

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
eines
Diplomingenieurs (FH)

Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen

Fachhochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst
Fakultät Bauwesen
Fachrichtung Bauingenieurwesen

Annika Heidrich

Mat.-Nr. 212999
Braunschweig

Diplomthema

- Baulicher Brandschutz -

Rauch- und Wärmefreihaltung nach DIN 18232-2:

Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA)

Bemessung, Anforderungen und Einbau

WS 2003/2004

Beurteilung

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer

2. Prüfer: Dr.-Ing. Rüdiger Hass



Aufgabe für die Diplomarbeit

Name, Vorname: **Heidrich, Annika** Matr.Nr.:212999

Bearbeitungszeit: Ausgabe 24.10.2003

Abgabe 19.12.2003 (8 Wochen)

Prüfer: **Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer**

Zweitprüfer: **Dr.-Ing. Rüdiger Hass**

Thema: Baulicher Brandschutz - Rauch- und Wärmefreihaltung nach DIN 18232-2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) Bemessung, Anforderungen und Einbau

Ein Hauptschutzziel der Erstellung von Brandschutzkonzepten ist die Gewährleistung der Rauch- und Wärmefreihaltung von Fluch- und Rettungswegen sowie von begrenzten Rauchabschnittsflächen.

Hierbei regelt die DIN 18232-2 die Bemessung und den Einbau von Rauchabzügen mit vertikaler Rauchabführung durch thermischen Auftrieb. Der Anwendungsbereich der Norm ist jedoch auf Rauchabschnittsflächen bis zu einer Größe $\leq 1600 \text{ m}^2$ beschränkt. Für Abschnitte $> 1600 \text{ m}^2$ werden i. Allg. eine Computersimulationsberechnungen der Brandgasverteilung oder spezielle Rauchgasversuche gefordert. Diese Maßnahmen sind jedoch zeitaufwendig und teuer.

Im Einzelnen werden u. a. folgende Teilleistungen verlangt:

1. Erläuterung der Anwendung der Norm anhand beispielhafter Grundrisse
2. Darstellung von Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der Norm anhand beispielhafter Grundrisse außerhalb des zulässigen Anwendungsbereiches
3. Berechnungen der Entrauchung unterschiedlich großer Rauchabschnittsflächen nach Norm sowie numerischen Simulationsberechnungen mittels Zonen- und CFD-Modellen
4. Vergleich und Auswertung der Ergebnisse sowie Beurteilung der Möglichkeit der Anwendbarkeit der DIN 18232-2 auf Rauchabschnittsflächen $> 1600 \text{ m}^2$

Alle Berechnungen und deren Randbedingungen sind detailliert und nachvollziehbar darzulegen.

Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass die gesamte Diplomarbeit und die zugehörigen Berechnungen von mir selbständig angefertigt wurden. Zitate und/oder Übernahmen sind entsprechend gekennzeichnet und in einem Quellenverzeichnis am Ende dieser Diplomarbeit aufgeführt.

Hildesheim, den 19. Dezember 2003

A. Heidrich
Annika Heidrich



Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung	5
2	Grundlagen	7
2.1	Auslegung von Natürlichen Rauchabzugsanlagen (NRA) nach DIN 18232-2	7
2.1.1	Anwendungsbereich	7
2.1.2	Bemessungsgrundlagen und Bemessung nach DIN 18232-2	7
2.1.3	Beispiele für die Bemessung nach DIN 18232-2	11
2.2	Ingenieurmäßige Methoden	16
2.2.1	Zonenmodell	16
2.2.2	Feldmodell	16
2.3	Gefährdung durch Rauchgas	17
3	Vorgehensweise bei der Anwendung des Zonenmodells	18
3.1	Konkretisierung der Zielsetzung	18
3.2	Zusammenstellung der Parameter	19
3.3	Zonenmodell-Berechnungen	21
4	Darstellung und Zusammenfassung der Zonenmodell-Ergebnisse	25
4.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 – Kontrolle der Norm ohne Anwendung der Erleichterung A	25
4.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 – Kontrolle der Norm mit Anwendung der Erleichterung A	26
4.3	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 – Bildung großer Rauchabschnitte Wegfall der Rauchschürzen	27
4.4	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 – Bildung großer Rauchabschnitte – Wegfall der Rauchschürzen – Verwendung erhöhter Eingabedaten	29
4.5	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 – Bildung großer Rauchabschnitte – Wegfall der Rauchschürzen – Verwendung extrapolierter Eingabedaten	31
4.6	Zusammenfassung der Zonenmodell-Ergebnisse	33
5	Feldmodell-Berechnungen	34
5.1	Ergebnisse der Feldmodell-Berechnungen	34
5.2	Zusammenfassung der Feldmodell-Ergebnisse	40
6	Zusammenfassung	41
7	Verzeichnisse	42
7.1	Quellen	42
7.2	Abbildungen	43
7.3	Diagramme	44
7.4	Tabellen	44
7.5	Begriffe	45
8	Anlagen	46



1 Einleitung

Die Rauch- und Wärmeableitung ist eine der wichtigsten Maßnahmen des baulichen Brandschutzes, denn die größte Gefahr bei einem Brand ist nicht das Feuer selbst, sondern die dabei unvermeidliche Rauchentwicklung, die innerhalb kürzester Zeit auch größere Gebäude vollständig verrauchen kann. Die Fluchtmöglichkeiten im Gebäude befindlicher Personen werden dadurch ebenso stark vermindert wie die Möglichkeit eines Lösch- und Rettungsangriffs durch die Feuerwehr. Es ist deshalb notwendig, für eine ausreichende Rauch- und Wärmefreihaltung Sorge zu tragen. Die Regelung diesbezüglich erfolgt zum Teil bereits auf europäischer Ebene (DIN EN 12101) und teilweise noch nach deutscher Normung (DIN 18232). Die Bemessung der natürlichen Rauchabzugsanlagen zur Rauch- und Wärmefreihaltung wird in der DIN 18232 – Teil 2 geregelt. Diese wurde kürzlich mit der Herausgabe des Weißdrucks vom Juni 2003 novelliert. Es findet hier eine Abkehr von der bis dato flächenbezogenen Dimensionierung der Rauchabzugsanlagen statt und es wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Rauchentwicklung bei einem Brand nicht primär von der Größe des Raumes abhängt, in dem das Feuer ausbricht, sondern vom Feuer selbst. Die konventionelle Anwendung der DIN 18232-2 ist auf Rauchabschnittsflächen von 200 m^2 bis 1600 m^2 begrenzt. Für diese Rauchabschnittsgrößen sind Mindestwerte der aerodynamisch wirksamen Öffnungsflächen der Natürlichen Rauchabzugsanlagen (NRA) festgelegt.

Durch die Begrenzung auf maximal 1600 m^2 bringt die Auslegung von Rauchabzugsanlagen anhand der DIN 18232-2 für größere Gebäude (z. B. im Industriebau) Probleme mit sich. Diese bestehen beispielsweise in der Erfordernis des Einbaus von Rauchschürzen und möglichen Überdimensionierungen der Rauchabzugsflächen.

In Rahmen dieser Diplomarbeit wird mit ingenieurmäßigen Methoden überprüft, ob die Begrenzung auf eine Rauchabschnittsgröße von 1600 m^2 notwendig ist beziehungsweise ob und welche Möglichkeiten einer Anwendung der DIN 18232-2 über diese Rauchabschnittsgröße hinaus bestehen. Zur Nachweisführung kommen hierbei zwei anerkannte ingenieurmäßige Methoden in Betracht, das Zonenmodell und das Feldmodell.

Das Zonenmodell geht von der vereinfachten Annahme aus, dass sich im Brandfall zwei Schichten (Zonen) bilden, eine heiße Rauchgasschicht, die sich im Deckenbereich eines Raumes bildet und eine darunter liegende raucharme beziehungsweise rauchgasfreie Schicht. Die Berechnungen erfolgen numerisch anhand vereinfachter Varianten der Grundgleichungen. Den Zonen werden dabei mittlere Werte für Temperatur, Dichte und Konzentration zugewiesen. Damit fallen sowohl Rechen- als auch Zeitaufwand erheblich geringer aus, als dies beim Feldmodell der Fall ist.

Das Feldmodell ist ein komplex strukturiertes Verfahren, bei dem die in den hydrodynamischen Grundgleichungen enthaltenen Variablen Druck, Temperatur, Dichte, Geschwindigkeit und Stoffkonzentration als Funktion des Ortes und der Zeit berechnet werden. Der zur Berechnung eines Datensatzes erforderliche Zeitaufwand wird dadurch zum Teil enorm groß.



Für die Bearbeitung der Aufgabenstellung werden zunächst die Bemessungsgrundlagen der Norm dargelegt, die abschließend mit Hilfe exemplarischer Bemessungen innerhalb des Anwendungsbereiches der DIN 18232-2 erläutert werden.

Im Weiteren wird die DIN 18232-2 auf unterschiedliche große Räume angewendet beziehungsweise die Auslegung nach DIN 18232-2 durchgeführt. Diese wird unter Einhaltung der Bemessungsregeln mittels des Zonenmodells überprüft. Dabei erfolgt die Bestimmung der erforderlichen aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche der NRA und der geometrisch freien Öffnungsfläche der Zuluft nach DIN 18232-2 für unterschiedliche Raumhöhen und Bemessungsziele (Höhe der raucharmen Schicht). Mittels des Zonenmodells werden unter Variation der Grundflächen von 1600 m² bis einschließlich 3600 m² die Höhen der raucharmen Schicht berechnet und mit dem Bemessungsziel der DIN 18232-2 verglichen.

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Zonenmodell-Berechnungen wird exemplarisch die Rauch- und Wärmeausbreitung mittels eines Feldmodells simuliert. Die Ergebnisse werden abschließend gegenübergestellt und hinsichtlich der Aufgabenstellung analysiert. Als Ergebnis sollen Regeln für die Anwendung der DIN 18232-2 für Rauchabschnitte mit Flächen von mehr als 1600 m² aufgestellt werden.



2 Grundlagen

2.1 Auslegung von Natürlichen Rauchabzugsanlagen (NRA) nach DIN 18232-2

Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich sämtlich auf die DIN 18232-2, soweit sie nicht anders gekennzeichnet sind.

2.1.1 Anwendungsbereich

Die DIN 18232-2 [1] regelt die Bemessung und den Einbau Natürlicher Rauchabzugsanlagen (NRA).

Dabei wird vorausgesetzt, dass

- die Rauchableitung vertikal durch thermischen Auftrieb (vgl. DIN 18232-1) über das Dach erfolgt,
- sie ausschließlich auf Gebäude mit nur einem Geschoss beziehungsweise das oberste Geschoss mehrgeschossiger Gebäude angewendet wird,
- Rauchabschnitte nicht größer als 1600 m^2 sind und anderenfalls mittels Rauchschrüzen in Rauchabschnitte $\leq 1600 \text{ m}^2$ eingeteilt werden.

Eine Ausnahme bezüglich des letzten Punktes gestattet Erleichterung A. Sie lässt unter bestimmten Voraussetzungen die Vergrößerung eines Rauchabschnittes auf maximal 2600 m^2 zu.

Für Räume mit Rauchableitung über die Außenwände gibt die Norm informative Hinweise hinsichtlich der Bemessung und des Einbaus natürlicher Rauchabzugsanlagen.

Wird von dieser Norm abgewichen, sind gesonderte Nachweise erforderlich.

2.1.2 Bemessungsgrundlagen und Bemessung nach DIN 18232-2

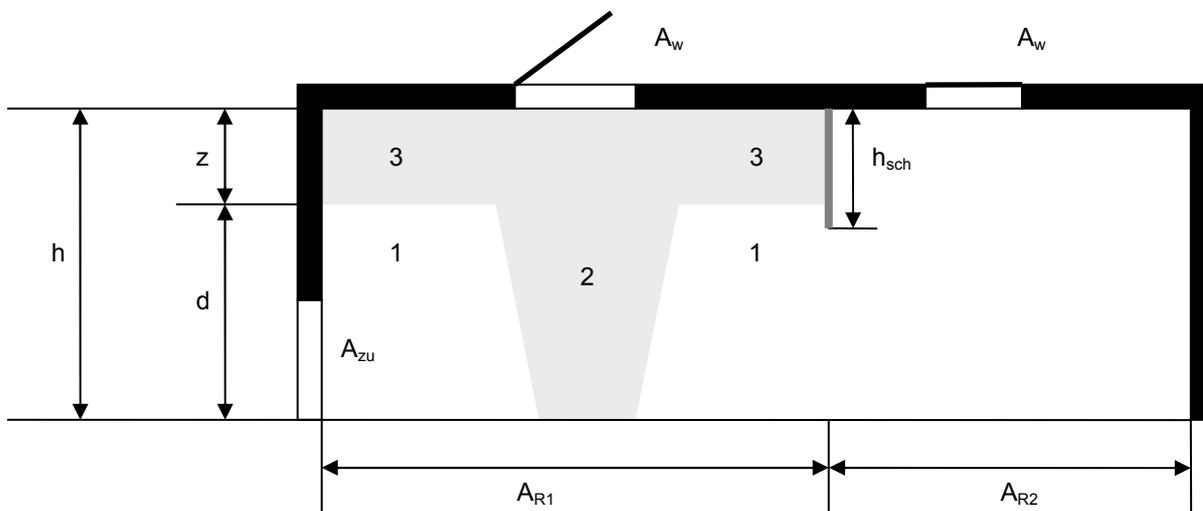
Für die Bemessung von natürlichen Rauchabzugsanlagen nach DIN 18232-2 sind mehrere Einflussgrößen (vgl. Bild 2.1.2.1) von Bedeutung. Zur Bestimmung der aerodynamisch wirksamen Rauchabzugsfläche nach Tabelle 3 der DIN 18232-2 werden zunächst die Eingangsgrößen Raumhöhe, Höhe der raucharmen Schicht und die Bemessungsgruppe benötigt.

Die Raumhöhe ist über das geplante oder bestehende Gebäude festgelegt. Raumhöhen $h < 3,00 \text{ m}$ werden in der DIN 18232-2 nicht betrachtet, weil davon auszugehen ist, dass sich bei dieser Höhe keine raucharme Schicht $\geq 2,50 \text{ m}$ (Mindestwert) einstellt und deshalb keine Basis für die Normbemessung gegeben ist.

Die Höhe der raucharmen Schicht ist abhängig von der Art der Nutzung und der baulichen Randbedingungen, muss aber mindestens $d = 2,50 \text{ m}$ betragen. Abhängig von der Höhe der raucharmen Schicht d wird die mindestens erforderliche Höhe der Rauchschrüzen festgelegt, die ab einer Rauchabschnittsfläche von mehr als 1600 m^2 erforderlich werden. Für raucharme Schichten $d \leq 4,00 \text{ m}$ wird gefordert, dass eine gegebenenfalls notwendige Rauchschrüze mindestens $0,50 \text{ m}$ in die vorgesehene raucharme Schicht hineinragen muss. Beträgt die angestrebte Höhe der raucharmen



Schicht $d > 4,00$ m, muss die Rauchschrzenhöhe h_{sch} mindestens der Rauchgasschichthöhe z entsprechen. Für beide Fälle aber gilt, dass $h_{sch} \geq 1,00$ m (Mindestwert) sein muss.



Legende

A_{R1}	Rauchabschnitt 1	d	Höhe der raucharmen Schicht [m]	1	raucharme Schicht
A_{R2}	Rauchabschnitt 2	z	Höhe der Rauchschicht [m]	2	Plume
A_w	Rauchabzugsfläche [m ²]	h	Raumhöhe [m]	3	Rauchschicht
A_{zu}	Zuluftöffnung [m ²]	h_{sch}	Höhe der Rauchschrze [m]		

Bild 2.1.2.1 – Schematische Darstellung der Bemessungsgrundlagen nach DIN 18232-2

Für die Ermittlung der Bemessungsgruppe ist es notwendig, die zu erwartende Brandentwicklungsdauer sowie die Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu bestimmen.

Die Brandentwicklungsdauer, der Zeitraum von der Brandentstehung bis zum Beginn der Löscharbeiten, ist unterteilt in den Zeitraum von Brandentstehung bis zur Brandmeldung und den Zeitraum von der Brandmeldung bis zum Beginn der Löscharbeiten.

Der Zeitraum von der Brandentstehung bis zur Brandmeldung muss angesetzt werden mit

- 0 Minuten,
sofern eine Brandmeldeanlage mit automatischen Brandmeldern nach DIN VDE 0833-2 (auf die Kenngröße Rauch ansprechend) oder eine ständige Personalbesetzung des zu schützenden Raumes vorgesehen ist, durch die eine sofortige Entdeckung des Brandes und Meldung an die Feuerwehr gewährleistet ist,
- 5 Minuten,
wenn automatische Brandmelder nach DIN EN 54-7 (auf die Kenngröße Rauch ansprechend) vorgesehen sind,
- 10 Minuten,
wenn keine besonderen Maßnahmen getroffen werden (Regelfall).

Die Zeitspanne von der Brandmeldung bis zum Beginn der Löscharbeiten muss angesetzt werden mit



- 5 Minuten,
sofern eine Werkfeuerwehr vorhanden ist,
- 10 Minuten (Regelfall)
bei normalen Verhältnissen,
- 15 Minuten
bei ungünstigen Verhältnissen,
- 20 Minuten
bei sehr ungünstigen Verhältnissen.

Als weitere Größe zur Festlegung der Bemessungsgruppe muss die Brandausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Sie ist abhängig von der Art der Nutzung des zu bemessenden Raumes und der Art der gelagerten Stoffe. Im Regelfall liegt eine mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit vor. Sie beträgt 0,25 m/min. Eine besonders geringe Brandausbreitungsgeschwindigkeit (0,15 m/min) ist nach DIN 18232-2 nur dann anzusetzen, wenn beispielsweise brennbare Stoffe in nichtbrennbaren Verpackungen gelagert werden. Im Mittel 0,45 m/min beträgt die besonders große Brandausbreitungsgeschwindigkeit, die unter anderem bei Lagerung leicht entflammbarer Stoffe in brennbarer Verpackung zum Ansatz kommt. Auch wenn unterschiedliche Nutzungen in den Rauchabschnitten eines Raumes vorliegen, muss die besonders große Brandausbreitungsgeschwindigkeit angesetzt werden.

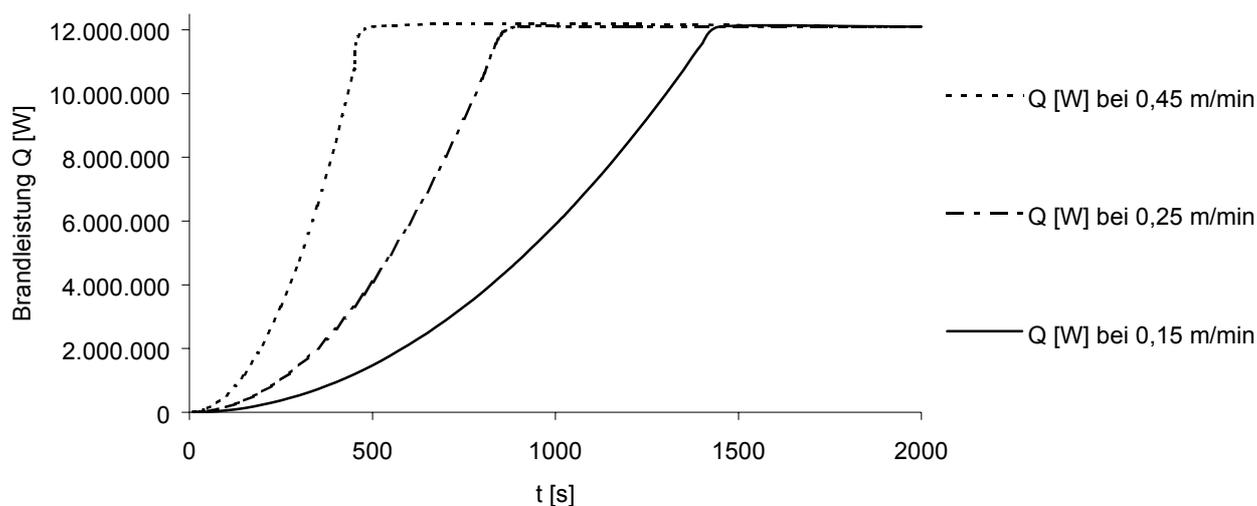
Aus Brandentwicklungsdauer und Brandausbreitungsgeschwindigkeit kann nun die Bemessungsgruppe anhand der Tabelle 2 [1] bestimmt werden.

