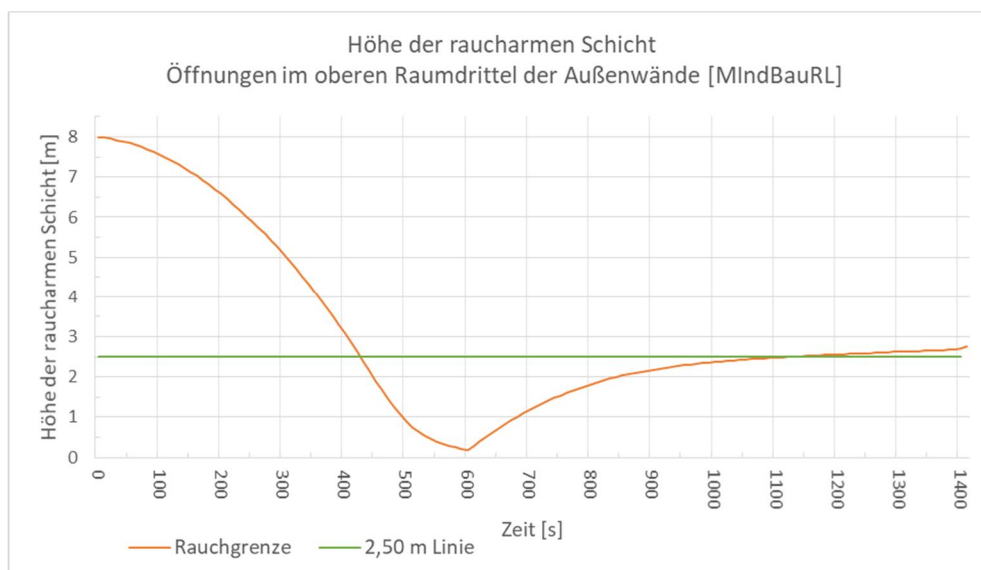


Diagramm 3: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 2

### 8.3 Variante 3 - MIndBauRL ( Abschnitt 5.7.1.3)

In der Variante 3 werden gemäß Abschnitt 5.7.1.3 MIndBauRL maschinelle Entrauchungsanlagen vorgesehen. Hierzu wird je 400 m<sup>2</sup> Grundfläche jeweils eine Absaugstelle mit einem Luftvolumenstrom von 10.000 m<sup>3</sup>/h im oberen Raumdrittel angeordnet. Somit werden 5 maschinelle Entrauchungsanlagen vorgesehen.

Räume mit mehr als 1.600 m<sup>2</sup> Grundfläche genügt ein zusätzlicher Luftvolumenstrom von 5.000 m<sup>3</sup>/h je angefangene 400 m<sup>2</sup> Grundfläche. Daraus ergibt sich insgesamt ein Luftvolumenstrom von 45.000 m<sup>3</sup>/h und jeweils 9.000 m<sup>3</sup>/h pro Entrauchungsgerät.

Die Zuluftflächen  $A_{zu}$  werden im unteren Raumdrittel angeordnet und müssen so angepasst werden, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s nicht überschritten wird. Somit lautet die Rechnung:

$$A_{zu} = \frac{45.000 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \cdot 3 \text{ m/s}} = 4,17 \text{ m}^2$$

Als Zuluftflächen werden 10 Öffnungen mit einer Fläche von jeweils 0,42 m<sup>2</sup> im unteren Raumdrittel angeordnet (siehe Abb. 6). Die Öffnungen haben aerodynamisch wirksame Abmessungen von 0,4 m x 1,05 m. Es ergibt sich insgesamt eine Zuluftfläche von 4,2 m<sup>2</sup>. Durch die Vergrößerung der berechneten Zuluftfläche verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit auf 2,98 m/s.

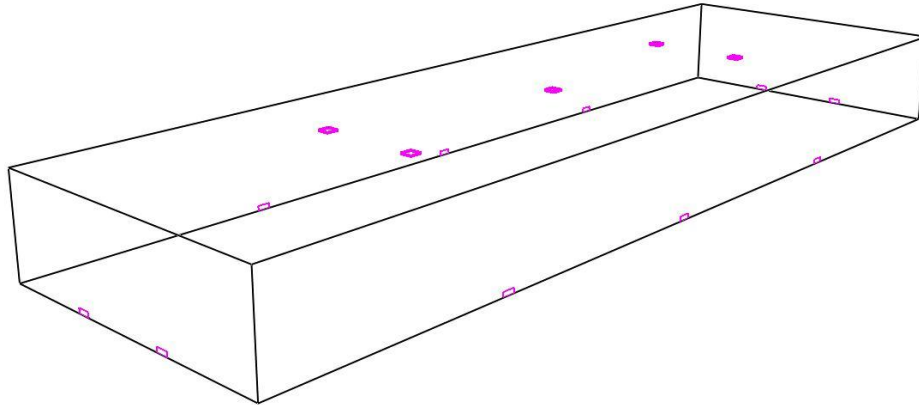


Abb. 6: Ausführung Variante 3

### Auswertung

Die Ergebnisse von CFAST zeigen, dass die geforderten maschinellen Entrauchungsanlagen für das betrachtete Brandszenario der Papierrollen nicht ausreichen. Die Grenze von 2,50 m für die Höhe der raucharmen Schicht wird nach 420 s erreicht und verändert sich durch die maschinelle Abluft nach 600 s nur geringfügig (siehe Diagramm 3).