Der jeweilige Brandverlauf für die unterschiedlichen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten wurde anhand der Vorgaben des Anhangs B der DIN 18232-2 exemplarisch für die Bemessungsgruppe 4 berechnet und in Diagramm 2.1.2.1 dargestellt.

Dem Diagramm 2.1.2.1 ist zu entnehmen, dass die nach DIN 18232-2 festgelegte Brandleistung von 12.000 kW für den Bemessungsbrand der BMG 4 gemäß der Brandausbreitungsgeschwindigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht wird.

Für die besonders langsame Brandausbreitungsgeschwindigkeit wird die maximale Brandleistung von 12.000 kW 1430 Sekunden (etwa 24 Minuten) nach Brandbeginn erreicht, bei der mittleren nach 855 Sekunden (etwa 14 Minuten) und bei der besonders schnellen nach 475 Sekunden (etwa 8 Minuten). Ab diesen Zeitpunkten wird sie jeweils als konstant angenommen, da der Bemessungsbrand entsprechend definiert ist (12.000 kW Energiefreisetzung auf 40 m² Brandfläche).

Diagramm 2.1.2.1 – Brandverläufe der verschiedenen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für die Bemessungsgruppe 4



Anhand der Bemessungsgruppe, der Raumhöhe und der Höhe der raucharmen Schicht wird nun mittels DIN 18232-2, Tabelle 3 die notwendige aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche A_w je Rauchabschnitt bestimmt. Diese ist als Mindestfläche je Rauchabschnitt vorzusehen, da die Brand- und Rauchentwicklung nicht von der Größe des betreffenden Rauchabschnitts abhängt, sondern von den zuvor beschriebenen Eingangsparametern der Tabelle 3 der DIN 18232-2.

Außerhalb dieser konventionellen Bemessung sind in der DIN 18232-2 zwei Varianten vorgesehen, die Abweichungen von den vorgenannten Bemessungsvorschriften erlauben. Sie sind als Erleichterung A und B bezeichnet. Für beide Erleichterungen gilt, dass sie ausschließlich für die Bemessungsgruppen 4 und 5 jeweils ab einer Raumhöhe $h \geq 9,00$ m angewendet werden dürfen. Die Inanspruchnahme der Erleichterungen erfordert außerdem die Existenz einer Rauchschräge mit einer Höhe von $h_{sch} \geq 1,00$ m je 1600 m² Grundfläche. Beide Erleichterungen zu kombinieren ist nicht gestattet.

Erleichterung A gestattet eine Überschreitung der Rauchabschnittsfläche um bis zu 1000 m². Dabei muss für jede angefangenen 100 m² ab 1600 m² die aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche A_w um 10 % erhöht werden.

Erleichterung B ermöglicht kleinere Rauchschrägenhöhen, sofern dies aus z.B. betrieblichen Gründen nicht anders möglich ist. Der Mindestwert von $h_{sch} \geq 1,00$ m muss jedoch eingehalten werden und der betreffende Rauchabschnitt darf nicht größer als 1600 m² sein. Wenn an den betreffenden Rauchabschnitt weitere Rauchabschnitte angrenzen, so dürfen die A_w -Werte dieser Rauchabschnitte auf jeweils 50 m² begrenzt werden. Es muss jedoch in jedem Fall der Mindestwert für A_w nach Tabelle 3 [1] als Summe aller aerodynamisch wirksamen Öffnungsflächen der Rauchabschnitte des gesamten Raumes eingehalten werden. Die Zulufffläche muss nach dem ursprünglichen A_w -Wert der Tabelle 3 [1] bestimmt werden. Schließlich wird vorausgesetzt, dass über die Handauslösestelle des betroffenen Rauchabschnittes alle NRA der benachbarten Rauchabschnitte ebenfalls geöffnet werden, da eine Unterströmung der Rauchschrägen zu erwarten ist.



Die Dimensionierung der erforderlichen Fläche der Zuluftöffnungen A_{zu} wird anhand der ermittelten aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche A_w des größten Rauchabschnittes vorgenommen. Sie beträgt $A_{zu} = 1,5 \cdot A_w$ und ist bodennah in den Außenwänden des Raumes vorzusehen. Dabei muss die Oberkante der Zuluftöffnung zur Unterseite der Rauchschrift mindestens einen Abstand von 1,00 m aufweisen. Dieser Abstand darf im Bereich von Fenstern und Türen mit einer Breite von $B \leq 1,25$ m auf 0,50 m reduziert werden. Wird der Abstand auf 2,00 m und die notwendige aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche aller Rauchabschnittsflächen des Raumes um 50 % erhöht, darf die Fläche der Zuluftöffnungen auf $A_{zu} = A_w$ reduziert werden.

2.1.3 Beispiele für die Bemessung nach DIN 18232-2

Zur Veranschaulichung der Normanwendung werden in diesem Unterkapitel verschiedene Bemessungen beispielhaft durchgeführt und erläutert. Es werden die Werte der erforderlichen aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche der NRA und der entsprechenden geometrisch freien Öffnungsfläche der Zuluftöffnungen anhand der DIN 18232-2 bestimmt.

Beispiel 1

Grundriss:

Ansicht:

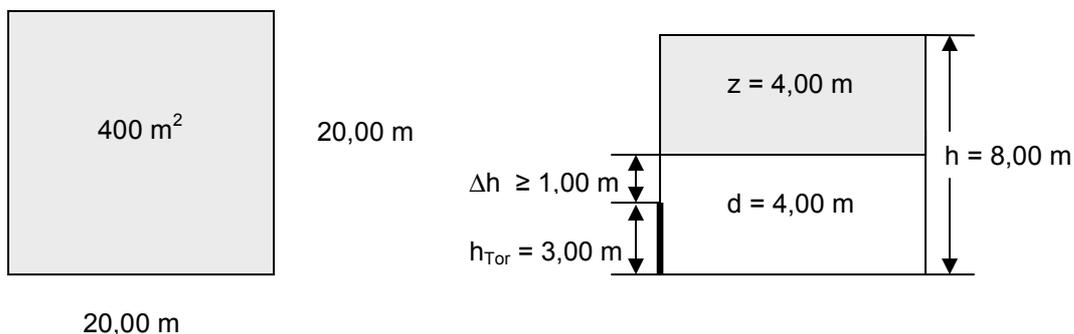


Bild 2.1.3.1 – Grundriss und Ansicht zu Beispiel 1

Randbedingungen:

Grundfläche	A = 400 m ²
Raumhöhe	h = 8,00 m
Höhe der raucharmen Schicht	d = 4,00 m
Höhe der Rauchgasschicht	z = 4,00 m
Bemessungsgruppe	BMG 4

Da die Grundfläche kleiner als 1600 m² ist, muss keine Unterteilung in Rauchabschnitte nach DIN 18232-2 vorgenommen werden.

Bemessung:



Auszug aus DIN 18232-2, Tabelle 3 – Notwendige Rauchabzugsfläche A_w in m^2 je Rauchabschnitt

Raumhöhe h [m]	Höhe der Rauchschicht z [m]	Höhe der rauch- armen Schicht d [m]	Bemessungsgruppe				
			1	2	3	4	5
8,0	4,0	4,0	3,6	5,2	6,9	8,9	11,7

Anhand der gegebenen Randbedingungen kann der Wert der notwendigen aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche der NRA abgelesen werden. Er beträgt $A_w = 8,90 m^2$. Nach diesem Wert wird nun die erforderliche geometrisch freie Fläche der Zuluftöffnungen bestimmt. Nach DIN-Vorgaben muss A_{zu} 150 % des A_w -Wertes entsprechen und ergibt sich damit zu:

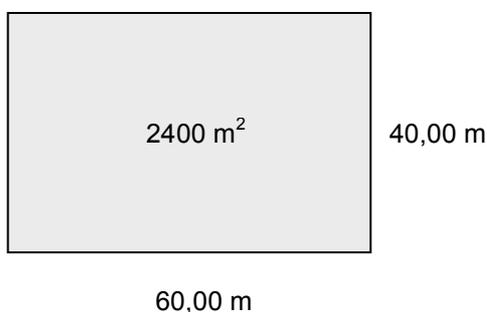
$$A_{zu} = 1,5 * 8,90 m^2 = 13,35 m^2$$

Für dieses Beispiel sollen zwei Tore mit einer Höhe von jeweils $h_{Tor} = 3,00 m$ realisiert werden. Die mindestens erforderliche Breite der Tore ergibt sich demgemäß zu:

$$B_{Tor} = A_{zu} / (2 * h_{Tor}) = 13,35 / (2 * 3,00) = 2,23 m$$

Beispiel 2a

Grundriss:



Ansicht:

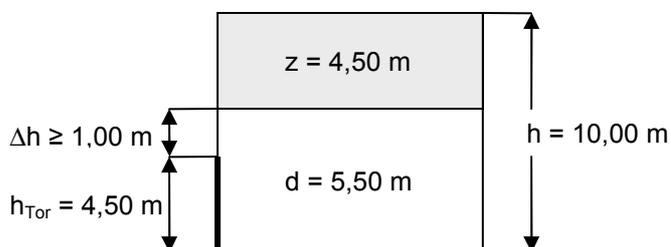


Bild 2.1.3.2 – Grundriss und Ansicht zu Beispiel 2a

Die für dieses Beispiel gewählten Randbedingungen erfüllen die Voraussetzungen für die Anwendung der Erleichterungen A oder B. In diesem Beispiel 2a bleiben sie jedoch unberücksichtigt. Zum Vergleich wird die Anwendung der Erleichterung A im Beispiel 2b anhand der gleichen Randbedingungen gezeigt.

Randbedingungen:

Grundfläche $A = 2400 m^2$



Raumhöhe $h = 10,00 \text{ m}$
 Höhe der raucharmen Schicht $d = 5,50 \text{ m}$
 Höhe der Rauchgasschicht $z = 4,50 \text{ m}$
 Bemessungsgruppe BMG 4

Da die Grundfläche mehr als 1600 m^2 beträgt, ergibt sich die Notwendigkeit einer Unterteilung in Rauchabschnitte. Durch den Einbau einer Rauchschürze werden aus den 2400 m^2 zwei Rauchabschnitte unterschiedlicher Größe gebildet. Für den ersten Rauchabschnitt wird die maximal erlaubte Größe von $A_{R1} = 1600 \text{ m}^2$ festgelegt. Es verbleiben $A_{R2} = 800 \text{ m}^2$ für den zweiten Rauchabschnitt. Die Einteilung erfolgt über eine Rauchschürze mit einer Höhe von $h_{Sch} = 4,50 \text{ m}$. Diese Höhe stellt mit $h_{Sch} = z$ nach DIN 18232-2 den Mindestwert dar, der bei $d > 4,00 \text{ m}$ eingehalten werden muss, da sie der Höhe der Rauchgasschicht entspricht.

Bemessung:

Raumhöhe $h = 10,00 \text{ m}$, Höhe der raucharmen Schicht $d = 5,50 \text{ m}$ und die Bemessungsgruppe 4 gelten für beide Rauchabschnitte.

Auszug aus DIN 18232-2, Tabelle 3 – Notwendige Rauchabzugsfläche A_w in m^2 je Rauchabschnitt

Raumhöhe $h \text{ [m]}$	Höhe der Rauchschicht $z \text{ [m]}$	Höhe der rauch- armen Schicht $d \text{ [m]}$	Bemessungsgruppe				
			1	2	3	4	5
10,0	4,5	5,5	4,8	7,4	11,1	15,4	19,7

Damit ergibt sich nach Tabelle 3 [1] der Wert $A_w = 15,40 \text{ m}^2$ als notwendige aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der NRA für jeden der beiden Rauchabschnitte. Die erforderliche geometrisch freie Fläche der Zuluftöffnungen, welche nach Norm $A_{zu} = 1,5 * A_w$ des größten Rauchabschnittes betragen muss, ergibt sich damit zu:

$$A_{zu} = 1,5 * 15,40 \text{ m}^2 = 23,10 \text{ m}^2$$

In diesem Beispiel sollen zwei Tore mit einer Höhe von jeweils $h_{Tor} = 4,50 \text{ m}$ realisiert werden. Daraus ergibt sich eine mindestens erforderliche Breite der Tore zu:

$$B_{Tor} = A_{zu} / (2 * h_{Tor}) = 23,10 / (2 * 4,50) = 2,57 \text{ m}$$

Beispiel 2b

Randbedingungen:



Bei diesem Beispiel werden dieselben Gegebenheiten wie bei Beispiel 2a zugrunde gelegt. Bei der Bemessung wird hier jedoch die Erleichterung A nach DIN 18232-2 zum Ansatz gebracht. Durch den Einbau einer Rauchschürze mit $h_{sch} = 1,00$ m wird hier nach 1600 m^2 die nach DIN 18232-2 geforderte Unterteilung vorgenommen. Damit sind wie in Beispiel 2a zwei Abschnitte der Größen $A_1 = 1600 \text{ m}^2$ und $A_2 = 800 \text{ m}^2$ gebildet worden. Die Voraussetzungen für die Anwendung der Erleichterung A nach [1] sind hiermit gegeben. Die $1,00$ m hohe Rauchschürze teilt die Fläche in Abschnitte nicht größer als 1600 m^2 , die Raumhöhe beträgt mehr als $h = 9,00$ m, es liegt die Bemessungsgruppe 4 vor und die beiden Abschnitte sind zusammen nicht größer als 2600 m^2 . Die beiden Rauchabschnitte dürfen demnach als ein Rauchabschnitt mit der Fläche $A_R = 2400 \text{ m}^2$ betrachtet werden. Dabei muss für jede ab 1600 m^2 angefangene 100 m^2 der Wert für A_w nach Tabelle 3 [1] um 10% erhöht werden.

Bemessung:

Bei der Raumhöhe von $h = 10,00$ m, der Höhe der raucharmen Schicht $d = 5,50$ m und der Bemessungsgruppe 4 ergibt sich wie in Beispiel 2a nach Tabelle 3 [1] der Wert $A_w = 15,40 \text{ m}^2$ als notwendige aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche. Hinzu kommt die nach Erleichterung A erforderliche Erhöhung um 10% je 100 m^2 über 1600 m^2 . Die erforderliche aerodynamische Öffnungsfläche der NRA bei Anwendung der Erleichterung A (A_{wEA}) ergibt sich damit zu:

$$800 \text{ m}^2 / 100 \text{ m}^2 = 8 \quad \rightarrow \quad 8 * 10 \% = 80 \% \quad \rightarrow \quad A_{wEA} = A_w + 0,8 * A_w$$

$$A_{wEA} = 15,40 + 0,8 * 15,40 = 27,72 \text{ m}^2$$

Die erforderliche geometrisch freie Fläche der Zuluftöffnungen wird somit ebenfalls um 80% größer als die des Beispiels 2a und beträgt:

$$A_{zu} = 1,5 * 27,72 \text{ m}^2 = 41,58 \text{ m}^2$$

Die mindestens erforderliche Breite der beiden Tore mit einer vorgesehenen Höhe von $h_{Tor} = 4,50$ m, ergibt sich für dieses Beispiel zu:

$$B_{Tor} = A_{zu} / (2 * h_{Tor}) = 41,58 / (2 * 4,50) = 4,62 \text{ m}$$

Beispiel 3

Randbedingungen:

Grundfläche	A =	2400 m ²
Raumhöhe	h =	12,00 m
Höhe der raucharmen Schicht	d =	10,50 m
Höhe der Rauchgasschicht	z =	1,50 m
Bemessungsgruppe	BMG	5

Grundriss:

Ansicht:

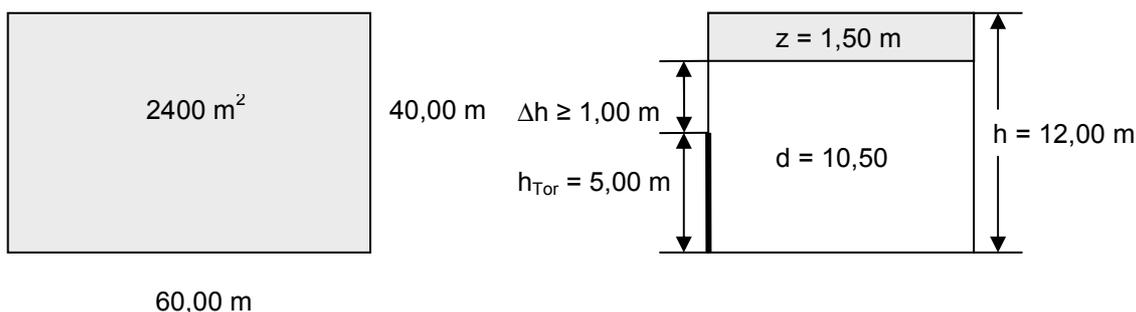


Bild 2.1.3.3 – Grundriss und Ansicht zu Beispiel 3

Durch den Einbau einer Rauchschrürze mit $h_{sch} = 1,00$ m werden hier aus den 2400 m² zwei Rauchabschnitte gebildet. Auch hier erfolgt die Einteilung der Rauchabschnitte in $A_{R1} = 1600$ m² und $A_{R2} = 800$ m². Die Voraussetzungen für die Anwendung der Erleichterung B sind hiermit gegeben. Die Fläche der einzelnen Rauchabschnitte ist nicht größer als 1600 m², die Rauchschrürzenhöhe beträgt $h_{sch} = 1,00$ m, Bemessungsgruppe 5 liegt vor und die Raumhöhe beträgt mehr als $h = 9,00$ m. Es darf nun die aerodynamisch erforderliche Rauchabzugsfläche A_w nach Tabelle 3 [1] je Rauchabschnitt auf 50 m² begrenzt werden, da mehr als ein Rauchabschnitt vorhanden ist. Gleichzeitig muss aber wenigstens der Mindestwert für A_w der Tabelle 3 [1] für den gesamten Raum erreicht werden. Es müssen außerdem über die Handauslösestelle des betroffenen Rauchabschnittes alle NRA des benachbarten Rauchabschnittes mit geöffnet werden. Des Weiteren ist die Zulufffläche mindestens auf den A_w -Wert der Tabelle 3 [1] abzustimmen.

Bemessung:

Raumhöhe $h = 12,00$ m, Höhe der raucharmen Schicht $d = 10,50$ m und die Bemessungsgruppe 5 gelten für beide Rauchabschnitte.

Auszug aus DIN 18232-2, Tabelle 3 – Notwendige Rauchabzugsfläche A_w in m² je Rauchabschnitt

Raumhöhe h [m]	Höhe der Rauchschrürze z [m]	Höhe der rauch- armen Schicht d [m]	Bemessungsgruppe				
			1	2	3	4	5
12,0	1,5	10,5	36,5	38,8	42,5	58,7	95,4

Damit ergibt sich nach Tabelle 3 [1] der Wert $A_w = 95,40$ m² als notwendige aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der NRA für jeden der beiden Rauchabschnitte. Nach Erleichterung B darf nun für jeden der beiden Rauchabschnitte $A_w = 95,40$ m² reduziert werden auf $A_{wEB} = 50,00$ m². Der in Tabelle 3 [1] angegebene Wert für A_w muss mindestens für den gesamten Raum erreicht werden:

$$2 * A_{wEB} \geq A_w \rightarrow 2 * 50,00 \text{ m}^2 = 100,00 \text{ m}^2 \geq 95,40 \text{ m}^2 \rightarrow \text{Forderung erfüllt}$$



Die erforderliche geometrisch freie Fläche der Zuluftöffnungen muss auf den A_w -Wert der Tabelle 3 [1] abgestimmt werden und beträgt:

$$A_{zu} = 1,5 * 95,4 \text{ m}^2 = 143,10 \text{ m}^2$$

Aufgrund der Festlegung einer Torhöhe von $h_{\text{Tor}} = 5,00 \text{ m}$ und zwei Toren ergibt sich eine mindestens erforderliche Breite der Ein- und Ausfahrten von:

$$B_{\text{Tor}} = A_{zu} / (2 * h_{\text{Tor}}) = 143,10 / (2 * 5,00) = 14,31 \text{ m}$$

2.2 Ingenieurmäßige Methoden

Die für diese Arbeit verwendeten ingenieurmäßigen Methoden sind das Zonen- und das Feldmodell. Sie werden in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

2.2.1 Zonenmodell

Starke Vereinfachungen der Grundgleichungen für die Erhaltung der Masse, des Impulses und der Energie bilden die Basis der Zonenmodelle. Dabei handelt es sich meist um integrale Formen der Erhaltungsgleichungen, mittels derer größere Kontrollvolumina beschrieben werden können.

Zonenmodelle basieren auf der Annahme der Bildung zweier Schichten (Zonen) im Brandfall, eine heiße Rauchgasschicht und eine kältere, darunter liegende raucharme Schicht, welche die Kontrollvolumina darstellen. Den Zonen werden mittlere Werte für Dichte, Konzentration und Temperatur zugewiesen. Ihre innere Struktur wird dabei vernachlässigt. Die Ausbildung des Plumes (Rauchgassäule), die Einmischung von Umgebungsluft in den Plume und andere bei einem Brand auftretende Prozesse werden durch Beziehungen beschrieben, die aus Versuchsergebnissen abgeleitet wurden.

Das hier verwendete Zonenmodell CFAST (Version 3.1.6) [9] wurde vom National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, entwickelt.

CFAST dient zur Berechnung der Ausbreitung von Wärme und Rauch innerhalb eines Gebäudes während eines Brandes. Mit der Version 3.1.6 können bis zu 30 Räume/Segmente modelliert werden, deren Verhältnis von Höhe zur Fläche variabel gestaltet werden kann. Darüber hinaus können verschiedene Brandquellen simuliert werden, auch können Sprinkler und Brandmelder berücksichtigt werden. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt graphisch und numerisch.

2.2.2 Feldmodell

Hinter dem Begriff Feldmodell steht ein Verfahren, welches die Variablen Druck, Temperatur, Dichte, Geschwindigkeit und Stoffkonzentration, die in den hydrodynamischen Grundgleichungen enthalten sind, instationär (als Funktion des Ortes und der Zeit) berechnet.



Das hier verwendete Programm FDS (Fire Dynamics Simulator, Version 3.1) [6, 7] ist ein dynamisches Feldmodell (Computer Fluid Dynamics CFD), auf Personalcomputern lauffähig, zur vollständigen dreidimensionalen Berechnung sowohl der skalaren als auch der vektoriellen Größen, die für die Beschreibung von Rauch- und Wärmeausbreitung von Belang sind. Es wurde vom National Institute of Standards and Technology (NIST), USA, für die Bemessung und Steuerung von Entrauchungsmaßnahmen sowie für die Bestimmung thermischer Belastung bei Wohn- und Industrieabbränden entwickelt. Das Programm bietet die Möglichkeit, auch komplexe Raumgeometrien, unterschiedliche Lüftungsverhältnisse und andere wichtige Komponenten der brandschutztechnischen Beurteilung (z. B. Sprinklerung oder mechanische Lüftungseinrichtungen) zu berücksichtigen.

Das Volumen des zu betrachtenden Gebäudeabschnitts wird in sehr kleine Teilvolumina (Gitterzellen) unterteilt. Auf den Gitterzellen werden die fundamentalen Erhaltungsgleichungen für Energie, Masse und Impuls gelöst. Es ist eine spezielle Form der Navier-Stokes Gleichungen, die bei FDS numerisch gelöst wird. Diese ist vornehmlich für die Berechnung thermisch angeregter Strömungen mit Betonung auf Rauch- und Wärmetransport geeignet. Als Ergebnis erhält man die eingangs beschriebenen Variablen als ort- und zeitabhängige Werte.

Mit der Version 3.1 ist überdies die Beschreibung des Sauerstoffverbrauchs und der Entstehung von Verbrennungsprodukten mittels eines integrierten Verbrennungsmodells möglich. Gegenüber der ersten Programmversion ist das Modell für den durch Strahlung bedingten Wärmetausch erweitert worden. Neben Energietausch zwischen Festkörperoberflächen und Flamme berücksichtigt die neue Version auch die Emission und Absorption von Strahlung im Gasvolumen.

Mittels des Programms SMOKEVIEW [8] werden die Ergebnisse aufbereitet und visualisiert.

2.3 Gefährdung durch Rauchgas

Schlechte Sichtverhältnisse und hohe Konzentrationen an toxischen Stoffen sind die Faktoren bei einem Brandereignis, die Flucht- und Rettungsmöglichkeiten stark einschränken oder unmöglich machen.

Deshalb wird in der DIN 18232-2 die Bemessung von Entrauchungsmaßnahmen geregelt, die das Vorhandensein einer raucharmen Schicht gewährleisten sollen. Es wird hier jedoch nicht festgelegt, was der Begriff raucharm beinhaltet. Es werden keine Angaben zu Brandprodukten oder deren Konzentration gemacht, sondern vielmehr davon ausgegangen, dass in der raucharmen Schicht ungefährliche Konzentrationen der Brandprodukte vorliegen.

Um die Ergebnisse des Feldmodells einer Bewertung zuführen zu können, ist es jedoch von Bedeutung, welche Konzentration der gasförmigen Brandprodukte als toxisch anzusehen ist oder zu starker Sichtbehinderung führt, da es nicht wie die Zonenmodelle und auch die Norm von einer einfachen Schichtbildung ausgeht, sondern hierbei die Konzentrationen der Brandprodukte betrachtet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Bewertung der Feldmodell-Ergebnisse anhand der Rußkonzentration vorgenommen. Die Rußkonzentration ist ein geeigneter Indikator für die Raucharmut, da „...die ausreichende Verdünnung von Ruß auch für die ausreichende Verdünnung von CO und CO₂ abdeckend...“ [3] ist. Diese These wird in dem vfdb-Beitrag über „Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung“ [3]



von Dr. rer. nat. W. Siegfried und Dipl.-Phys. J. Will plausibel hergeleitet. Sie greifen verschiedene Untersuchungen hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen dem Extinktionskoeffizienten (siehe unten) und der Rußkonzentration auf und kommen zu dem Schluss, dass die Festlegung eines Grenzbereiches für Ruß ausreichend ist, um ausreichende Sichtverhältnisse zu schaffen, die gleichzeitig ausreichend niedrige Konzentrationen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid gewährleisten. Dieser Grenzbereich liegt zwischen 25 mg und 65 mg Ruß pro Kubikmeter Rauchgas. Die Anlage 1 enthält eine Zusammenstellung der CO-, CO₂- und Rußausbeuten einiger ausgewählter Materialien.

Die Einschränkung der Sichtweite durch Rauch beruht hauptsächlich auf der Absorption von Licht durch die im Rauch enthaltenen Partikel (Ruß), die durch den Extinktionskoeffizient k [m^{-1}] (oder die optische Dichte pro Weglänge D_L) quantifiziert wird. Die toxische Wirkung der Brandgase geht von CO und CO₂ aus. Bei zu hoher Konzentration oder zu langer Einwirkungsdauer führen sie zu Handlungs- oder Bewegungsunfähigkeit sowie zur Bewusstlosigkeit und verhindern damit die Selbstrettung.

3 Vorgehensweise bei der Anwendung des Zonenmodells

Im Rahmen dieser Arbeit werden Berechnungen durchgeführt, die in der Hauptsache mit dem Zonenmodell CFAST erfolgen. In den Unterkapiteln 3.2 und 3.3 werden die Eingabedaten und Rechenabläufe hierfür zusammengestellt und erläutert. Die Ergebnisse werden anschließend dargestellt und analysiert.

3.1 Konkretisierung der Zielsetzung

Das Ziel der Berechnungen dieser Arbeit ist es, mit anderen ingenieurmäßigen Methoden zu zeigen, dass eine Anwendung der DIN 18232-2 über deren Gültigkeitsbereich hinaus möglich ist. Es sollen Alternativen der Normanwendung auf Rauchabschnitte $> 1600 \text{ m}^2$ entwickelt werden, anhand derer gezeigt werden soll, dass eine Anwendung der Norm auch für diese großen Rauchabschnitte unter Einhaltung der Bemessungsziele möglich ist.

Der Ansatz für die Alternativen liegt dabei hauptsächlich bei der Erleichterung A nach DIN 18232-2. Hierbei wird für die Bemessungsgruppen 4 und 5 ab einer Raumhöhe von $h = 9,00 \text{ m}$ die Bildung großer Rauchabschnitte von maximal 2600 m^2 gestattet¹. Es muss jedoch nach höchstens 1600 m^2 eine Rauchschürze von $h_{\text{sch}} \geq 1,00 \text{ m}$ vorgesehen werden. Darüber hinaus muss die erforderliche aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der NRA je angefangene 100 m^2 über 1600 m^2 um 10 % erhöht werden.

Aufgrund betrieblicher Erfordernisse ist es häufig unerwünscht oder nicht möglich, Rauchschürzen vorzusehen. Hier wäre die Anwendung der Erleichterung A interessant, wenn die Rauchschürzen bei der Bildung des 2600 m^2 großen (oder auch größeren) Rauchabschnittes entfallen dürften. Da dem nicht so ist, stellt die Erleichterung A keine echte Erleichterung dar, denn ob eine niedrige oder eine etwas

¹ Für Rauchabschnitte $> 2600 \text{ m}^2$ gibt es nach DIN 18232-2 keine Ansätze zur Bemessung.



höhere Rauchschürze vorgesehen werden muss, erzeugt nur einen geringfügigen Unterschied. Der Nutzen beziehungsweise die Wirkung der Rauchschürze wird dabei nicht klar benannt. Denn selbst für den Fall, dass eine Rauchschichthöhe von $z = 1,00$ m vorgesehen ist, ist davon auszugehen, dass die Rauchschürze mit $h_{sch} = 1,00$ m unterströmt wird. Indes ist die Festlegung einer Rauchschichthöhe von $z = 1,00$ m ($= \min. h_{sch}$) eher unwahrscheinlich, da um eine solche zu erreichen außerordentlich viele NRA erforderlich sind. Demgemäß ist bei der Erleichterung A nach DIN 18232-2 von einer planmäßigen Unterströmung der Rauchschürze auszugehen.

3.2 Zusammenstellung der Parameter

Im Hinblick auf den vorgegebenen Zeitrahmen dieser Arbeit wird eine punktförmige Auswahl der Parameter zur Bestimmung der Eingangsdaten für die Berechnungen mittels des Zonenmodells getroffen. Die Auswahl erfolgt in der Weise, dass mittels der Zonenmodell-Berechnungen gezeigt werden kann, dass eine Anwendung der DIN 18232-2 über deren Gültigkeitsbereich hinaus möglich ist beziehungsweise der Bildung von Rauchabschnitten bis zu einer Größe von 3600 m^2 nichts entgegensteht.

1. Grundrissgröße

Die Grundrissgrößen sind vorwiegend anhand der Vorgaben der DIN 18232-2 gewählt. Es sind dies die Flächen von 1600 m^2 , 2000 m^2 , 2600 m^2 und 3600 m^2 , die als einfache rechteckige Grundrisse dargestellt werden wie auch in [1].

1600 m^2 stellt die obere Grenze der Norm ohne Anwendung der Erleichterung A und 2600 m^2 die obere Grenze mit Anwendung der Erleichterung A dar.

Die Betrachtung der Fläche von 2600 m^2 ist besonders interessant im Hinblick auf die Erläuterungen bezüglich der Erleichterung A zu Beginn dieses Unterkapitels. Denn bereits die theoretische Beleuchtung der Erleichterung A führt zu dem Fazit, dass die geforderte Rauchschürze möglicherweise unnötig ist und damit die Ausweitung des Anwendungsbereiches der DIN 18232-2 bis zu Rauchabschnittsgrößen von 2600 m^2 bereits ausreichend begründet ist. Diese Ausweitung bleibt bei der theoretischen Betrachtung jedoch auf Raumhöhen $\geq 9,00$ m und die Bemessungsgruppen 4 und 5 beschränkt. Die Berechnungen werden daneben auch für Raumhöhen $< 9,00$ m durchgeführt, um für diesen Bereich ebenfalls eine Aussage zu einer möglichen Erweiterung der Anwendungsgrenze treffen zu können.

Die Wahl des 3600 m^2 Grundrisses ist darin begründet, dass sich nach einem von Wilk durchgeführten Brandversuch in einer 3600 m^2 Halle eine stabile Schichtung ausgebildet hat [10]. Der Versuch wurde mit der geringen Brandleistung von nur 690 kW durchgeführt. Es ist deshalb davon auszugehen, dass das Zonenmodell bis zu dieser Rauchabschnittsgröße anwendbar ist, da bei der für die Berechnungen zugrunde gelegten Brandleistung von 12.000 kW noch eher mit einer Schichtbildung zu rechnen ist, da die Temperaturen der Rauchschicht weit größer sind als bei einer Brandleistung von 690 kW . Die



Bildung einer stabilen Schichtung stellt die Grundvoraussetzung für die Anwendung des Zonenmodells wie auch für die Anwendung der DIN 18232-2 dar.

Die Fläche von 2000 m^2 wurde als Zwischengröße gewählt, um nicht ausschließlich die Grenzbereiche zu betrachten.

Eine Betrachtung von Flächen $< 1600 \text{ m}^2$ wurde nicht vorgenommen, da sich das Thema dieser Arbeit auf Rauchabschnittsflächen bezieht, die nicht mehr nach Norm bemessen werden dürfen. Auf kleinere Flächen als 1600 m^2 ist die Norm anwendbar und es ist deshalb keine Untersuchung erforderlich.

Die Grenze der Normanwendung (1600 m^2) ist in die Berechnungen aufgenommen worden. Es ist davon auszugehen, dass Übereinstimmungen oder Abweichungen bei Ergebnissen für die 1600 m^2 als Indizien für Stimmigkeit oder Unstimmigkeit im unteren Bereich gewertet werden können.

2. Raumhöhe

Die Nachweisführung hinsichtlich der Ausweitung des Anwendungsbereiches der DIN 18232-2 orientiert sich in der Hauptsache an der Erleichterung A. Diese gilt erst ab Raumhöhen $> 9,00 \text{ m}$. Es stellt sich die Frage, ob die planmäßige Unterströmung der Rauchschräge (vgl. Kap. 3.1, s. 19) nicht auch bei Raumhöhen $< 9,00 \text{ m}$ stattfinden darf. Es soll deshalb untersucht werden, inwieweit diese Festlegung Sinn macht und ob die Grenze möglicherweise tiefer gesteckt werden kann. Es wurden deshalb Raumhöhen sowohl oberhalb als auch unterhalb der $9,00 \text{ m}$ ausgewählt: $6,00 \text{ m}$, $8,00 \text{ m}$, $10,00 \text{ m}$, $12,00 \text{ m}$. Auf die Betrachtung von Raumhöhen $< 6,00 \text{ m}$ wurde verzichtet, da in diesem Bereich nicht in jedem Fall von einer störungsfreien Gestaltung der Zuluftbedingungen auszugehen ist und die Betrachtung von Einzelfällen nicht das Ziel dieser Arbeit ist.

Der Abstand zwischen der OK von Zuluftöffnungen und der UK der Rauchgasschicht muss nach DIN 18232-2 mindestens $1,00 \text{ m}$ betragen, um Verwirbelungen durch Zuluftinflüsse in diesem Bereich zu vermeiden. Bei einer Raumhöhe von $h = 5,00 \text{ m}$ und einer Torhöhe von $h_{\text{Tor}} = 3,00 \text{ m}$ bleibt bei Einhaltung des Mindestabstandes der OK der Zuluftöffnung zur Rauchschräge von $1,00 \text{ m}$ eine Höhe der raucharmen Schicht von $d = 4,00 \text{ m}$ beziehungsweise darf die Rauchschräghöhe nur $z = 1,00 \text{ m}$ betragen. Die Realisierung einer dermaßen geringen Rauchschräge erfordert eine enorm große aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der NRA. Dabei bleibt es fraglich, ob sich diese geringe Rauchschräghöhe tatsächlich einstellt und nicht doch Verwirbelungen in den Bereichen der Zuluftführung auftreten. Dies ist jedoch ein offenes Thema und nicht Gegenstand dieser Arbeit. Um diesbezügliche Probleme zu vermeiden und eine sinnvolle Anwendung (unter Berücksichtigung üblicher Torhöhen) auf Raumhöhen $> 6,00 \text{ m}$ zu gewährleisten, werden die Bemessungsziele (Höhen der raucharmen Schicht) für die Berechnungen wie folgt festgelegt.

3. Höhe der raucharmen Schicht

Die Berechnungen für die vorgenannten Größen werden für Höhen der raucharmen Schicht von $d = 4,00 \text{ m}$ und $d = 5,00 \text{ m}$ durchgeführt. Diese wurden aufgrund der durchschnittlichen Torhöhen von $h_{\text{Tor}} = 2,00 \text{ m}$ bis $4,00 \text{ m}$ festgelegt. Als Mittelwert ist die Höhe der Zuluftöffnungen in sämtlichen CFAST-Berechnungen mit $3,00 \text{ m}$ angenommen worden. Für $d = 4,00 \text{ m}$ ist damit der mindestens



geforderte Abstand von 1,00 m (OK Zuluft zu UK Rauchschicht) eingehalten. Bei $d = 5,00$ m ist er doppelt so groß wie erforderlich.

4. Bemessungsgruppe

Es wurde die Bemessungsgruppe 4 als Grundlage gewählt. Voraussetzung für die Anwendung der Erleichterung A nach DIN 18232-2 sind die Bemessungsgruppen 4 und 5. Für die BMG 4 ergeben sich kritischere Bedingungen als für BMG 5, da eine geringere Brandleistung für den Bemessungsbrand erforderlich ist und deshalb geringere Rauchgastemperaturen erreicht werden. Die Gefahr des Absinkens der Rauchschicht in vom Brandherd entfernten Bereichen ist daher bei der BMG 4 eher gegeben als bei BMG 5.

3.3 Zonenmodell-Berechnungen

Die Durchführung von Simulationen mit CFAST erfordert die Eingabe der Anzahl und Größe (Abmessungen) der Rauchabschnitte, der Raumhöhe sowie der Zu- und Abluftöffnungen. Darüber hinaus erfolgt die Eingabe des Brandverlaufs, der sich nach DIN 18232-2 für die Bemessungsgruppe 4 bei mittlerer Brandausbreitungsgeschwindigkeit ergibt (vgl. Diagramm 2.1.2.1). Dies ist notwendig um Ergebnisse zu erhalten, die mit [1] vergleichbar sind, da die BMG 4 als Grundlage für die Bemessung der Zu- und Abluftöffnungen gewählt wurde. Die Dauer der Rechenläufe wird auf 1600 Sekunden festgesetzt. Zu diesem Zeitpunkt ist davon auszugehen, dass stationäre Bedingungen vorherrschen.

CFAST ist ein Mehrraum-Mehrzonenmodell mit dem sowohl Einraum-Rechnungen als auch Mehrraum-Rechnungen durchgeführt werden können. Bei den Einraum-Rechnungen wird jeweils nur ein Raum/Segment vorgesehen. Es ist hierbei nicht möglich, mehrere Rauchabschnitte zu bilden. Einzelne Rauchabschnitte können jedoch über die Mehrraum-Rechnungen realisiert werden, bei denen mehrere Segmente vorgesehen werden. Diese Segmente sind zunächst untereinander abgetrennte Räume, deren Größe frei wählbar ist. Es besteht die Möglichkeit, zwischen den Segmenten Öffnungen anzuordnen, über die beispielsweise Rauchschürzen simuliert werden können.

Bei Einraum-Rechnungen ergeben sich bei sonst gleichen Eingaben stets günstigere Werte als bei Mehrraum-Rechnungen. Dies ist darin begründet, dass an den Segmentschnittstellen Überströmeffekte beziehungsweise zusätzliche Einmischungen von Umgebungsluft Berücksichtigung finden [26]. Die Berechnungen werden deshalb als Mehrraum-Rechnungen durchgeführt. Es muss dazu eine Festlegung getroffen werden, ab welcher Größe segmentiert werden soll. Dies ist notwendig, da sich für die verschiedenen Möglichkeiten bei der Größenwahl der Segmente sehr viele Berechnungsvarianten für einen einzigen Grundriss ergeben.

Der Grundriss von 1600 m^2 wird als ein Segment berechnet. Diese Größe entspricht nach DIN 18232-2 der maximal zulässigen Rauchabschnittsfläche bei konventioneller Anwendung. Räume mit einer Fläche $> 1600 \text{ m}^2$ müssen nach DIN 18232-2 in mehrere Rauchabschnitte unterteilt werden. Analog dazu werden Grundrisse $> 1600 \text{ m}^2$ für die CFAST-Berechnungen in Segmente geteilt. Es sind dies die Grundrisse der Größen 2000 m^2 , 2600 m^2 und 3600 m^2 .