In der Visualisierung ist wie in den vorgehenden Varianten zu erkennen, dass die Zuluftflächen vor dem Öffnen der Rauchabzugsöffnungen, zu Abluftflächen werden (siehe Anhang, Abb. 10).

Durch die maschinellen Entrauchungsgeräte wird die durch das Bemessungsszenario erzeugte Rauchmenge für den gesamten Simulationszeitraum nicht abgeführt (siehe Anhang, Abb. 11). Die Dimensionierung der maschinellen Rauchabzugsgeräte gemäß Abschnitt 5.7.1.3 MIndBauRL ist für das betrachtete Brandszenario mit einer maximalen Wärmefreisetzung von 9393,3 kW nicht ausreichend.

Eine sichere Flucht ist nicht gewährleistet. Ebenso kann bei einer Höhe der raucharmen Schicht von 0,16 m nach 1380 s kein sicherer Innenangriff durch die Feuerwehr erfolgen.



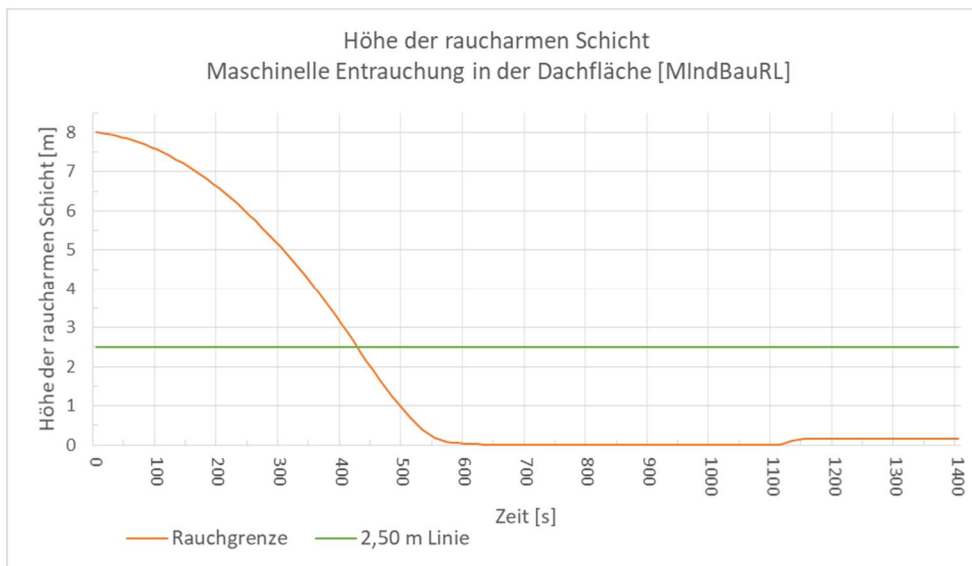


Diagramm 4: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 3

#### 8.4 Variante 4 – DIN 18232-2

Die erforderliche Rauchabzugsfläche der Variante 4 beträgt aufgrund der Überschreitung der maximal zulässigen Rauchabschnittsfläche  $6,44 \text{ m}^2$  (vgl. 7.1.2).

Gemäß Abschnitt 7.2.2 DIN 18232-2 muss bei der Rauchableitung über Dachöffnungen mindestens eine Rauchabzugsfläche je  $200 \text{ m}^2$  Bodenfläche vorhanden sein. Somit ergeben sich in unserem Fall 10 Rauchabzugsflächen mit einem Querschnitt von  $0,644 \text{ m}^2$ .

Es werden 10 Öffnungen mit Abmessungen von  $0,805 \text{ m} \times 0,805 \text{ m}$  und einem Querschnitt von  $0,648 \text{ m}^2$  angeordnet. Es ergibt sich insgesamt eine Rauchabzugsfläche von  $6,48 \text{ m}^2$ .

Zusätzlich müssen die natürlichen Rauchabzugsflächen gemäß Abschnitt 7.2.2 DIN 18232-2 folgendermaßen angeordnet werden:

- innerhalb des Rauchabschnitts möglichst gleichmäßig verteilt,
- Abstand der äußersten Rauchabzugsfläche und der Außenwand zwischen  $5,0 \text{ m}$  und  $10,0 \text{ m}$ ,
- Abstand der Rauchabzugsflächen untereinander darf min.  $4,0 \text{ m}$  und max.  $20,0 \text{ m}$  betragen (siehe Abb. 7).