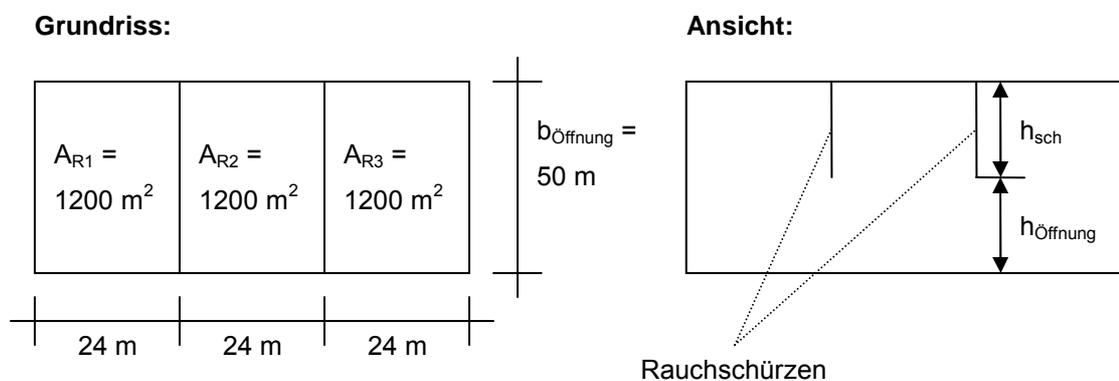
Sie werden für die Mehr-Raum-Rechnungen in zwei beziehungsweise drei Segmente gleicher Größe geteilt:

$$2000 \text{ m}^2 \equiv 2 \times 1000 \text{ m}^2$$

$$2600 \text{ m}^2 \equiv 2 \times 1300 \text{ m}^2$$

$$3600 \text{ m}^2 \equiv 3 \times 1200 \text{ m}^2$$

Dadurch ist es möglich, einzelne Rauchabschnitte zu simulieren. Die dafür notwendigen Rauchschürzen werden über die Dimensionierung der Öffnungen zwischen den einzelnen Segmenten erzeugt. Das Bild 3.3.1 zeigt beispielhaft die Bildung der Segmente für den Grundriss der Größe 3600 m² für die Mehr-Raum-Rechnung mit CFAST.



Legende

- A_{Ri} Segmentfläche
- h_{sch} Höhe der Rauchschürze
- $h_{\text{Öffnung}}$ Höhe der Öffnung zwischen den Segmenten
- $b_{\text{Öffnung}}$ Breite der Öffnung zwischen den Segmenten

Bild 3.3.1 – Segmenteinteilung für den Grundriss der Fläche 3600 m²

Es ist das Ziel dieser Arbeit, Möglichkeiten der Anwendung der DIN 18232-2 oberhalb der von ihr festgelegten maximalen Rauchabschnittsgröße zu finden. In der Hauptsache wird die Möglichkeit des Wegfalls der nach DIN 18232-2 geforderten Rauchschürzen untersucht. Da es darum geht, die DIN 18232-2 selbst auf die durch den Wegfall der Rauchschürzen entstehenden großen Rauchabschnitte anzuwenden, werden die Datensätze für die CFAST-Berechnungen anhand der Norm bestimmt. Es werden die erforderlichen aerodynamisch wirksamen Öffnungsflächen und die Zuluffflächen nach der Tabelle 3 der DIN 18232-2 entsprechend der jeweiligen Eingangsparameter (Bemessungsgruppe, Bemessungsziel, Raumhöhe) ermittelt. Diese sind nach [1] gültig für Rauchabschnitte von 200 m² bis 1600 m². Demgegenüber soll im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeit der Anwendung der Norm außerhalb dieser Anwendungsgrenzen geprüft werden.



Im Folgenden werden die einzelnen Rechenläufe sowie deren Zweck erläutert.

Rechenlauf 1 (RL 1) – Kontrolle der DIN 18232-2 ohne Anwendung der Erleichterung A

Für die Berechnungen des Rechenlaufs RL 1 wird die Auslegung nach DIN 18232-2 vorgenommen. Die in Kapitel 3.2 ausgewählten Grundrissgrößen werden für die Eingabe in CFAST entsprechend DIN 18232-2 in einzelne Rauchabschnitte gegliedert. In CFAST wird demgemäß jede Rauchabschnittsfläche A_R als ein Segment vorgesehen, dem die jeweils erforderlichen Werte für A_w und A_{zu} für die gewählten Bemessungsziele (vgl. Anlage 2, Tabellen A2.2 und A2.3) zugeordnet werden. Die Öffnungen der Segmente untereinander (vgl. Bild 3.3.1) werden so gewählt, dass die nach [1] erforderlichen Rauchschrüzen simuliert werden. Nach [1] muss für die Berechnungen anhand des Bemessungszieles $d = 4,00$ m die Rauchschrüzenhöhe mindestens $h_{sch} = (h - d) + 0,50$ m betragen und für $d = 5,00$ m sind mindestens $h_{sch} = (h - d)$ vorzusehen (vgl. Anlage 2, Tabelle A2.1).

In diesem Rechenlauf erfolgt ausschließlich die konventionelle Anwendung der DIN 18232-2 ohne Anwendung der Erleichterung A.

Rechenlauf 2 (RL 2) – Kontrolle der DIN 18232-2 mit Anwendung der Erleichterung A

Die Berechnungen dieses Rechenlaufes RL 2 werden analog zu Rechenlauf 1 anhand der Auslegung nach DIN 18232-2 vorgenommen, hier jedoch ausschließlich unter Anwendung der Erleichterung A. Es wird demnach nur für die Raumhöhen von 10 und 12 Metern gerechnet, da die Erleichterung A erst ab einer Raumhöhe von 9 Metern angewendet werden darf. Weiterhin erfolgt die Anpassung der Rauchschrüzenhöhe auf die nach [1] geforderte Mindesthöhe von $h_{sch} = 1,00$ m.

Die Eingabedaten für diesen Rechenlauf sind in der Anlage 2, Tabellen A2.4 und A2.5 zusammengestellt.

Da die Eingangswerte der Rechenläufe 1 und 2 für CFAST anhand der Höhe der raucharmen Schicht nach DIN 18232-2 festgelegt wurden und die sonstigen Randbedingungen ebenfalls eingehalten werden, stellt dieser Rechenlauf eine Kontrolle dar und ermöglicht damit eine Bewertung der Auslegung nach Norm.

Rechenlauf 3 (RL 3) – Bildung großer Rauchabschnitte – Wegfall der Rauchschrüzen

Dieser Durchgang wird analog zu Rechenlauf 1 durchgeführt, das heißt die Berechnungen werden mit segmentierten Flächen durchgeführt. Im Unterschied zu RL 1 werden jedoch die trennenden Rauchschrüzen entfernt. Demzufolge werden mehrere Segmente vorgesehen, die aufgrund der fehlenden Rauchschrüzen jeweils zusammenhängende Rauchabschnitte der Größen 2000 m^2 , 2600 m^2 und 3600 m^2 bilden. Die Tabellenwerte (vgl. Anlage 2, Tab. A2.2 und A2.3) werden in diesem Rechendurchgang unverändert für alle Rauchabschnitte $> 1600 \text{ m}^2$ angewendet, obwohl diese außerhalb der nach DIN 18232-2 gültigen Rauchabschnittsgrößen liegen.

Es wird hier untersucht, inwieweit die nach Norm ermittelten Daten auf Rauchabschnitte $> 1600 \text{ m}^2$ anwendbar sind beziehungsweise inwieweit die Begrenzung der Rauchabschnittsgröße auf maximal 1600 m^2 für die in der Norm angegebenen Werte notwendig ist.



Parallel zu diesem Rechenlauf wurde die Berechnung ohne Segmentierung (Einraum-Rechnung) durchgeführt. Es ergaben sich daraus keine zielführenden Ergebnisse (vgl. Anlage 8), sie werden deshalb im Hauptteil nicht diskutiert.

Rechenlauf 4 (RL 4) – Bildung großer Rauchabschnitte – Wegfall der Rauchschrüzen – Verwendung erhöhter Eingabedaten

Aufgrund der Ergebnisse des Rechenlaufs 3 (vgl. Anlage 5) ergibt sich die Notwendigkeit, eine Erhöhung der nach DIN 18232-2, Tabelle 3 ermittelten Werte für A_w und A_{zu} vorzunehmen, um zu prüfen, ob mit diesen Werten die Bemessungsziele nach DIN 18232-2 für alle Rauchabschnittsflächen $> 1600 \text{ m}^2$ erreicht werden. Es soll jedoch weiterhin nicht von der Ermittlung der A_w und A_{zu} nach Norm abgewichen werden, da es nach wie vor um eine mögliche Anwendung derselben auf Rauchabschnitte $> 1600 \text{ m}^2$ geht. Deshalb werden in diesem Rechenlauf Daten verwendet, die in Anlehnung an die Erleichterung A nach [1] ermittelt wurden. Diese Werte entsprechen einer flächenbezogenen Erhöhung (vgl. Kap. 2.1.3, S. 14, Bsp. 2b) gegenüber den Mindestwerten der Tabelle 3 nach [1]. Danach werden bei einer Fläche von 2000 m^2 A_w und A_{zu} auf 140 % der Tabellenwerte erhöht, für 2600 m^2 auf 200 % und für die Rauchabschnittsfläche von 3600 m^2 auf 300 %. Die Werte sind in der Anlage 2, Tabellen A2.6 und A2.7 zusammengestellt. Die Berechnung erfolgt auch hier anhand von segmentierten Flächen (vgl. 3.3, S. 22), die nicht untereinander abgetrennt sind, sondern jeweils einen großen Rauchabschnitt bilden.

Dieser Durchgang stellt wie auch RL 3 eine Möglichkeit der Normanwendung außerhalb ihres Gültigkeitsbereiches dar. Es wird geprüft, ob die Bemessungsziele nach [1] mittels der erhöhten Eingangsdaten für alle Rauchabschnittsflächen erreicht werden.

Rechenlauf 5 (RL 5) – Bildung großer Rauchabschnitte – Wegfall der Rauchschrüzen – Verwendung extrapoliertes Eingabedaten

Die Ergebnisse des Rechenlaufs 4 ergeben Werte, die weit oberhalb der zu erreichenden Bemessungsziele liegen (vgl. Anlage 6). Es wird deshalb aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ein weiterer Rechenlauf RL 5 notwendig. In diesem werden die Eingabedaten wie in RL 4 flächenbezogen erhöht, jedoch auf einer anderen Grundlage. Die Erhöhung wird anhand des Flächenverhältnisses der jeweiligen Rauchabschnittsgröße zur Fläche der oberen Grenze der Norm (1600 m^2) bestimmt. Als Proportionalitätsfaktoren zur Erhöhung von A_w und A_{zu} ergeben sich

$$\text{für die Rauchabschnittsfläche von } 2000 \text{ m}^2 \quad : \quad \frac{2000}{1600} = 1,25 ,$$

$$\text{für die Rauchabschnittsfläche von } 2600 \text{ m}^2 \quad : \quad \frac{2600}{1600} = 1,62 ,$$

$$\text{für die Rauchabschnittsfläche von } 3600 \text{ m}^2 \quad : \quad \frac{3600}{1600} = 2,25 .$$



Die nach Tabelle 3 der DIN 18232-2 ermittelten Werte werden entsprechend dieses Verhältnisses extrapoliert, das heißt A_w und A_{zu} werden mit Hilfe der Proportionalitätsfaktoren den Rauchabschnittsgrößen $> 1600 \text{ m}^2$ angepasst. Die extrapolierten Werte sind der Anlage 2, Tabellen A2.8 und A2.9 zu entnehmen.

Dieser Durchgang stellt nach RL 3 und RL 4 eine weitere Möglichkeit der Normanwendung außerhalb des Gültigkeitsbereiches dar. Es wird geprüft, ob die Bemessungsziele nach DIN 18232-2 mittels der extrapolierten Eingangsdaten erreicht werden.

Die in der Anlage 2 zusammengestellten Tabellen enthalten neben den Werten für die aerodynamisch wirksamen Öffnungsfläche A_w ebenfalls die Werte der entsprechenden erforderlichen geometrisch freien Öffnungsfläche A_g der NRA (vgl. Kap. 7.5). Die geometrisch freie Öffnungsfläche ist für die Berechnungen mittels des Zonenmodells und des Feldmodells zu verwenden, da bei beiden der Durchflussbeiwert c_v zur Umrechnung von A_g ($= A_w / c_z$) berücksichtigt wird.

4 Darstellung und Zusammenfassung der Zonenmodell-Ergebnisse

Es erfolgt zunächst die Darstellung der durch CFAST ermittelten Höhen der raucharmen Schicht in Form von Diagrammen. Die entsprechenden Werte können den Tabellen der Anlagen 3 bis 7 entnommen werden. Die sich aus den Diagrammen ergebenden Erkenntnisse werden beschrieben und bewertet. Im Anschluss daran erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

4.1 Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 – Kontrolle der Norm ohne Anwendung der Erleichterung A

Für die Berechnungen des Rechenlaufs RL 1 (vgl. Kap. 3.3, S. 23) wurde die Auslegung nach DIN 18232-2 vorgenommen. Das Diagramm 4.1.1 zeigt die Ergebnisse des RL 1. Es werden hier nur die Ergebnisse für den Rauchabschnitt dargestellt, in dem sich der Brandherd befindet (Brandraum), da wegen der vorgesehenen Rauchschrägen kein Raucheintrag in andere Rauchabschnitte erfolgt (vgl. Anlage 3).

Dem Diagramm 4.1.1 ist zu entnehmen, dass die mit CFAST ermittelten Werte für die Brandräume aller Grundrissgrößen oberhalb des jeweiligen Bemessungszieles liegen. Die Differenz zwischen der Höhe der raucharmen Schicht nach CFAST und dem Bemessungsziel nach DIN 18232-2 steigt mit zunehmender Raumhöhe an. Diese Tendenz ist für die Ergebnisse aufgrund des Bemessungszieles $d = 5,00 \text{ m}$ (max. Differenz $\Delta = 1,83 \text{ m}$) stärker ausgeprägt als für $d = 4,00 \text{ m}$ (max. Differenz $\Delta = 1,01 \text{ m}$). Für beide Bemessungsziele ergibt sich, dass die Verläufe der Graphen der unterschiedlich großen Rauchabschnitte (vgl. Kap. 3.3, S. 22) annähernd kongruent sind.

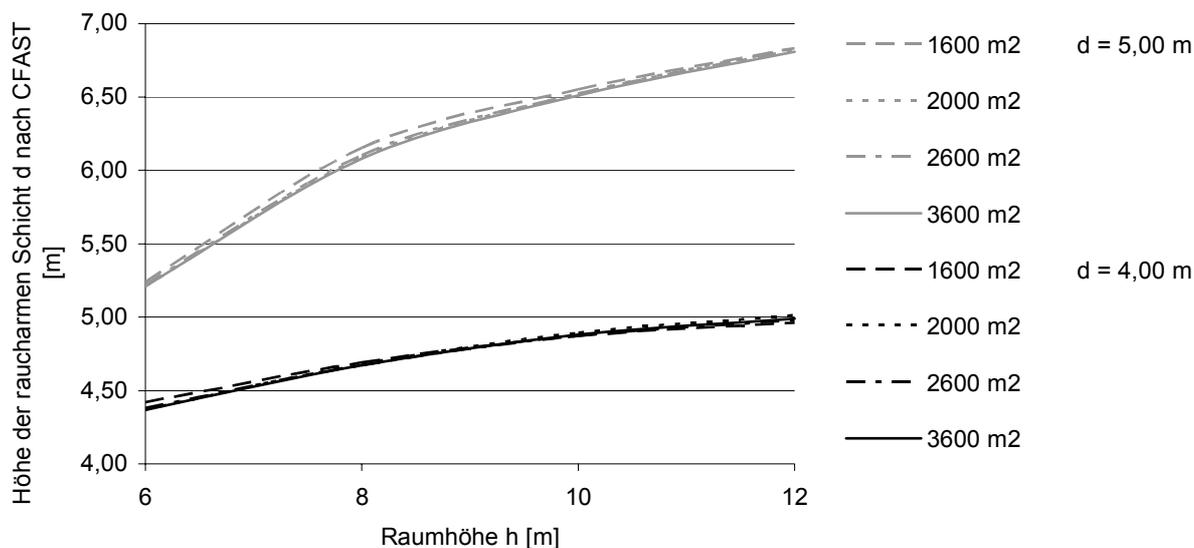


Diagramm 4.1.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST bei Auslegung nach Norm ohne Anwendung der Erleichterung A (Graphische Darstellung: Raum 1 (Brandraum))

Schlussfolgerungen:

Aus dem Rechenlauf RL 1 ergeben sich teilweise sehr große Höhen der raucharmen Schicht, welche die Bemessungsziele deutlich überschreiten. Die Höhendifferenz der Graphen zu den Bemessungszielen wächst mit steigender Raumhöhe an, dabei ist der Anstieg des Graphen für $d = 5,00$ m deutlich steiler als der für $d = 4,00$ m.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Norm insgesamt verhältnismäßig konservativ ausgelegt ist. Es zeigt sich der Trend, dass mit größerem Bemessungsziel auch größere Sicherheiten vorgesehen wurden.

4.2 Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 – Kontrolle der Norm mit Anwendung der Erleichterung A

Die Berechnungen dieses Rechenlaufes wurden analog zu Rechenlauf RL 1 anhand der Auslegung nach DIN 18232-2 vorgenommen, hier jedoch ausschließlich unter Anwendung der Erleichterung A. Es wurde nur für die Raumhöhen von 10 und 12 Metern gerechnet, da die Erleichterung A erst ab der Raumhöhe von 9 Metern angewendet werden darf. Raum 1 (Brandraum) und Raum 2 bilden gemäß [1] jeweils einen Rauchabschnitt. In beide findet aufgrund der geringen Rauchschürzenhöhe von $h_{sch} = 1,00$ m Raucheintrag statt. Dargestellt wird für den RL 2 in Diagramm 4.2.1 jedoch nur der jeweilige Raum 2, da die Werte der brandentfernten Räume geringer ausfallen als die des Brandraumes (vgl. Anlage 4) und deshalb maßgebend sind.

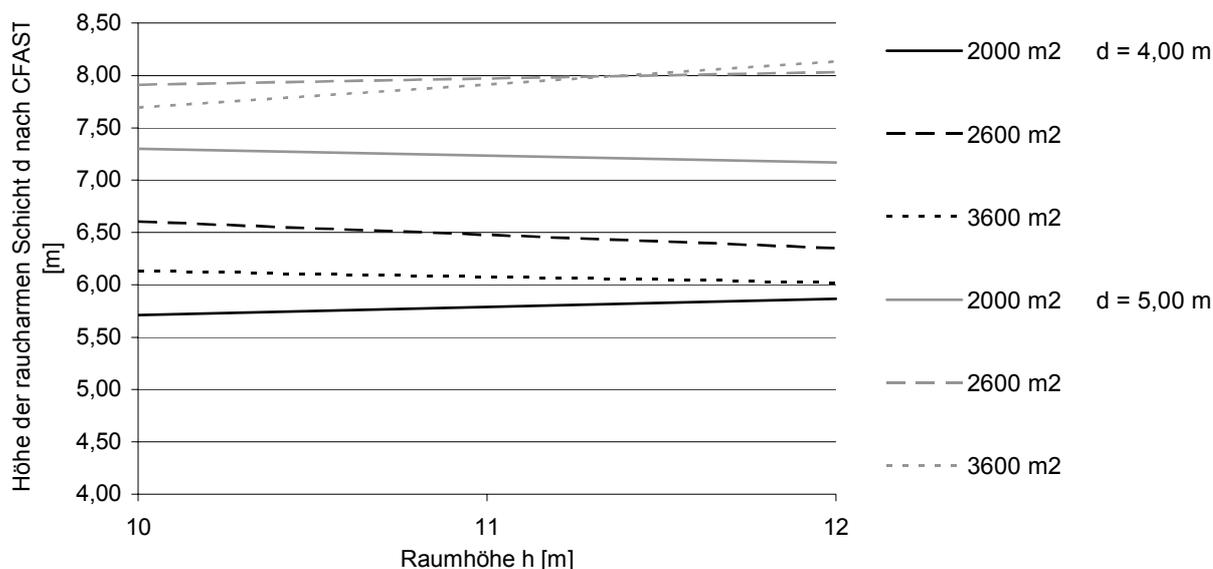


Diagramm 4.2.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST bei Auslegung nach Norm mit Anwendung der Erleichterung A (Graphische Darstellung: Raum 2 (brandentferntes Segment))

Das Diagramm 4.2.1 zeigt, dass alle mittels CFAST berechneten Werte weit oberhalb des jeweilig zu erreichenden Bemessungszieles liegen. Für die größeren Grundrisse ergeben sich verhältnismäßig höher liegende raucharme Schichten als für die kleineren. Die Verläufe der Graphen zeigen unterschiedliche Tendenzen. Beim Bemessungsziel $d = 4,00\text{ m}$ zeigt sich mit zunehmender Raumhöhe für die 2000 m^2 eine leicht steigende und für 2600 m^2 und 3600 m^2 eine leicht abfallende Tendenz der Höhe der raucharmen Schicht. Für $d = 5,00\text{ m}$ ist die Tendenz bei 2000 m^2 sehr leicht fallend und bei 2600 m^2 und 3600 m^2 leicht ansteigend. Die Gründe für diese Schwankungen sind nicht bekannt. Indes sind sie für die Untersuchungen dieser Arbeit nicht relevant.

Schlussfolgerungen:

Für den RL 2 stellen sich Werte weit oberhalb der Bemessungsziele ein. Die Auslegung mit Anwendung der Erleichterung A nach DIN 18232-2 führt demnach zu einer Überdimensionierung der Rauchabzugsflächen.

4.3 Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 – Bildung großer Rauchabschnitte Wegfall der Rauchschürzen

Die Rechnungen des RL 3 (vgl. Kap. 3.3, S. 23f) wurden analog zu Rechenlauf RL 1 durchgeführt. Im Unterschied zu RL 1 wurden die trennenden Rauchschürzen entfernt und dadurch große Rauchabschnitte gebildet. Die normgemäß ermittelten Tabellenwerte wurden in diesem Rechendurchgang unverändert für alle Rauchabschnitte $> 1600\text{ m}^2$ angewendet. Die Ergebnisse werden in zwei Diagrammen dargestellt, um die Abweichungen hervorzuheben, die sich bei den Werten für den Rauchabschnitt der Größe 3600 m^2 ergeben (vgl. Anlage 5). Hierfür werden im Diagramm 4.3.2 die



Werte aller drei Segmente gezeigt, die zusammen den Rauchabschnitt von 3600 m^2 bilden. Das Diagramm 4.3.1 umfasst die Ergebnisse der Rauchabschnitte von 2000 m^2 und 2600 m^2 , wobei hier nur die Werte des brandentfernten Raumes 2 gezeigt werden. Diese liegen auch in diesem Rechenlauf unterhalb derer des Brandraumes (vgl. Anlage 5) und sind deshalb für die Bewertung relevant.

Im Diagramm 4.3.1 wird ersichtlich, dass alle Ergebnisse für die Rauchabschnittsflächen von 2000 m^2 und 2600 m^2 oberhalb der zu erreichenden Bemessungsziele liegen. Die Verläufe der zu einem Bemessungsziel gehörenden Graphen sind annähernd deckungsgleich und kommen etwa den Verläufen der entsprechenden Graphen des Diagramms 4.1.1 (RL 1) gleich. Für das Bemessungsziel $d = 5,00 \text{ m}$ ist mit zunehmender Raumhöhe ein Anstieg der Differenz zwischen Ziel und Ergebnis erkennbar. Bei $d = 4,00 \text{ m}$ steigt die Differenz nur bis etwa 9 Meter Raumhöhe an und fällt dann leicht ab.

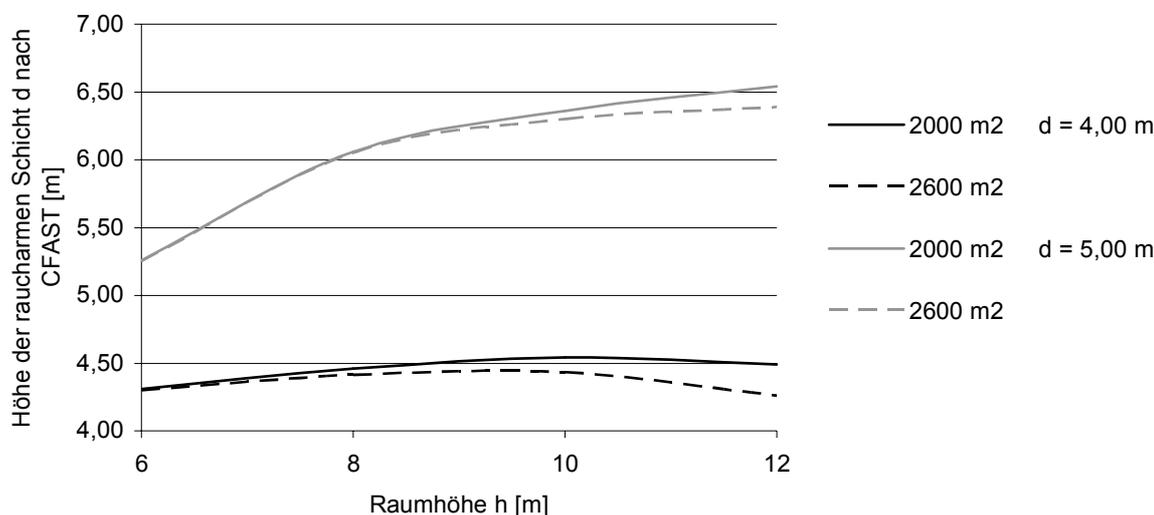


Diagramm 4.3.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsflächen 2000 m^2 und 2600 m^2 unter Verwendung der Eingabedatensätze der normgerechten Auslegung (Graphische Darstellung: Raum 2 (brandentferntes Segment))

Das Diagramm 4.3.2 zeigt, dass im RL 3 für die Rauchabschnittsfläche von 3600 m^2 und das Bemessungsziel $d = 4,00 \text{ m}$ ab einer Raumhöhe von etwa 8 Metern im Raum 3, dem brandentferntesten Raum, eine leichte Unterschreitung des Bemessungszieles auftritt, die sich mit steigender Raumhöhe verstärkt. Bei einer Raumhöhe von etwa 10 Metern wird auch in Raum 2 das Bemessungsziel nicht mehr erreicht. Zwischen 11 und 12 Metern zeigt sich dann auch eine Unterschreitung für den Brandraum (Raum 1). Die Verläufe aller drei Graphen für $d = 4,00 \text{ m}$ zeigen mit zunehmender Raumhöhe eine insgesamt sinkende Tendenz. Für alle Werte, die anhand des Bemessungszieles $d = 5,00 \text{ m}$ ermittelt wurden, ergeben sich keine Unterschreitungen desselben. Die Graphen zeigen im Bereich der Raumhöhen von 6 bis 8 Meter eine ansteigende und von 8 bis 12 Meter leicht fallende Tendenz, liegen jedoch insgesamt deutlich oberhalb der zu erreichenden Höhe der raucharmen Schicht von $5,00 \text{ m}$. Die



Ergebnisse für die Räume 3 sind bei beiden Bemessungszielen geringer als die der Räume 2, die wiederum geringer sind als die der Räume 1.

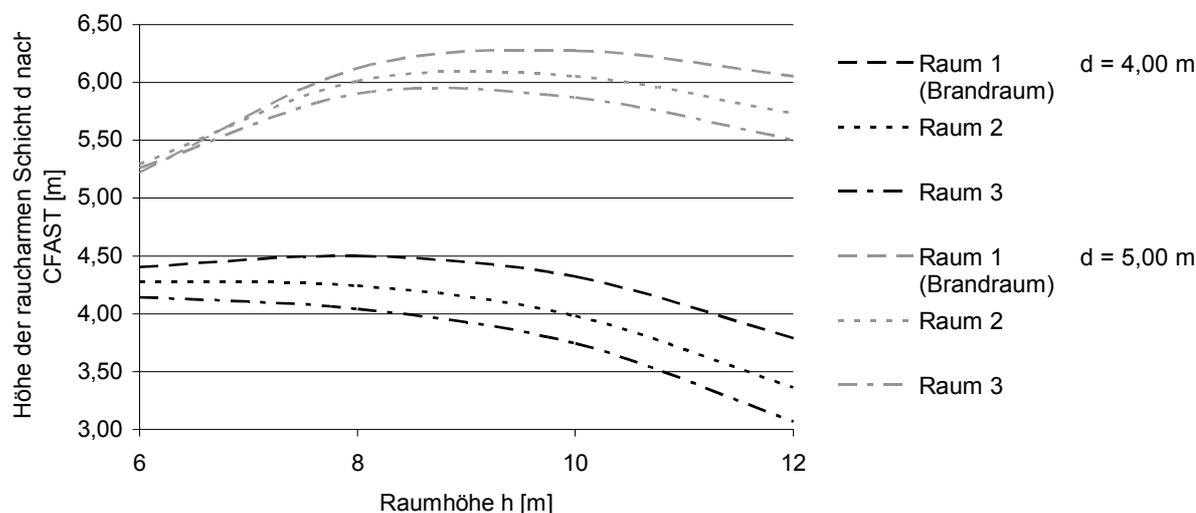


Diagramm 4.3.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für eine Rauchabschnittsfläche von 3600 m² unter Verwendung der Eingabedatensätze der normgerechten Auslegung

Schlussfolgerungen:

Nach diesem Rechenlauf ist festzustellen, dass eine Anwendung der Werte nach DIN 18232-2 auf Rauchabschnitte bis zu einer Größe von 2600 m² durchaus möglich ist. Daneben zeigt sich, dass CFAST den Effekt des Absinkens der Rauchgase in brandentfernten Bereichen erfasst.

4.4 Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 – Bildung großer Rauchabschnitte – Wegfall der Rauchschrüzen – Verwendung erhöhter Eingabedaten

Die in diesem Rechenlauf verwendeten Daten wurden in Anlehnung an die Erleichterung A nach [1] ermittelt. Sie entsprechen einer flächenbezogenen Erhöhung gegenüber den Mindestwerten der Tabelle 3 nach [1]. Danach wurden bei der Fläche von 2000 m² A_w und A_{zu} auf 140 % der Tabellenwerte erhöht, für 2600 m² auf 200 % und für die Rauchabschnittsfläche von 3600 m² auf 300 %. Da sich für diesen Rechenlauf in einigen Fällen geringere Werte der raucharmen Schichthöhe für den Brandraum als für den brandentfernten Raum ergeben (vgl. Anlage 6), werden alle Räume dargestellt. Aus Gründen der Übersicht werden zwei Diagramme angefertigt. Eines dient der Darstellung der drei Räume des Rauchabschnitts von 3600 m² (Diagramm 4.4.2) und das andere zeigt die Ergebnisse beider Räume der Rauchabschnittsflächen von 2000 m² und 2600 m² (Diagramm 4.4.1).

Das Diagramm 4.4.1 zeigt, dass sämtliche Werte weit oberhalb der jeweilig zu erreichenden Bemessungsziele liegen. Dabei ergeben sich für die größeren Rauchabschnittsflächen verhältnismäßig höher liegende raucharme Schichten als für die kleineren. Es ist für beide Rauchabschnittsgrößen bei



beiden Bemessungszielen mit wachsender Raumhöhe ein Ansteigen der Höhe der raucharmen Schicht zu beobachten. Für die Werte, die anhand des Bemessungszieles $d = 4,00$ m berechnet wurden ergeben sich Differenzen bezüglich des Zieles von bis zu 3,57 m, bei $d = 5,00$ m betragen diese bis zu 3,74 m (vgl. Anlage 6). Weiterhin ist festzustellen, dass die Höhenlagen der raucharmen Schichten der weiter vom Brandherd entfernten Räume teilweise geringfügig über denen des Brandraumes liegen.

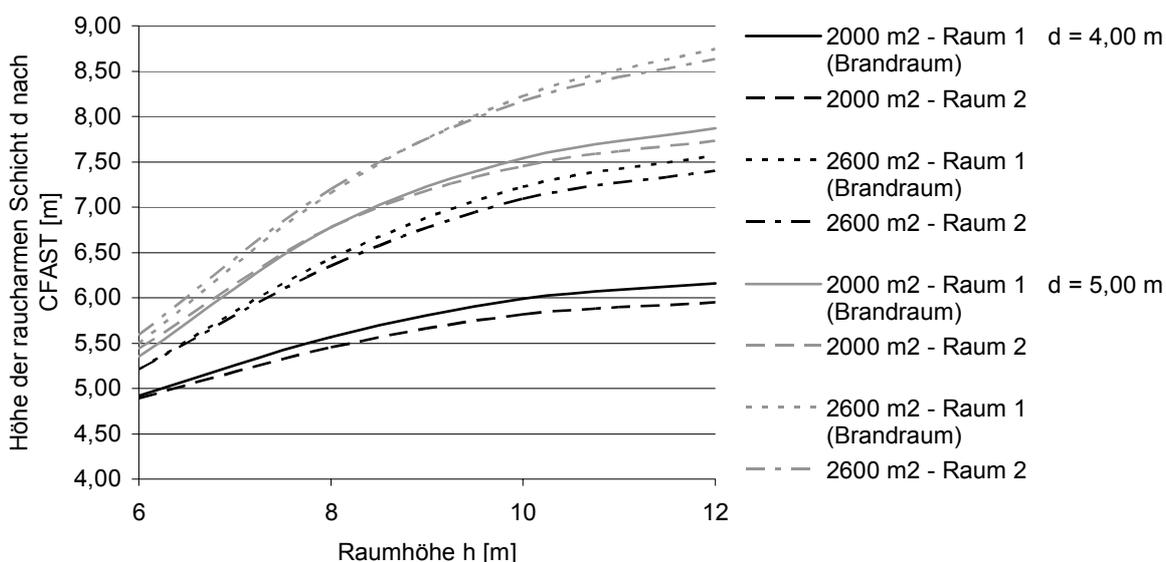


Diagramm 4.4.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsflächen 2000 m^2 und 2600 m^2 unter Verwendung erhöhter Eingabedatensätze

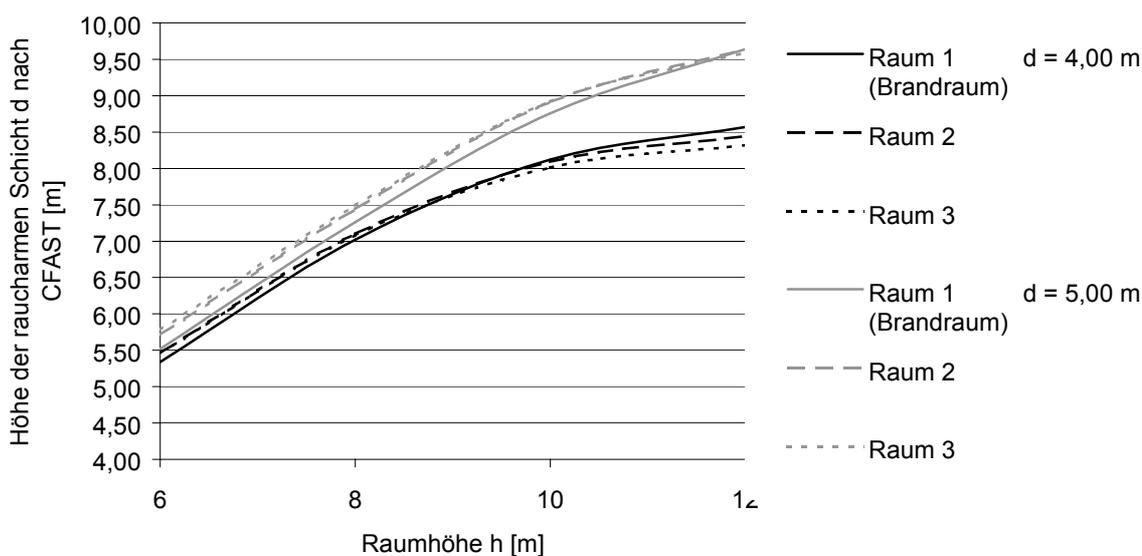


Diagramm 4.4.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für eine Rauchabschnittsfläche von 3600 m^2 unter Verwendung erhöhter Eingabedatensätze



Auch in Diagramm 4.4.2 ist zu erkennen, dass sämtliche Werte weit oberhalb der jeweilig zu erreichenden Bemessungsziele liegen. Für beide Bemessungsziele ist mit wachsender Raumhöhe ein Ansteigen der Höhe der raucharmen Schicht zu beobachten. Für die Werte, die anhand des Bemessungszieles $d = 4,00$ m berechnet wurden, ergeben sich Differenzen bezüglich des Zieles von bis zu 4,57 m, bei $d = 5,00$ m betragen diese bis zu 4,64 m (vgl. Anlage 6). Auch für die Rauchabschnittsfläche von 3600 m^2 ergibt sich, dass die Höhenlagen der raucharmen Schichten der weiter vom Brandherd entfernten Räume teilweise geringfügig über denen des Brandraumes liegen.

Schlussfolgerungen:

Es ist aufgrund der Ergebnisse des RL 4 festzustellen, dass nach einer flächenproportionalen Erhöhung (in Anlehnung an Erleichterung A nach [1]) der nach DIN 18232-2 ermittelten Werte diese auf Rauchabschnitte bis zu 3600 m^2 angewendet werden können. Sie ergeben jedoch eine so deutliche Überdimensionierung der NRA, dass diese Möglichkeit der Anwendung nicht empfehlenswert ist, da sie sehr unwirtschaftlich ist.

4.5 Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 – Bildung großer Rauchabschnitte – Wegfall der Rauchschürzen – Verwendung extrapolierte Eingabedaten

Für diesen Rechenlauf RL 5 werden die Eingabedaten wie in RL 4 flächenbezogen erhöht, jedoch auf einer anderen Grundlage. Die Erhöhung wurde anhand des Flächenverhältnisses der jeweiligen Rauchabschnittsgröße zur oberen Grenze der Norm bestimmt (vgl. Kap. 3.3, S. 24).

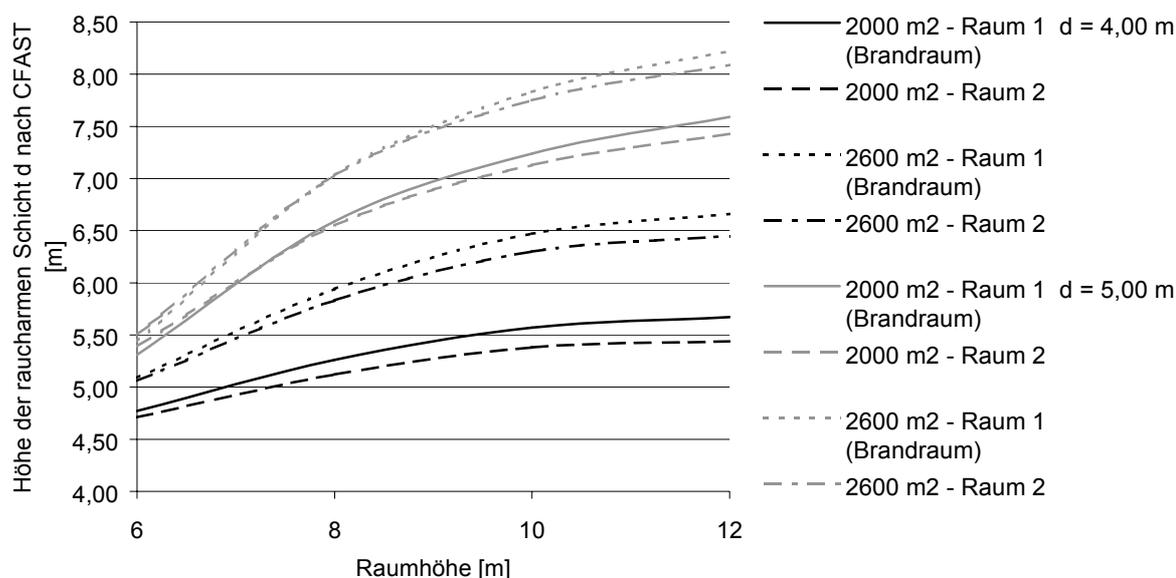


Diagramm 4.5.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsflächen 2000 m^2 und 2600 m^2 unter Verwendung der extrapolierten Eingabedatensätze



Das Diagramm 4.5.1 zeigt, dass sämtliche Werte weit oberhalb der jeweilig zu erreichenden Bemessungsziele liegen. Dabei ergeben sich für die größeren Rauchabschnittsflächen verhältnismäßig höher liegende raucharme Schichten als für die kleineren. Es ist für beide Rauchabschnittsgrößen bei beiden Bemessungszielen mit wachsender Raumhöhe ein Ansteigen der Höhe der raucharmen Schicht zu beobachten. Für die Werte, die anhand des Bemessungszieles $d = 4,00$ m berechnet wurden ergeben sich Differenzen bezüglich des Zieles von bis zu 2,66 m, bei $d = 5,00$ m betragen diese bis zu 3,22 m (vgl. Anlage 7).