Gemäß DIN 18232-2 sind Zuluftflächen vom 1,5-fachen der erforderlichen Rauchabzugsfläche notwendig. Dementsprechend werden Zuluftflächen von  $9,66 \text{ m}^2$  benötigt. Die Oberkante der Zuluftöffnungen muss zur Unterseite der Rauchgasschicht einen Abstand von mindestens  $1,0 \text{ m}$  aufweisen.

Als Zuluftflächen werden 12 Öffnungen mit einer Fläche von jeweils  $0,805 \text{ m}^2$  im unteren Raumdrittel angeordnet. Die Öffnungen haben aerodynamisch wirksame Abmessungen von  $0,45 \text{ m} \times 1,8 \text{ m}$ . Es ergibt sich insgesamt eine Zuluftfläche von  $9,72 \text{ m}^2$ . Die Zuluftflächen haben eine Brüstungshöhe von  $0,8 \text{ m}$  um einen ausreichenden Abstand zur Unterseite der Rauchgasschicht zu haben (siehe Abb. 7).

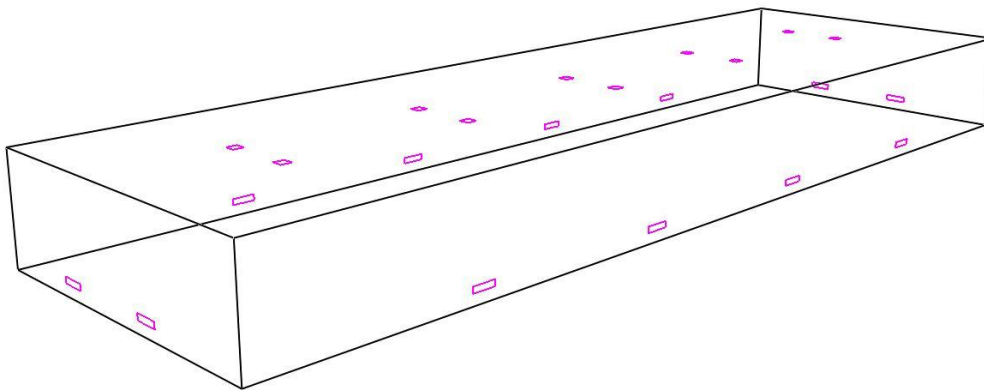


Abb: 7: Ausführung Variante 4

### Auswertung

Auch die Ergebnisse nach DIN 18232-2 zeigen, dass die geforderten Zu- und Abluftflächen für das hier betrachtete Brandszenario der Papierrollen nicht ausreichen. Die Grenze von  $2,50 \text{ m}$  für die Höhe der raucharmen Schicht wird nach  $420 \text{ s}$  erreicht (siehe Diagramm 5).

Auch in der Visualisierung ist wie in den vorgehenden Varianten zu erkennen, dass die Zuluftflächen vor dem Öffnen der Rauchabzugsöffnungen zu Abluftflächen werden (siehe Anhang, Abb. 12).

Eine sichere Flucht ist nicht gewährleistet. Ebenso kann bei einer Höhe der raucharmen Schicht von 2,41 m kein sicherer Angriff durch die Feuerwehr erfolgen.