Auch das Diagramm 4.5.2 für die Rauchabschnittsfläche von 3600 m^2 zeigt, dass sämtliche Ergebnisse weit oberhalb der jeweilig zu erreichenden Bemessungsziele liegen. Für beide Bemessungsziele ist mit wachsender Raumhöhe ein Ansteigen der Höhe der raucharmen Schicht zu beobachten. Für die Werte, die anhand des Bemessungszieles $d = 4,00$ m berechnet wurden, ergeben sich Differenzen bezüglich des Zieles von bis 3,71 m, bei $d = 5,00$ m betragen diese bis zu 4,00 m (vgl. Anlage 6). In beiden Diagrammen zeigt sich, dass die Höhenlagen der raucharmen Schichten der weiter vom Brandherd entfernten Räume teilweise geringfügig über denen des Brandraumes liegen.

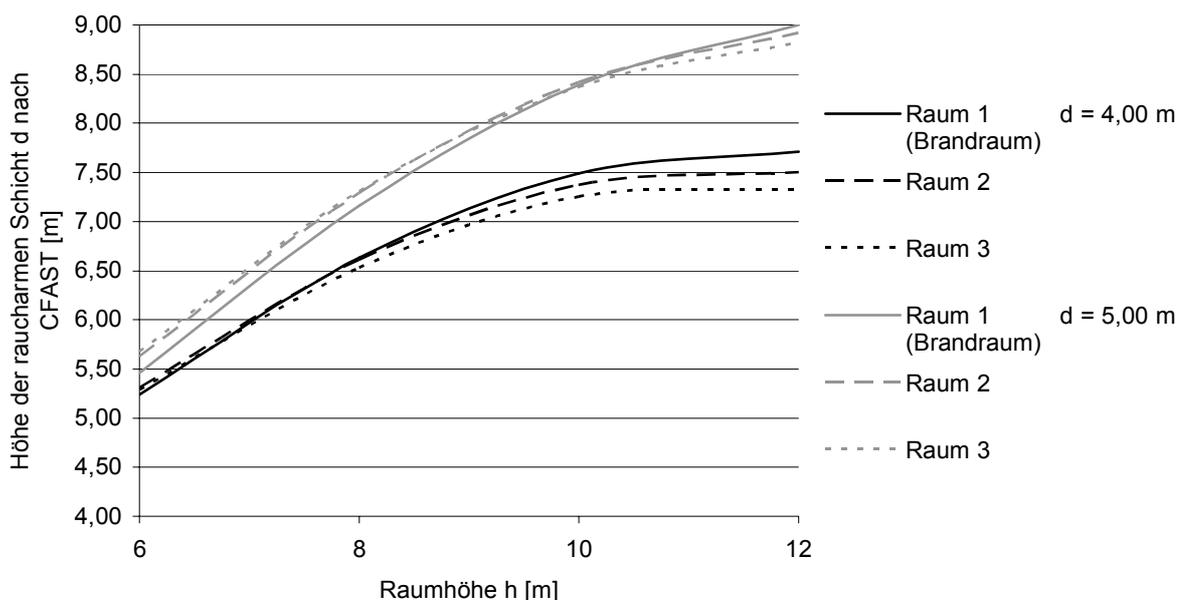


Diagramm 4.5.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsfläche von 3600 m^2 unter Verwendung der extrapolierten Eingabedatensätze

Schlussfolgerungen:

Für die Ergebnisse der Berechnungen des RL 5 zeigen sich wie schon in RL 4 große Überschreitungen der Bemessungsziele. Die Werte liegen jedoch unterhalb derer des RL 4.

Anhand der Ergebnisse des RL 5 kann konstatiert werden, dass die flächenproportionale Erhöhung (Extrapolation nach Flächenverhältnis) der Tabellenwerte nach [1] eine mögliche Anwendung der DIN 18232-2 auf Rauchabschnitte bis zu einer Größe von 3600 m^2 darstellt. Es ergibt sich aber auch hierbei eine nicht unwesentliche Überdimensionierung der NRA.



4.6 Zusammenfassung der Zonenmodell-Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Zonenmodell-Berechnungen zeigen einerseits, dass die Bemessung nach DIN 18232-2 zu teilweise erheblichen Überdimensionierungen der Rauchabzugsflächen führt. Zum anderen liefern die Ergebnisse der durchgeführten Rechenläufe Möglichkeiten der Anwendung der DIN 18232-2 auf Rauchabschnittsflächen $> 1600 \text{ m}^2$. Da die Berechnungen exemplarisch vorgenommen wurden für

- Bemessungsgruppe 4,
- Bemessungsziele $d = 4,00 \text{ m}$ und $d = 5,00 \text{ m}$,
- Raumhöhen $h = 6,00 - 12,00 \text{ m}$

ist die Anwendung vorerst darauf beschränkt.

Möglichkeiten der Übertragung der DIN 18232-2 auf Rauchabschnittsflächen $> 1600 \text{ m}^2$:

1. Für Rauchabschnittsflächen bis 2600 m^2 kann die Bemessung der NRA nach Tabelle 3 der DIN 18232-2 vorgenommen werden, das heißt die Werte der DIN 18232-2 können direkt übernommen werden. Diese Anwendungsmöglichkeit stellt eine optimale Lösung dar.
2. Für Rauchabschnittsflächen von 1600 m^2 bis 3600 m^2 kann die Bemessung der NRA anhand der in Anlehnung an Erleichterung A erhöhten Werte vorgenommen werden. Die Ermittlung der zu verwendenden Werte erfolgt, indem für jede ab der Rauchabschnittsgröße von 1600 m^2 angefangenen 100 m^2 die erforderliche aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche nach Tabelle 3 der DIN 18232-2 um 10 % erhöht wird. Dies führt jedoch im Allgemeinen zu einer Überdimensionierung der NRA.
3. Für Rauchabschnittsflächen von 1600 m^2 bis 3600 m^2 kann die Bemessung der NRA anhand flächenbezogen extrapolierter Werte vorgenommen werden. Die notwendige aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche ergibt sich proportional zum Verhältnis der tatsächlichen Rauchabschnittsfläche zu 1600 m^2 aus dem Wert der Tabelle 3 nach DIN 18232-2. Für den Bereich von 2600 m^2 bis 3600 m^2 ist dies in Ergänzung zu Punkt 1 eine gute Lösung.



5 Feldmodell-Berechnungen

Die Berechnungen mittels Feldmodell dienen der Überprüfung der Ergebnisse der Zonenmodell-Berechnungen beziehungsweise der diesen Berechnungen zugrunde liegenden Annahme der Schichtbildung bis zu einer Rauchabschnittsgröße von 3600 m² (vgl. Kap. 3.2, S. 19).

Für die Feldmodell-Berechnungen wurden drei Entrauchungsszenarien ausgewählt (vgl. Tabelle 5.1). Die Simulationen dienen als Kontrolle der Zonenmodell-Berechnungen, da die Randbedingungen entsprechend Rechenlauf RL 1 und RL 3 (vgl. Kap. 3.3, S. 23f) vorgenommen wurden.

Tabelle 5.1 – Zusammenstellung der Entrauchungsszenarien für die Feldmodell-Berechnungen

	Rauchabschnitts- fläche A_R in m ²	Bemessungsziel d in m	Raumhöhe h in m	$A_w (A_g)^{a)}$ in m ²	A_{zu} in m ²
1	1600	4,00	10,00	7,20 (10,59)	10,80
2	1600	5,00	10,00	12,10 (17,79)	18,15
3	3600	5,00	10,00	12,10 (17,79)	18,15

a) Geometrisch freie Öffnung der Rauchabzugsfläche (vgl. Kap. 7.5)

Für die Berechnung der ausgewählten Szenarien wurden die Default-Einstellungen des Programms FDS bezüglich chemischer Reaktionen und der Freisetzung von Energie und Verbrennungsprodukten verwendet (vgl. [7], Kap. 5.3.2). Der Brandherd mit einer Fläche von 40 m² entsprechend der Bemessungsgruppe 4 nach DIN 18232-2 liegt bei allen Berechnungen in der Mitte des Raumes. Wie auch bei den Zonenmodell-Berechnungen wird hier die maximale Brandleistung nach etwa 850 Sekunden erreicht. Die Simulationsdauer wird auf maximal 1500 Sekunden begrenzt. Zu diesem Zeitpunkt sind quasi-stationäre Bedingungen erreicht [27].

5.1 Ergebnisse der Feldmodell-Berechnungen

Die Darstellung der Ergebnisse der Feldmodell-Berechnungen erfolgt in Form von 3D-Grafiken, denen die sich einstellenden Rußkonzentrationen einzelner Ebenen entnommen werden können. Anhand der Rußkonzentration erfolgt die Bewertung der Rauchausbreitung (vgl. Kap. 2.5). Alle dargestellten Grafiken zeigen die Ergebnisse, die sich am Ende der Simulationen eingestellt haben.

Szenario 1 – 1600 m² / Bemessungsziel d = 4,00 m

Das Bild 5.1.1 zeigt einen Rauchabschnitt von 1600 m² Grundfläche mit der Breite $B = 32,00$ m, der Länge $L = 50,00$ m und einer Höhe von $h = 10,00$ m. Die Rußkonzentration wird in der Ebene unmittelbar vor der Wand gezeigt. Hier ist die größte Entfernung zur Brandquelle erreicht. Zu erkennen ist eine ungleichmäßige Schichtbildung, die sich im Bereich zwischen etwa 3,50 m und 5,50 m über OK Fußboden einstellt. Es ist ein Übergangsbereich zwischen den Schichten zu erkennen, in dem die Konzentrationen von $< 10,0$ mg/m³ auf etwa 32,0 mg/m³ in kurzen Abständen schichtweise ansteigen. Darüber sind durchgängig Konzentrationen von etwa 32,0 mg/m³ bis 48,5 mg/m³ zu erkennen.

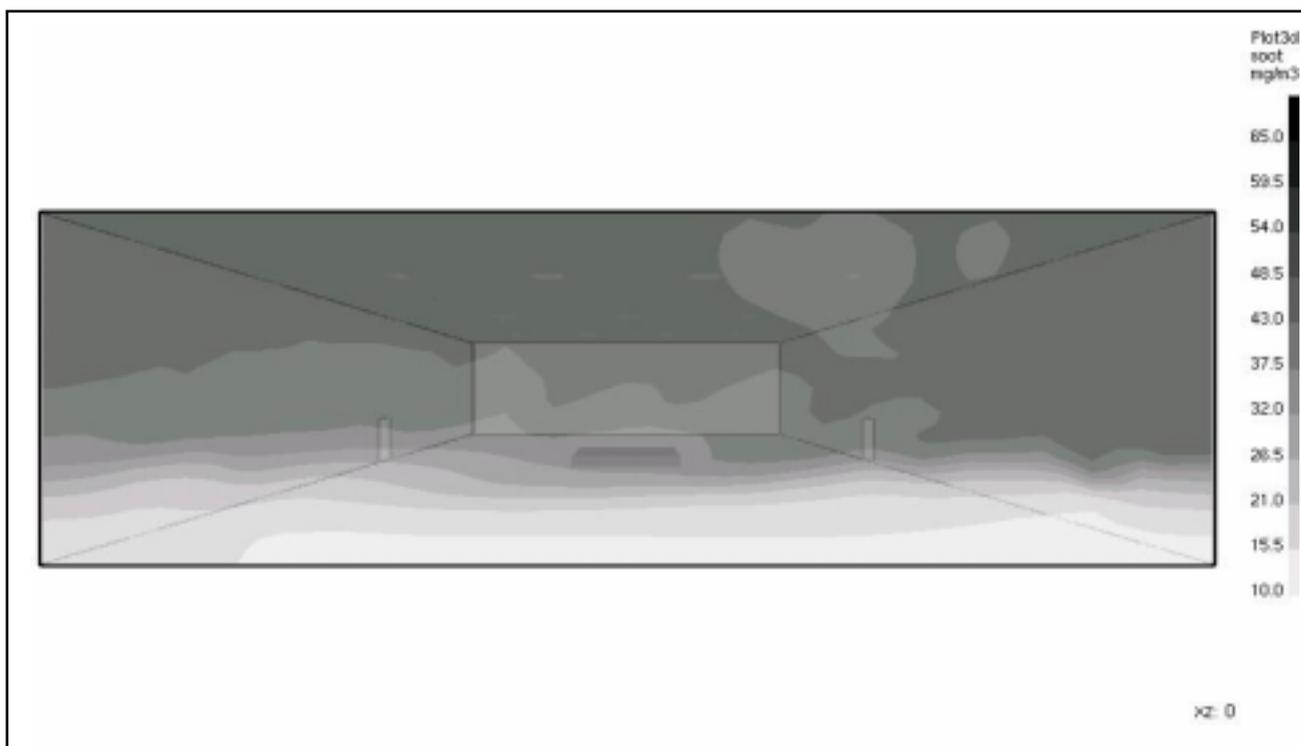


Bild 5.1.1 – Szenario 1 – Rußkonzentration in der Ebene direkt vor der Wand

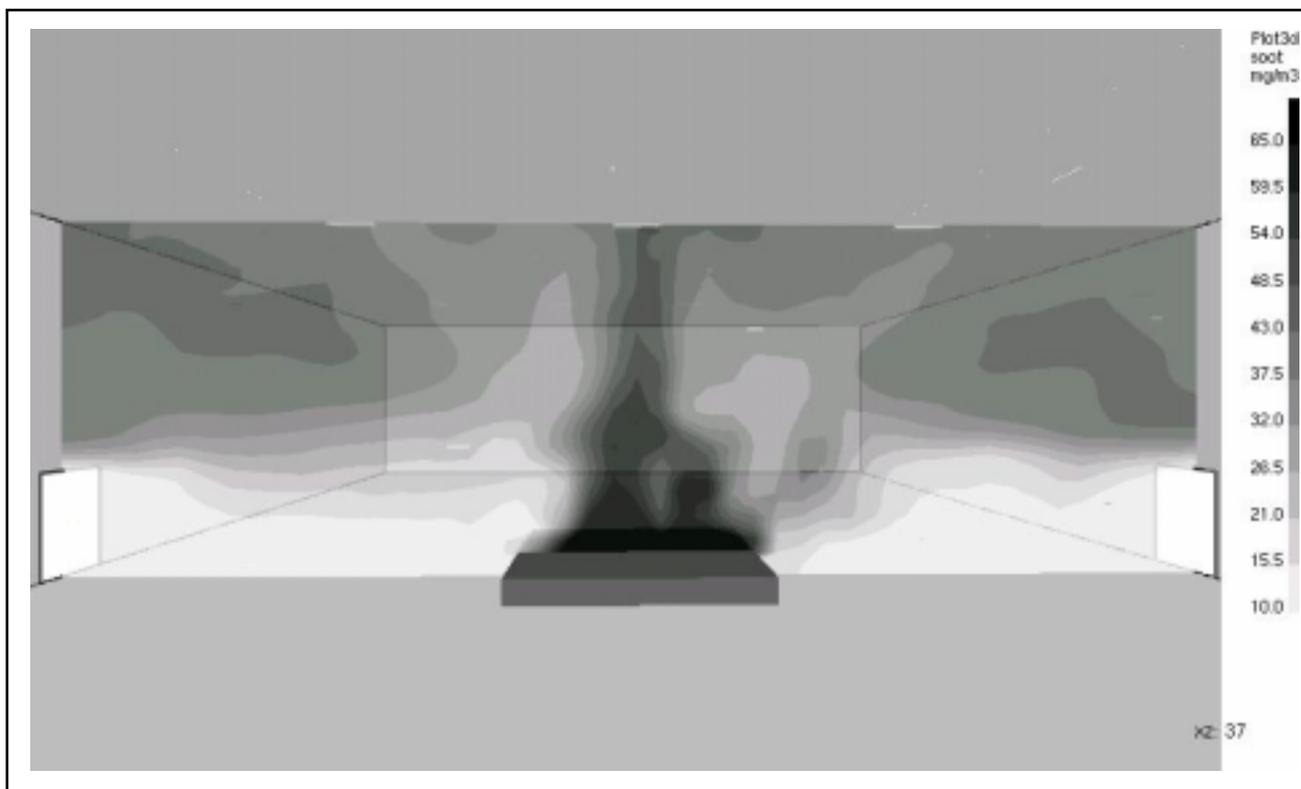


Bild 5.1.2 – Szenario 1 – Rußkonzentration in Raummitte



Das Bild 5.1.2 zeigt die Rußkonzentrationen in Raummitte für das Szenario 1. Diese Ebene verläuft durch die Brandquelle hindurch und bindet die auf gleicher Höhe liegenden Zuluftöffnungen ein. Auch hier ist eine ungleichmäßige Schichtbildung mit einem Übergangsbereich zu erkennen. Die Konzentration steigt in diesem Bereich von $< 10,0 \text{ mg/m}^3$ auf etwa $37,5 \text{ mg/m}^3$ an. Darüber, ab einer Höhe zwischen 3,50 m bis 5,00 m, stellen sich Rußkonzentrationen zwischen $32,0 \text{ mg/m}^3$ und stellenweise $48,5 \text{ mg/m}^3$ ein. Die Ausbildung der Schichtung ist in diesem Querschnitt sehr ungleichmäßig. Es ist zu erkennen, dass sie im Bereich der Zuluftöffnungen absinkt (3,50 m) und in Richtung Plume etwas weiter oben liegt (5,00 m).

Schlussfolgerungen und Vergleich mit Zonenmodell:

Das Bemessungsziel von $d = 4,00 \text{ m}$ wird nicht durchgängig erreicht. Es ist jedoch zu erkennen, dass es einen Einfluss von Zuluftströmungen im Bereich der Zuluftöffnungen gibt, der zu einem Absinken der Rauchgase führt. Dies setzt sich bis in die brandentfernten Bereich fort. Mittels Zonenmodell ergibt sich für dieses Szenario eine Höhe der raucharmen Schicht von 4,87 m. Dieses Ergebnis zeigt, dass durch das Feldmodell Zuluftinflüsse stärker erfasst werden als mit dem Zonenmodell.

Szenario 2 – 1600 m² / Bemessungsziel $d = 5,00 \text{ m}$

Das Bild 5.1.3 zeigt einen Rauchabschnitt der Grundfläche von 1600 m^2 mit der Breite $B = 32,00 \text{ m}$, der Länge $L = 50,00 \text{ m}$ und einer Höhe von $h = 10,00 \text{ m}$. Die Rußkonzentration wird für den Schnitt unmittelbar vor der Wand gezeigt (größte Entfernung zur Brandquelle). Zu erkennen ist eine Schichtbildung, die sich etwa bei 5,00 m über OK Fußboden einstellt. Es ist ein kleiner Übergangsbereich zwischen den Schichten zu erkennen, in dem die Konzentrationen von $< 10,0 \text{ mg/m}^3$ auf etwa $26,5 \text{ mg/m}^3$ in kurzen Abständen schichtweise ansteigen. In der oberen Schicht sind durchgängig Konzentrationen von etwa $26,5 \text{ mg/m}^3$ bis $43,0 \text{ mg/m}^3$ zu erkennen.

Das Bild 5.1.4 zeigt die Rußkonzentrationen in Raummitte für das Szenario 2. Dieser Schnitt verläuft durch die Brandquelle und die auf gleicher Höhe liegenden Zuluftöffnungen hindurch. Auch hier ist eine Schichtbildung mit einem Übergangsbereich zu erkennen. Die Konzentration steigt in diesem Bereich von $< 10,0 \text{ mg/m}^3$ auf etwa $26,5 \text{ mg/m}^3$ an. Darüber auf einer Höhe zwischen etwa 4,00 m bis 5,50 m liegt die obere Schicht mit Rußkonzentrationen zwischen $26,5$ und $43,0 \text{ mg/m}^3$. Die Rauchgase sind in dieser Ebene sehr ungleichmäßig über die Höhe verteilt. Es ist zu erkennen, dass sie im Bereich der Zuluftöffnungen absinken (ca. 4,00 m) und in Richtung Plume etwas weiter oben liegen (ca. 5,50 m).

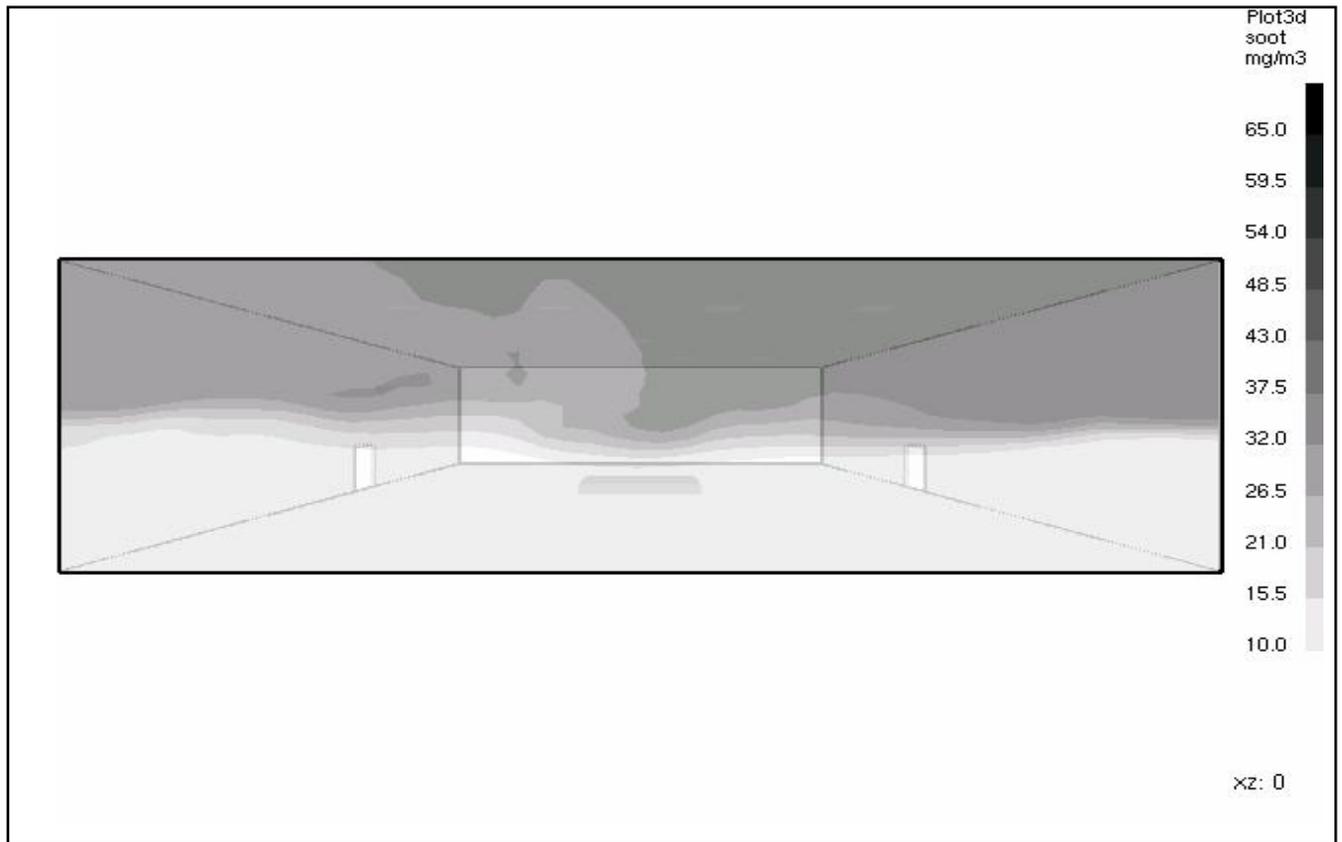


Bild 5.1.3 – Szenario 2 – Rußkonzentration in der Ebene direkt vor der Wand

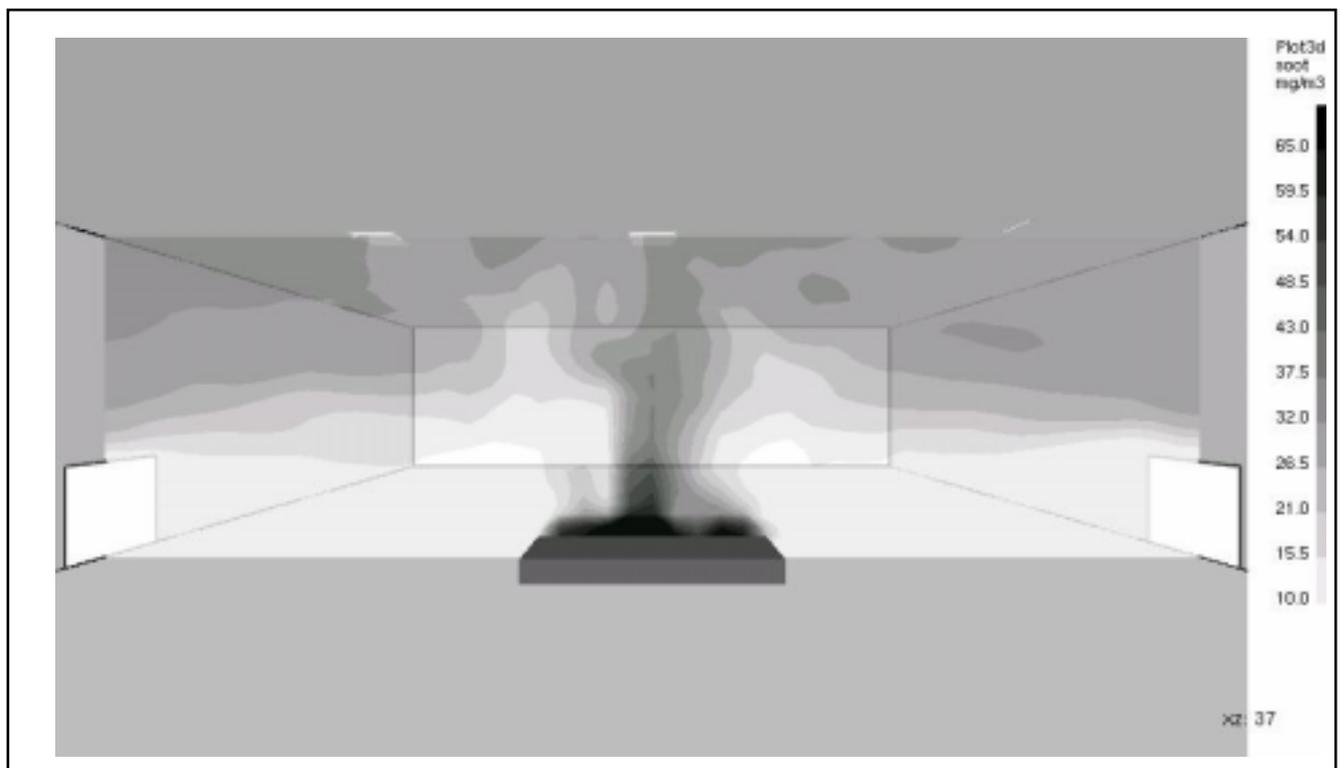


Bild 5.1.4 – Szenario 2 – Rußkonzentration in Raummitte



Schlussfolgerungen und Vergleich mit Zonenmodell:

Das Bemessungsziel von $d = 5,00$ m wird nicht durchgängig erreicht. Auch hier ist zu erkennen, dass dafür Zuluftinflüsse verantwortlich sind. Diese treten sogar hier auf, obwohl der Abstand von OK Zuluftöffnung zu UK Rauchgasschicht hier $\Delta h = 2,00$ m beträgt. Der Einfluss ist aber in diesem Fall nicht mehr so stark wie der Vergleich mit Szenario 1 zeigt.

Mittels Zonenmodell ergibt sich für dieses Szenario eine Höhe der raucharmen Schicht von 6,55 m. Es wird erneut deutlich, dass durch das Feldmodell Zuluftinflüsse stärker erfasst werden als mit dem Zonenmodell.

Szenario 3 – 3600 m² / Bemessungsziel $d = 5,00$ m

Das Bild 5.1.5 zeigt einen Rauchabschnitt der Grundfläche von 3600 m² mit der Breite $B = 50,00$ m, der Länge $L = 72,00$ m und einer Höhe von $h = 10,00$ m. Die Rußkonzentration wird in der Ebene direkt vor der Wand gezeigt (größte Entfernung zur Brandquelle). Zu erkennen ist eine Schichtung, deren Grenze im Bereich zwischen etwa 4,00 m und 4,50 m über OK Fußboden verläuft. Es zeigt sich auch hier ein Übergangsbereich zwischen den Schichten, in welchem die Konzentrationen von $< 10,00$ mg/m³ auf etwa 26,5 mg/m³ ansteigen. Die obere Schicht weist durchgängig Konzentrationen von etwa 32,0 bis 37,5 mg/m³ auf. Stellenweise steigen diese auf etwa 43,0 mg/m³ an.

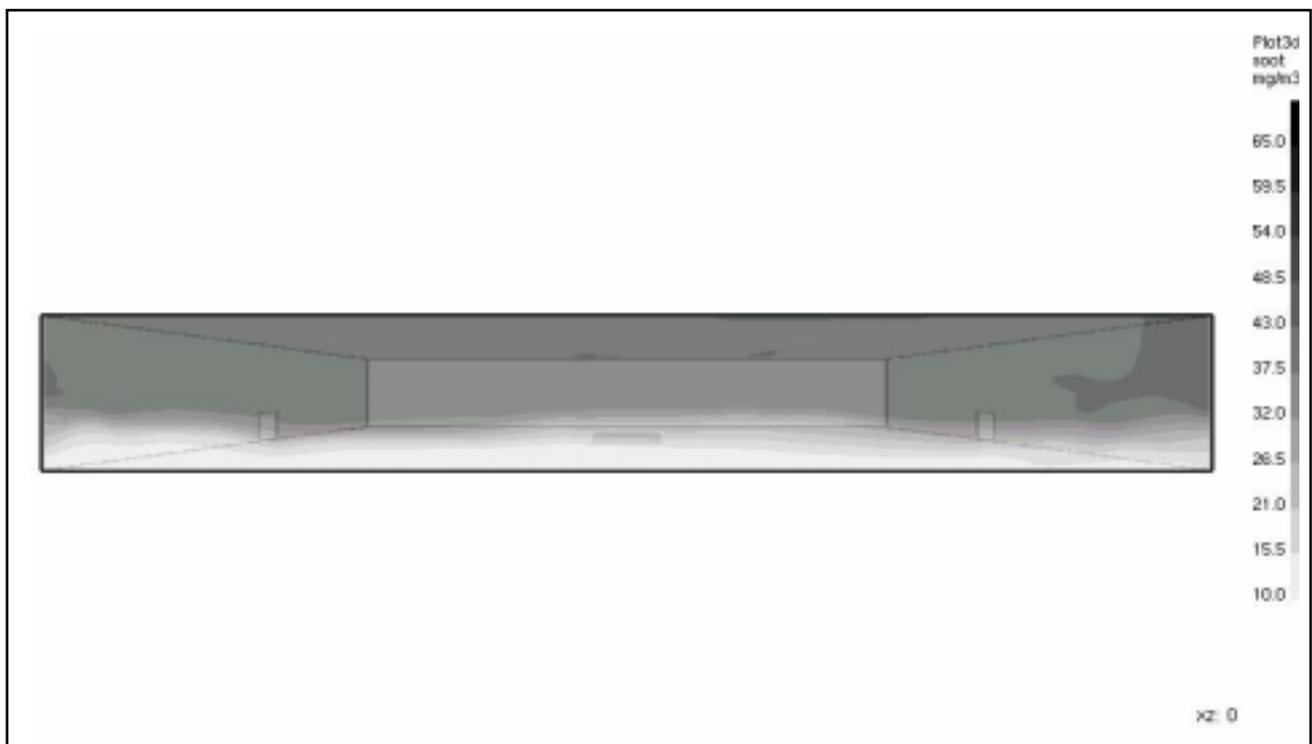


Bild 5.1.5 – Szenario 3 – Rußkonzentration in der Ebene direkt vor der Wand



Das Bild 5.1.6 zeigt die Rußkonzentrationen in Raummitte für das Szenario 3. Der Schnitt verläuft durch die Brandquelle hindurch und bindet die auf gleicher Höhe liegenden Zuluftöffnungen ein. Wieder ist eine Schichtbildung mit einem Übergangsbereich zu erkennen. Die Konzentration steigt in diesem Bereich von $< 10,00 \text{ mg/m}^3$ auf etwa $32,0 \text{ mg/m}^3$ an. Die Höhenlage der Schichtgrenze stellt sich bei etwa 4,50 m bis 5,00 m ein. Die Rußkonzentration der oberen Schicht liegt etwa zwischen $32,0 \text{ mg/m}^3$ und $43,0 \text{ mg/m}^3$.

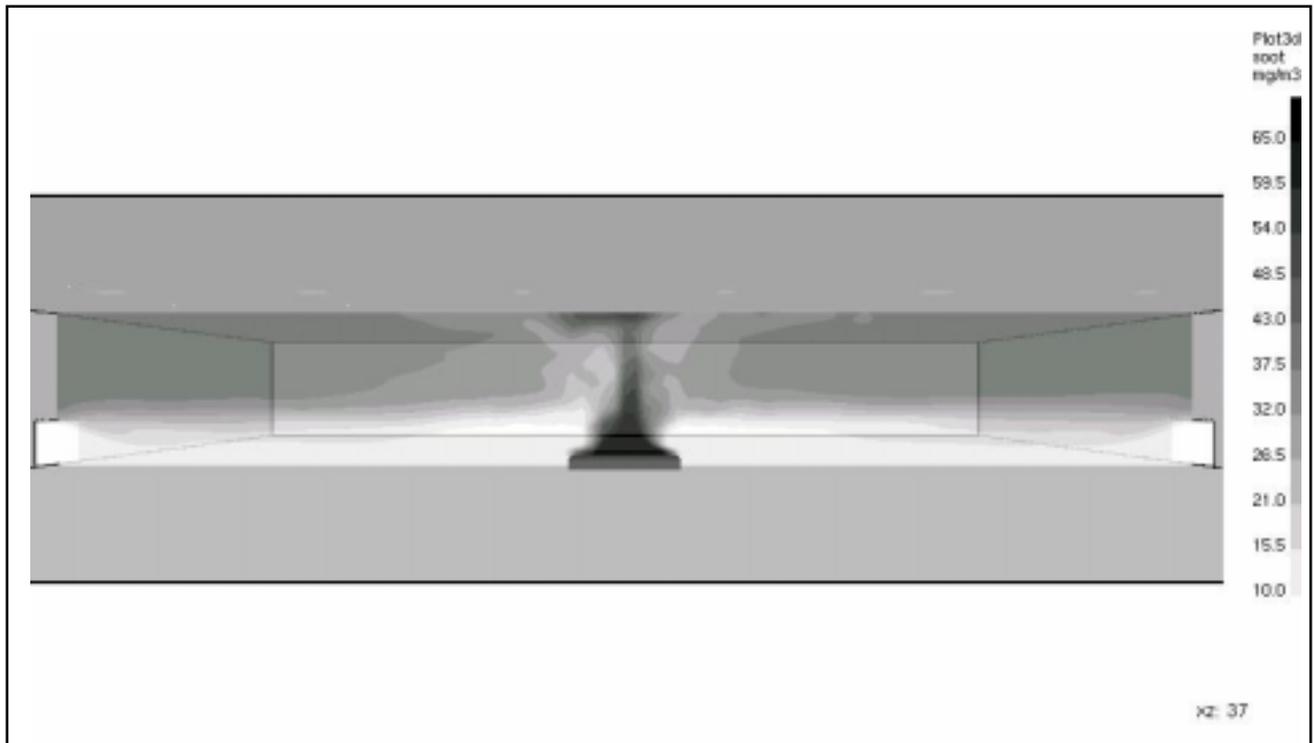


Bild 5.1.6 – Szenario 3 – Rußkonzentration in Raummitte

Schlussfolgerungen und Vergleich mit Zonenmodell:

Die Schichtung ist gleichmäßiger als bei den beiden Rauchabschnitten von 1600 m^2 . Das lässt darauf schließen, dass größere Abstände zwischen den Zuluftöffnungen und zum Plume über dem Brandherd zu geringeren Einflüssen durch diese führen. Die mittels Zonenmodell für das Szenario 3 berechnete Höhe der raucharmen Schicht beträgt 5,50 m. Es zeigt sich wiederum, dass die Auswirkungen von Zuluftinflüssen durch das Zonenmodell weniger stark erfasst werden als durch das Feldmodell.



5.2 Zusammenfassung der Feldmodell-Ergebnisse

Die Ergebnisse der Feldmodell-Berechnungen bestätigen die Ergebnisse des Zonenmodells nicht unmittelbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Zonenmodell eine scharfe Trennung der beiden Schichten vorausgesetzt wird, beim Feldmodell dagegen ein mehr oder minder hoher Übergangsbereich zwischen raucharmer und Rauchgasschicht berechnet wird, wie er auch in der Realität vorkommt. Es ergeben sich Höhenlagen der Schichtgrenzen, die unterhalb der mittels CFAST berechneten Werte liegen. Dies kann offensichtlich auf Zuluftinflüsse zurückgeführt werden, die bei allen drei Szenarien sichtbar werden. Am deutlichsten treten sie auf, wenn das Bemessungsziel $d = 4,00$ m als Basis der Eingangsdaten verwendet wurde. Hierbei beträgt der Abstand von der Oberkante der Zuluftöffnung zur Unterkante der Rauchgasschicht aufgrund der gewählten Torhöhe (3,00 m) nur $\Delta h = 1,00$ m.

Die Betrachtung der Rußkonzentrationen der oberen Schichten in den unterschiedlichen Ebenen zeigt, dass diese in keinem Fall über $48,5 \text{ mg/m}^3$ ansteigen, das heißt selbst in großer Höhe herrschen vergleichsweise geringe Rußkonzentrationen, die weniger kritisch zu bewerten sind.



6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen zeigen, dass es Möglichkeiten der Anwendung der DIN 18232-2 auf Rauchabschnittsflächen $> 1600 \text{ m}^2$ gibt. Daneben zeigen sie, dass sich die mittels Zonenmodell berechneten Höhenlagen der raucharmen Schicht im Vergleich zu den drei Szenarien, die mittels Feldmodell überprüft wurden, etwas günstiger einstellen. Dies ist jedoch offensichtlich darauf zurückzuführen, dass durch das Feldmodell der Einfluss von Zulufteffekten deutlich stärker berücksichtigt wird als durch das Zonenmodell.

Es ist zu vermuten, dass dieser Trend ebenfalls bei den Szenarien auftritt, die nicht mittels des Feldmodells überprüft wurden. Daher wird von der Möglichkeit der Verwendung der unveränderten Werte der Tabelle 3 der DIN 18232-2 auf Rauchabschnittsflächen bis zu 2600 m^2 (vgl. Kap. 4.6) Abstand genommen, da die Ergebnisse keine ausreichenden Reserven beinhalten, um mögliche Zulufteffekte zu kompensieren. Die beiden anderen Möglichkeiten zeigen dagegen dermaßen große Reserven der Ergebnisse bezüglich der Bemessungsziele, dass diese Auslegungen anwendbar sind. Damit sind die Möglichkeiten der Anwendung der DIN 18232-2 auf Rauchabschnittsflächen $> 1600 \text{ m}^2$, die sich aus dieser Arbeit ableiten lassen:

1. Für Rauchabschnittsflächen von 1600 m^2 bis 3600 m^2 kann die Bemessung der NRA anhand der in Anlehnung an Erleichterung A erhöhten Werte vorgenommen werden. Die Ermittlung der zu verwendenden Werte erfolgt, indem für jede ab der Rauchabschnittsgröße von 1600 m^2 angefangenen 100 m^2 die erforderliche aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche nach Tabelle 3 der DIN 18232-2 um 10 % erhöht wird.
2. Für Rauchabschnittsflächen von 1600 m^2 bis 3600 m^2 kann die Bemessung der NRA anhand flächenbezogen extrapolierter Werte vorgenommen werden. Die notwendige aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche ergibt sich proportional zum Verhältnis der tatsächlichen Rauchabschnittsfläche zu 1600 m^2 aus dem Wert der Tabelle 3 nach DIN 18232-2.