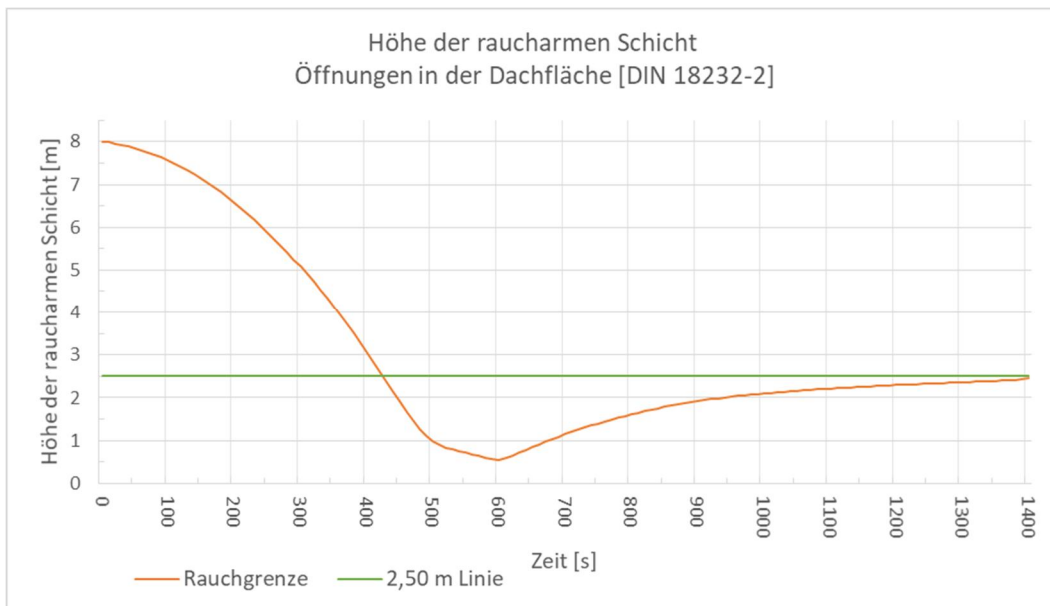


Diagramm 5: Höhe der raucharmen Schicht - Variante 4

## 9 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse von CFAST zeigen, dass die geforderten Zu- und Abluftflächen in allen untersuchten Varianten für den Zeitraum der Selbstrettung nicht ausreichen. Durch die maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate der gelagerten Papierrollen von 9393,3 kW und einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit von 0,01213 m/s wird die 2,50 m hohe raucharme Schicht in jeder Variante bereits nach etwa 420 s unterschritten (siehe Diagramm 6).

Dies ist durch die späte Brandmeldung begründet, die erst nach 600 s (10 min) stattfindet. In dieser Zeit kann sich die Rauchsicht in der gesamten Industriehalle ausbreiten, denn der entstehende Brandrauch kann erst nach der Brandmeldung und dem Öffnen der Rauchabzugsgeräte bzw. nach der Aktivierung der maschinellen Rauchabzugsgeräte abgeführt werden. Zudem beschleunigt sich die Ausbreitung des Brandrauches durch die negativen Strömungsgeschwindigkeiten der Zuluftflächen, wodurch keine kühle Zuluft zugeführt werden kann und sich die Rauchtemperatur mit der Umgebungstemperatur angleicht. Der Brandrauch sinkt diesbezüglich schneller ab.

Bei einer Auslösung der Rauchabzugsöffnungen und maschinellen Rauchabzugsgeräten mit automatischen Brandmeldern nach DIN EN 54-7, die auf die Brandkenngroße Rauch ansprechen, ist die Zeit von der Brandentstehung bis zur Brandmeldung mit 300 s (5 min) anzusetzen. Hierzu genügt ein Rauchmelder je 200 m<sup>2</sup> Rauchabschnittsfläche, bei linienförmigen Rauchmeldern genügt ein Linienabstand von 10 m.

Dementsprechend würden die geplanten Rauchabzugsgeräte zu einem früheren Zeitpunkt Öffnen bzw. die maschinellen Rauchabzugsgeräte eher in Betrieb gehen. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass die Höhe der raucharmen Schicht von 2,50 m in dem Zeitraum der Selbstrettung für die Variante 1, 2 und 4 eingehalten werden kann. Durch ein zeitigeres Öffnen der Rauchabzugsgeräte bzw. Aktivieren der maschinellen Rauchabzugsgeräte kommt es zu einem frühen Abströmen der heißen Rauchsicht sowie zum Einströmen kühlerer Zuluft. Dies wäre durch eine erneute Entrauchungssimulation zu belegen.

Durch automatische Brandmelder wäre es in der Variante 3 nicht möglich eine 2,50 m hohe raucharme Schicht für den Zeitraum der Selbstrettung und für den Beginn der Brandbekämpfung einzuhalten. Das lässt vermuten, dass die betrachtete Brandleistung außerhalb der von der Norm zugrunde gelegten

Brandleistungen zur Erstellung der Berechnungsverfahren liegt. Um den durch den Brand erzeugten Rauch abzuführen, müssten die maschinellen Rauchabzugsgeräte einen höheren Luftvolumenstrom aufweisen, wodurch sich die Zuluftflächen vergrößern würden.

Zum Zeitpunkt des Angriffs der Feuerwehr nach 1380 s kann in der Variante 1 und 2 eine 2,50 m hohe raucharme Schicht eingehalten werden. In der Variante 4 muss eine Optimierung der Zu- und Abluftflächen für das hier dargestellte Brandszenario durchgeführt werden. Die Höhe der raucharmen Schicht ist von der Größe der Abluftflächen abhängig. Je größer die Abluftflächen sind, desto höher ist die Zuluftgeschwindigkeit und es wird mehr Rauch abgeführt. Ob eine zeitigere Brandmeldung oder das Optimieren der Zu- und Abluftflächen für eine 2,50 m hohe raucharme Schicht notwendig ist, müsste durch eine erneute Entrauchungssimulation untersucht werden.

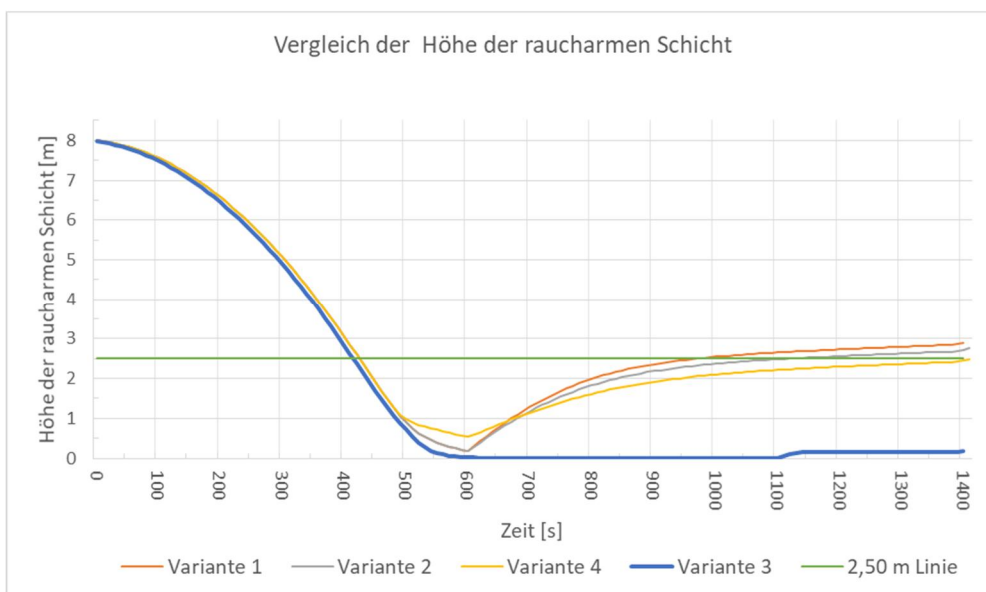


Diagramm 6: Vergleich der Höhe der raucharmen Schicht

## 10 Fazit

Das Ziel dieser Arbeit ist, aufgrund einer Überschreitung der Rettungsweglänge um 11,0 m, das Sicherheitsniveau der Industriehalle in 4 verschiedenen Varianten mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes zu untersuchen, um die nach § 14 MBO geforderten Schutzziele sicherzustellen.

Es soll eine 2,50 m hohe raucharme Schicht für den Zeitraum der Entfluchtung sowie bis zum Beginn der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr nachgewiesen werden, um die Personenrettung sowie das Ermöglichen von wirksamen Löscharbeiten sicherzustellen.

Keine der hier betrachteten Varianten erfüllt alle der hier nachzuweisenden Schutzziele. Lediglich die Variante 1 und 2 können eine 2,50 m hohe raucharme Schicht zu Beginn der Brandbekämpfung und somit das Ermöglichen von Löscharbeiten nachweisen. Die somit angesetzten Zu- und Abluftflächen der MIndBauRL und der DIN 18232-2 sind nicht ausreichend für das beispielhaft betrachtete Bemessungsszenario. Das Erreichen der Schutzziele durch eine 2,50 m hohe raucharme Schicht und somit Kompensation der Rettungswegüberschreitung ist nicht gegeben.

Grundsätzlich bedarf es eine Erweiterung der Industriehalle mit automatischen Brandmeldern nach DIN EN 54-7, die auf die Brandkenngröße Rauch ansprechen, um Rauchabzüge zeitiger zu Öffnen und maschinelle Rauchabzugsgeräte eher in Betrieb zu nehmen. Durch diese Erweiterung könnte in den Varianten 1, 2 und ggf. Variante 4 das Schutzziel der Personenrettung und für die Durchführung von wirksamen Löscharbeiten sichergestellt werden. Zudem benötigt die Variante 4 ggf. eine Optimierung der Zu- und Abluftflächen.

Für die Variante 3 bedarf es einer deutlichen Anpassung der maschinellen Rauchabzugsanlagen, um der Brandleistung der Papierrollen gerecht zu werden.

Letztendlich sind Entrauchungssimulationen mit dem Programm CFAST eine gute Alternative, um Aussagen über die Verrauchung von Rettungs- und Angriffswegen zu treffen. Zudem lassen sich brandschutztechnische Einrichtungen wie Rauchabzüge oder Anlagen für maschinelle Entrauchungen dimensionieren und optimieren, um dem Sicherheitsniveau und somit den Schutzzielen der MBO gerecht zu werden.