Die zweite Auslegungsregel führt zu einer wirtschaftlicheren Dimensionierung der Rauchabzugsanlagen.

Die Berechnungen dieser Arbeit wurden beispielhaft für die

- Bemessungsgruppe 4,
- Bemessungsziele $d = 4,00 \text{ m}$ und $d = 5,00 \text{ m}$,
- Raumhöhen $h = 6,00 \text{ m} - 12,00 \text{ m}$

vorgenommen. Eine mögliche Übertragung der Auslegungsregeln auf andere Randbedingungen ist zumindest exemplarisch zu überprüfen.

Zusätzlich zeigt sich anhand der Untersuchungen, dass die Zuluftbedingungen einen großen Einfluss auf die Schichtbildung ausüben. Es wird aufgrund der Beobachtungen empfohlen, bei Anwendung der Auslegungsregeln auf Rauchabschnitte bis maximal 3600 m^2 , den von der DIN 18232-2 auf $\Delta h = 1,00 \text{ m}$ festgesetzten Mindestabstand von der Oberkante der Zuluftöffnung zur Unterkante der Rauchgasschicht auf $\Delta h \geq 2,00 \text{ m}$ zu erhöhen.



7 Verzeichnisse

7.1 Quellen

Normen/Richtlinien:

- [1] DIN 18232-2: Rauch- und Wärmeabzugsanlagen Teil 2: Natürliche Rauchabzugsanlagen (NRA) Bemessung, Anforderungen und Einbau. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin, Juni 2003.
- [2] MBO 2002: Musterbauordnung Fassung November 2002. Bauministerkonferenz, Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU), November 2002.

Literatur:

- [3] Siegfried, Dr. rer. nat. W.; Will, Dipl.-Phys. J.: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. Fachbeitrag im Heft 3 der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., 51. Jahrgang, August 2002.
- [4] Schneider, Dr. V.: Auswirkungen der Ausbreitung von Rauch und Wärme auf die Personensicherheit. Fachbeitrag im Heft 3 der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., 51. Jahrgang, August 2002.
- [5] Hegger, Th.: Rauch- und Wärmeabzug – DIN 18232 und EN 12101. Praxisseminar 2002 - Brandschutz bei Sonderbauten, 1. und 2. Oktober 2002, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 163, Braunschweig 2002.
- [6] McGrattan, K. B.; Baum, H. R.; Rehm, R. G.; Hamis, A.; Forney, G. P.; Floyd, J. E.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator (Version 3) – Technical Reference Guide. NISTIR 6783, 2002 Ed., National Institute of Standards and Technology, November 2002.
- [7] McGrattan, K. B.; Forney, G. P.; Floyd, J. E.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator (Version 3) – User's Guide. NISTIR 6784, 2002 Ed., National Institute of Standards and Technology, November 2002.
- [8] Forney, G. P.; McGrattan, K. B.: User's Guide for Smokeview Version 2.0 – A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. NISTIR 6761, National Institute of Standards and Technology, July 2001.
- [9] Peacock, R. D.; Reneke, P. A.; Jones, W. W.; Bukowski, R. W.; Forney, G. P.: A User's Guide for FAST: Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport. NIST Special Publication 921, National Institute of Standards and Technology, January 2000.
- [10] Schneider, U.; Oswald, M.: Alternativen der Nachweisführung zur Rauchableitung aus Gebäuden. Braunschweiger Brandschutz-Tage '03, 10. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 30. September und 1. Oktober 2003, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 168, Braunschweig 2003.



- [11] Tewarson, A.: Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. Section 1 / Chapter 3-4 in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA, USA, 1988.
- [12] Hagen, H.: Schutzziele und Anforderungen für die Rauchableitung nach bauaufsichtlichen Vorschriften. Braunschweiger Brandschutz-Tage '03, 10. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 30. September und 1. Oktober 2003, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 168, Braunschweig 2003.
- [13] Siegfried, W.; Will, J.: Brandsimulationsmodelle als Grundlage für die Dimensionierung der Rauchableitung. Braunschweiger Brandschutz-Tage '03, 10. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 30. September und 1. Oktober 2003, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 168, Braunschweig 2003.
- [14] Detzer, R.: Physikalische Modelle als Grundlage für die Dimensionierung der Rauchableitung. Braunschweiger Brandschutz-Tage '03, 10. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 30. September und 1. Oktober 2003, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, Heft 168, Braunschweig 2003.

PC-Programme:

- [20] CFAST – Programm zur Zweidimensionalen Simulation von Rauch- und Wärmeausbreitung
- [21] FDS – Programm zur Dreidimensionalen Simulation von Rauch- und Wärmeausbreitung

Internet:

- [22] www.vfdb.de
- [23] www.fvlr.de
- [24] www.baumedien.de
- [25] www.ibmb.tu-braunschweig.de

Befragte Personen:

- [26] Siegfried, Dr. rer. nat. W.
- [27] Will, Dipl.-Phys. J.

7.2 Abbildungen

Bild 2.1.2.1	Schematische Darstellung der Bemessungsgrundlagen nach DIN 18232-2	8
Bild 2.1.3.1	Grundriss und Ansicht zu Beispiel 1	11
Bild 2.1.3.2	Grundriss und Ansicht zu Beispiel 2a	12
Bild 2.1.3.3	Grundriss und Ansicht zu Beispiel 3	15
Bild 3.3.1	Segmenteinteilung für den Grundriss der Fläche 3600 m ²	22
Bild 5.1.1	Szenario 1 – Rußkonzentration in der Ebene direkt vor der Wand	35
Bild 5.1.2	Szenario 1 – Rußkonzentration in Raummitte	35
Bild 5.1.3	Szenario 2 – Rußkonzentration in der Ebene direkt vor der Wand	37



Bild 5.1.4	Szenario 2 – Rußkonzentration in Raummitte	37
Bild 5.1.5	Szenario 3 – Rußkonzentration in der Ebene direkt vor der Wand	38
Bild 5.1.6	Szenario 3 – Rußkonzentration in Raummitte	39

7.3 Diagramme

Diagramm 2.1.2.1	Brandverläufe der verschiedenen Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für die Bemessungsgruppe 4	10
Diagramm 4.1.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST bei Auslegung nach Norm ohne Anwendung der Erleichterung A (Graphische Darstellung: Raum 1 (Brandraum))	26
Diagramm 4.2.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST bei Auslegung nach Norm mit Anwendung der Erleichterung A (Graphische Darstellung: Raum 2 (brandentferntes Segment))	27
Diagramm 4.3.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsflächen 2000 m ² und 2600 m ² unter Verwendung der Eingabedatensätze der normgerechten Auslegung (Graphische Darstellung: Raum 2 (brandentferntes Segment))	28
Diagramm 4.3.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für eine Rauchabschnittsfläche von 3600 m ² unter Verwendung der Eingabedatensätze der normgerechten Auslegung	29
Diagramm 4.4.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsflächen 2000 m ² und 2600 m ² unter Verwendung erhöhter Eingabedatensätze	30
Diagramm 4.4.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für eine Rauchabschnittsfläche von 3600 m ² unter Verwendung erhöhter Eingabedatensätze	30
Diagramm 4.5.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsflächen 2000 m ² und 2600 m ² unter Verwendung der extrapolierten Eingabedatensätze	31
Diagramm 4.5.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 – Höhenlage der raucharmen Schichten nach CFAST für die Rauchabschnittsfläche von 3600 m ² unter Verwendung der extrapolierten Eingabedatensätze	32

7.4 Tabellen

Tabelle 5.1	Zusammenstellung der Entrauchungsszenarien für die Feldmodell-Berechnungen
Tabelle A2.1	Erforderliche Rauchschürzenhöhen nach DIN 18232-2 für die Bemessungsziele d = 4,00 m und d = 5,00 m
Tabelle A2.2	Notwendige Flächen A _w und A _{zu} nach DIN 18232-2 – Bemessungsziel d = 4,00 m



Tabelle A2.3	Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach DIN 18232-2 – Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A2.4	Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach DIN 18232-2 unter Anwendung der Erleichterung A für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m^2 und 2600 m^2 mit dem Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A2.5	Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach DIN 18232-2 unter Anwendung der Erleichterung A für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m^2 und 2600 m^2 mit dem Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A2.6	In Anlehnung an Erleichterung A nach DIN 18232-2 flächenbezogen erhöhte Werte A_w und A_{zu} für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m^2 , 2600 m^2 und 3600 m^2 Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A2.7	In Anlehnung an Erleichterung A nach DIN 18232-2 flächenbezogen erhöhte Werte A_w und A_{zu} für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m^2 , 2600 m^2 und 3600 m^2 Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A2.8	Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach Extrapolierung – Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A2.9	Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach Extrapolierung – Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A3.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A3.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A4.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A4.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A5.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A5.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A6.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A6.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A7.1	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A7.2	Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m
Tabelle A8.1	Ergebnisse der Ein-Raum-Rechnung zu RL 3 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m
Tabelle A8.2	Ergebnisse der Ein-Raum-Rechnung zu RL 3 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m

7.5 Begriffe

A_g	Geometrisch freie Öffnung der Rauchabzugsfläche
A_w	Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche: Das Produkt aus geometrischer Öffnungsfläche A_g im m^2 der NRA und Durchflussbeiwert c_v unter Berücksichtigung des Seitenwindinflusses
A_{zu}	Geometrisch freie Öffnung der Zuluftfläche
A_R	Rauchabschnittsfläche: Die Fläche eines Raumes, auf den die Rauchausbreitung beschränkt werden soll



Brandausbreitungsgeschwindigkeit	Die Geschwindigkeit in m/min, mit der sich ein Brandherd ausbreitet.
Brandentwicklungsdauer	Der Zeitraum von der Brandentstehung bis zum Beginn der Löscharbeiten.
Plume	Die aufsteigende Rauchgassäule über einem Brandherd
Raucharme Schicht	Die Schicht, in die im Brandfall nur begrenzt Raucheintrag stattfindet.
Rauchschürze	Bauteil, das der Bildung von Rauchabschnitten dient
Rechnerische Brandfläche	Die Fläche des Bemessungsbrandes

8 Anlagen

- Anlage 1 Materialeigenschaften bei der Verbrennung, Auszug aus Tabelle 3-4.14 [11]
- Anlage 2 Zusammenstellung der Eingabedaten für das Zonenmodell CFAST
- Anlage 3 Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 1 mittels Zonenmodell CFAST in tabellarischer Form
- Anlage 4 Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 2 mittels Zonenmodell CFAST in tabellarischer Form
- Anlage 5 Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 3 mittels Zonenmodell CFAST in tabellarischer Form
- Anlage 6 Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 4 mittels Zonenmodell CFAST in tabellarischer Form
- Anlage 7 Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 5 mittels Zonenmodell CFAST in tabellarischer Form
- Anlage 8 Ergebnisse der Berechnungen der Einraum-Rechnung zu RL 3 mittels des Zonenmodells CFAST
- Anlage 9 CFAST-Eingabedatensatz für eine Einraum-Rechnung
- Anlage 10 FDS-Datensatz (Auszug)

Materialeigenschaften bei der Verbrennung; Auszug aus Tabelle 3-4.14 [11]

Material	Ausbeute CO ₂ [g/g]	Ausbeute CO [g/g]	Ausbeute CH ₄ 's [g/g]	Ausbeute Ruß [g/g]	effektive Verbrennungs- wärme [kJ/g]	konvektiv freigesetzte Wärme [kJ/g]	konvektiver Wärmeanteil [1]	Verhältnis CO/CO ₂ [g/g]	Verhältnis Ruß/CO ₂ [g/g]
Wood (red oak)	1,27	0,004	0,001	0,015	12,4	7,8	0,63	0,0032	0,00079
Wood (douglas fir)	1,31	0,004	0,001	?	13	8,1	0,63	0,0031	0,00077
Wood (pine)	1,33	0,005	0,001	?	12,4	8,7	0,71	0,0038	0,00076
Wood (average)	0,86	0,005	0,001	0,015	12,6	8,2	0,66	0,0059	0,00117
PMMA	2,12	0,01	0,001	0,022	24,2	16,6	0,69	0,0048	0,00048
PE	2,76	0,024	0,007	0,06	38,4	21,8	0,57	0,0087	0,00254
PP	2,79	0,024	0,006	0,059	38,6	22,6	0,59	0,0087	0,00216
PS	2,33	0,06	0,014	0,164	27	11	0,41	0,0258	0,00601
Silicone	0,96	0,021	0,006	0,065	10,6	7,3	0,69	0,0219	0,00625
Polyester-1	1,65	0,07	0,02	0,091	20,6	10,8	0,53	0,0425	0,01213
Polyester-2	1,56	0,08	0,029	0,089	19,5	10,3	0,53	0,0513	0,01859
Polyester (average)	1,61	0,075	0,025	0,09	20,1	10,6	0,53	0,0466	0,01553
Nylon	2,06	0,038	0,016	0,075	27,1	16,3	0,61	0,0185	0,00777

Anlage 2 – Zusammenstellung der Eingabedaten für das Zonenmodell CFAST

Seite 1

Zusammenstellung der Eingabedaten für das Zonenmodell CFAST

Tabelle A2.1 – Erforderliche Rauchschürzenhöhen nach DIN 18232-2 für die Bemessungsziele $d = 4,00\text{ m}$ und $d = 5,00\text{ m}$

Bemessungsziel/Höhe der raucharmen Schicht d in m	Raumhöhe h in m			
	6,00	8,00	10,00	12,00
$d = 4,00\text{ m}$	2,50	4,50	6,50	8,50
$d = 5,00\text{ m}$	1,00	3,00	5,00	7,00

Tabelle A2.2 – Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach DIN 18232-2 – Bemessungsziel $d = 4,00\text{ m}$

Raumhöhe h in m	Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der NRA $A_w (A_g)$ in m^2	Erforderliche geometrisch freie Zuluftfläche A_{zu} in m^2
6,00	12,60 (18,53)	18,90
8,00	8,90 (13,09)	13,35
10,00	7,20 (10,59)	10,80
12,00	6,30 (9,26)	9,45

Tabelle A2.3 – Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach DIN 18232-2 – Bemessungsziel $d = 5,00\text{ m}$

Raumhöhe h in m	Aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche der NRA $A_w (A_g)$ in m^2	Erforderliche geometrisch freie Zuluftfläche A_{zu} in m^2
6,00	27,20 (40,00)	40,80
8,00	15,70 (23,09)	23,55
10,00	12,10 (17,79)	18,15
12,00	10,30 (15,15)	15,45

Tabelle A2.4 – Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach DIN 18232-2 unter Anwendung der Erleichterung A für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m^2 und 2600 m^2 mit dem Bemessungsziel $d = 4,00\text{ m}$

Raumhöhe h in m	2000 m^2		2600 m^2	
	$A_w (A_g)$ in m^2	A_{zu} in m^2	$A_w (A_g)$ in m^2	A_{zu} in m^2
6,00	17,64 (25,94)	26,46	25,20 (37,06)	37,80
8,00	12,46 (18,32)	18,69	17,80 (26,18)	26,70
10,00	10,08 (14,82)	15,12	14,40 (21,18)	21,60
12,00	8,82 (12,97)	13,23	12,60 (18,53)	19,90

Anlage 2 – Zusammenstellung der Eingabedaten für das Zonenmodell CFAST

Seite 2

Tabelle A2.5 – Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach DIN 18232-2 unter Anwendung der Erleichterung A für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m² und 2600 m² mit dem Bemessungsziel $d = 5,00$ m

Raumhöhe h in m	2000 m ²		2600 m ²	
	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²
6,00	38,08 (56,00)	57,12	54,40 (80,00)	81,60
8,00	21,98 (32,32)	32,97	31,40 (46,18)	47,10
10,00	16,94 (24,91)	25,41	24,20 (35,59)	36,30
12,00	14,42 (21,20)	21,63	20,60 (30,29)	30,90

Tabelle A2.6 – In Anlehnung an Erleichterung A nach DIN 18232-2 flächenbezogen erhöhte Werte A_w und A_{zu} für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m², 2600 m² und 3600 m² Bemessungsziel $d = 4,00$ m

Raumhöhe h in m	2000 m ²		2600 m ²		3600 m ²	
	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²
6,00	17,64 (25,94)	26,46	25,20 (37,06)	37,80	37,80 (55,59)	56,70
8,00	12,46 (18,32)	18,69	17,80 (26,18)	26,70	26,70 (39,26)	40,05
10,00	10,08 (14,82)	15,12	14,40 (21,18)	21,60	21,6 (31,76)	32,40
12,00	8,82 (12,97)	13,23	12,60 (18,53)	19,90	18,90 (27,79)	28,35

Tabelle A2.7 – In Anlehnung an Erleichterung A nach DIN 18232-2 flächenbezogen erhöhte Werte A_w und A_{zu} für die Rauchabschnittsgrößen von 2000 m², 2600 m² und 3600 m² Bemessungsziel $d = 5,00$ m

Raumhöhe h in m	2000 m ²		2600 m ²		3600 m ²	
	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²	A_w (A_g) in m ²	A_{zu} in m ²
6,00	38,08 (56,00)	57,12	54,40 (80,00)	81,60	81,60 (120,00)	122,40
8,00	21,98 (32,32)	32,97	31,40 (46,18)	47,10	47,10 (69,26)	70,65
10,00	16,94 (24,91)	25,41	24,20 (35,59)	36,30	36,30 (53,38)	54,45
12,00	14,42 (21,20)	21,63	20,60 (30,29)	30,90	30,90 (45,44)	46,35

Tabelle A2.8 – Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach Extrapolierung – Bemessungsziel $d = 4,00$ m

Raumhöhe h in m	$1,25 \times A_w$ (A_g) in m^2	$1,62 \times A_w$ (A_g) in m^2	$2,25 \times A_w$ (A_g) in m^2	$1,25 \times A_{zu}$ in m^2	$1,62 \times A_{zu}$ in m^2	$2,25 \times A_{zu}$ in m^2
6,00	15,75 (23,16)	20,41 (30,01)	28,35 (41,69)	23,62	30,62	42,52
8,00	11,12 (16,35)	14,42 (21,20)	20,02 (29,44)	16,69	21,63	30,04
10,00	9,00 (13,23)	11,66 (17,15)	16,20 (23,82)	13,50	17,49	24,30
12,00	7,87 (11,57)	10,21 (15,01)	14,17 (20,84)	11,81	15,31	21,26

Tabelle A2.9 – Notwendige Flächen A_w und A_{zu} nach Extrapolierung – Bemessungsziel $d = 5,00$ m

Raumhöhe h in m	$1,25 \times A_w$ (A_g) in m^2	$1,62 \times A_w$ (A_g) in m^2	$2,25 \times A_w$ (A_g) in m^2	$1,25 \times A_{zu}$ in m^2	$1,62 \times A_{zu}$ in m^2	$2,25 \times A_{zu}$ in m^2
6,00	34,00 (50,00)	44,06 (64,79)	61,20 (90,00)	51,00	66,10	91,80
8,00	19,62 (28,85)	25,43 (37,40)	35,32 (51,949)	29,44	38,15	52,99
10,00	15,12 (22,23)	19,60 (28,82)	27,22 (40,03)	22,69	29,40	40,84
12,00	12,87 (18,93)	16,69 (24,54)	23,17 (34,079)	19,31	25,03	34,76

Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 1 mittels des Zonenmodells CFAST

Tabelle A3.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 für das Bemessungsziel d = 4,00 m

RL 1	1600 m ²		2000 m ²		2600 m ²		3600 m ²	
	1 Raum = 1 Rauchabschnitt		2 Räume = 2 Rauchabschnitte		2 Räume = 2 Rauchabschnitte		3 Räume = 3 Rauchabschnitte	
h [m]	d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	4,42	4,37	-	4,38	-	4,37	-	-
8	4,69	4,68	-	4,67	-	4,67	-	-
10	4,87	4,89	-	4,87	-	4,88	-	-
12	4,96	5,01	-	4,98	-	4