## Literatur

- [1] <https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/grundlagen/bauordnungen-fuer-standardbauten-3109273>, verfügbar am 12.09.2019
- [2] <https://www.baunetzwissen.de/glossar/u/ungeregelte-sonderbauten-3164077>, verfügbar am 17.09.2019
- [3] <https://www.baunetzwissen.de/glossar/g/geregelte-sonderbauten-3166139>, verfügbar am 20.09.2019
- [4] Musterbauordnung, Fassung vom November 2002, letzte Änderung 22.02.2019
- [5] [http://www.brandschutzbuero.de/site/assets/files/1217/fet2013\\_85250.pdf](http://www.brandschutzbuero.de/site/assets/files/1217/fet2013_85250.pdf); verfügbar am 17.09.2019
- [6] [https://www.lfs.sachsen.de/download/lfs/Vortrag2\\_Abweichungstatbestaende\\_KompensationsmoeglichkeitenSonderbau.pdf](https://www.lfs.sachsen.de/download/lfs/Vortrag2_Abweichungstatbestaende_KompensationsmoeglichkeitenSonderbau.pdf), verfügbar am 05.09.2019
- [7] [https://www.bft-cognos.de/assets/files/40\\_bft-cognos-website/aktuelles/feuertrutz-2018/Tagungsbeitrag%20Brandschutzingenieurmethoden%20-%20praktische%20Anwendung%20der%20DIN%2018009.pdf](https://www.bft-cognos.de/assets/files/40_bft-cognos-website/aktuelles/feuertrutz-2018/Tagungsbeitrag%20Brandschutzingenieurmethoden%20-%20praktische%20Anwendung%20der%20DIN%2018009.pdf), verfügbar am 22.10.2019
- [8] <http://www.heissbemessung.net/index.html>, verfügbar am 27.08.2019
- [9] [https://www.hhpberlin.de/assets/files/Fachbeitraege/Evakuierung\\_druck.pdf](https://www.hhpberlin.de/assets/files/Fachbeitraege/Evakuierung_druck.pdf), verfügbar am 29.09.2019
- [10] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes / Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., 3. Auflage, 2013 (vfdb TB04-01)
- [11] <https://www.feuertrutz.de/cfd-brandsimulation-virtuellebraende/150/33272/>, verfügbar am 06.10.2019
- [12] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes / Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., 1. Auflage, 2006 (vfdb TB04-01)
- [13] DIN 18009-1:2016-09 Brandschutzingenieurwesen - Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung

- [14] <https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/grundlagen/schutzziele-im-brandschutz-3109237>, verfügbar am 24.09.2019
- [15] <http://www.derbrandschützer.de/2016/08/09/die-brandschutz-schutzziele-der-bauordnung/>, verfügbar am 24.09.2019
- [16] [https://www.bft-cognos.de/assets/files/Veroeffentlichungen/11\\_Akzeptanz%20von%20Brandschutzingenieurmethoden.pdf](https://www.bft-cognos.de/assets/files/Veroeffentlichungen/11_Akzeptanz%20von%20Brandschutzingenieurmethoden.pdf), verfügbar am 25.09.2019
- [17] <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/brandschutz/schutzziele-im-brandschutz-4392271>, verfügbar am 27.09.2019
- [18] FORELL, B.: Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten - Nachweis nach vfdb-Leitfaden. Tagungsband zur 56. vfdb Jahresfachtagung 2007, 21. bis 23. Mai, Leipzig. S. 294-317
- [19] DIN 18232-2:2007-11 Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA); Bemessung, Anforderungen und Einbau
- [20] Richard D. P /Paul A. R./ Glenn P. F.: CFAST User's Guide Volume 2, 2019
- [21] Muster – Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau, Fassung vom Juli 2014
- [22] DIN EN 54-7:2018-10 Brandmeldeanlagen – Teil 7: Rauchwarnmelder – Punktförmige Rauchmelder nach dem Streulicht-, Durchlicht- oder Ionisationsprinzip
- [23] DIN 18230-3:2002-08 Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 3: Rechenwerte
- [24] VDI 6019-1 - Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Teil 1: Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit, Fassung vom Mai 2006



# Anhänge

Smokeview SMV6.7.9-0-gf5aa47a1 - Sep 6 2019

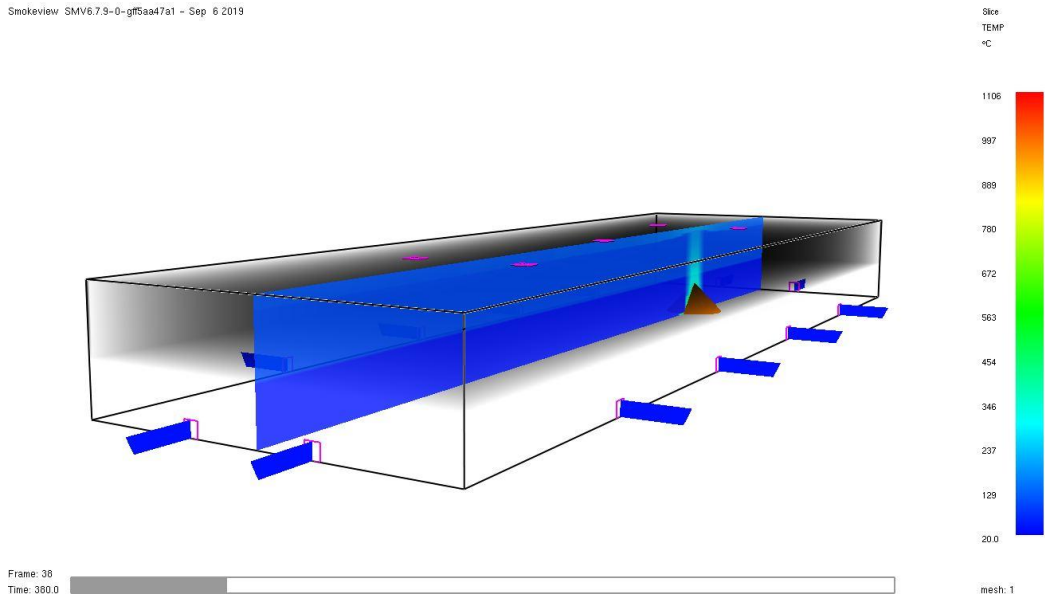


Abb. 8: Visualisierung Smokeview Variante 1

Smokeview SMV6.7.9-0-gf5aa47a1 - Sep 6 2019

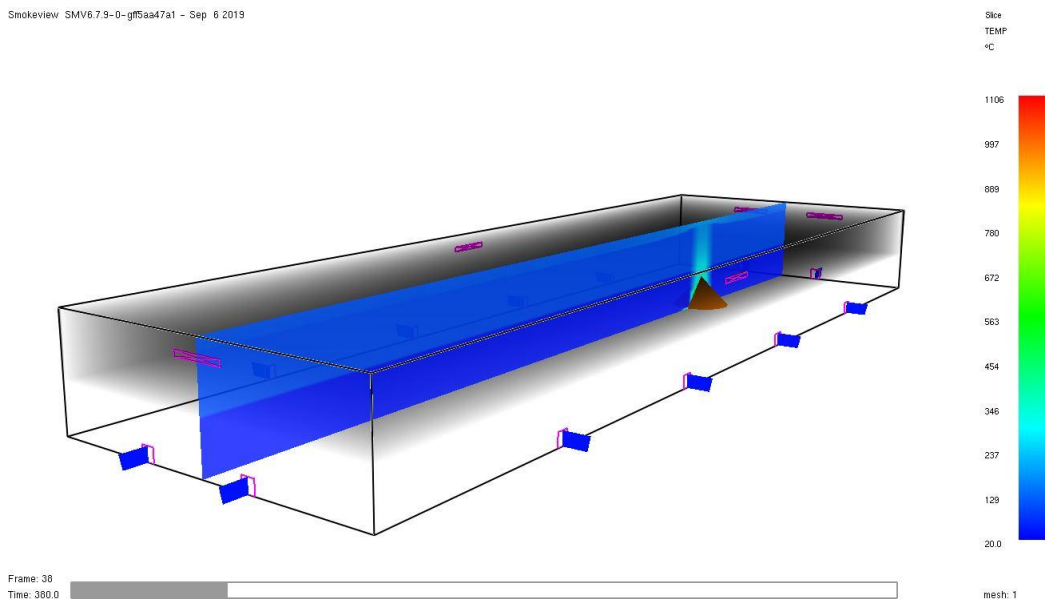


Abb. 9: Visualisierung Smokeview Variante 2

Smokeview SMV6.7.9-0-gf5aa47a1 - Sep 6 2019

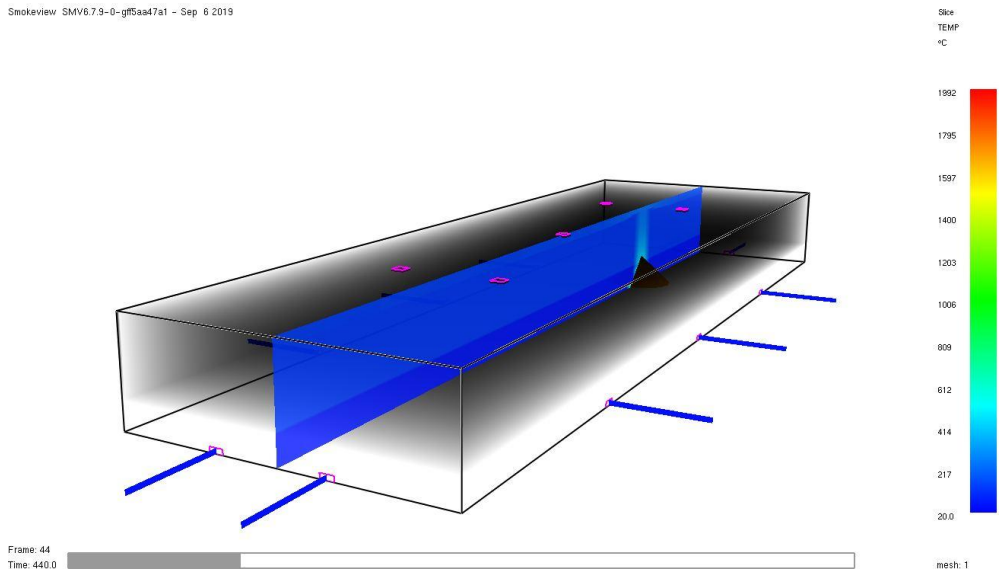


Abb. 10: Visualisierung Smokeview Variante 3-1

Smokeview SMV6.7.9-0-gf5aa47a1 - Sep 6 2019

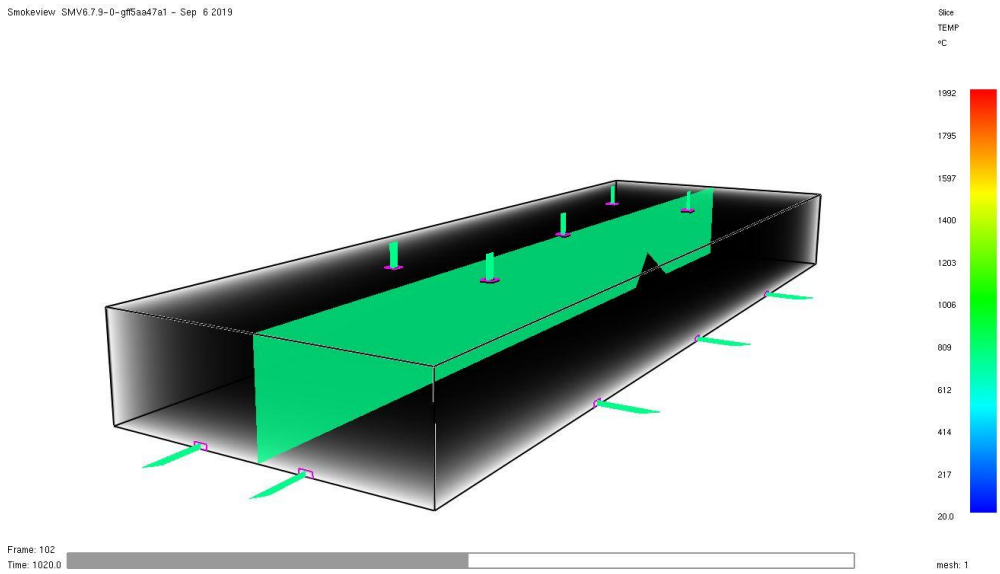


Abb. 11: Visualisierung Smokeview Variante 3-2

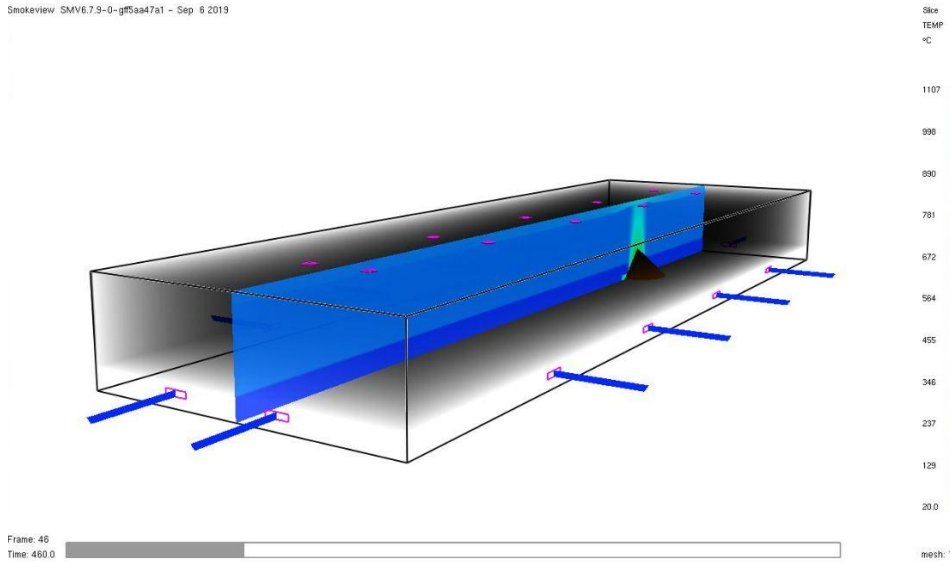


Abb. 12: Visualisierung Smokeview Variante 4

## Eidesstattliche Erklärung

Verfasst von: Herr Martin Petermann

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem o.a. formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Datum:

Unterschrift: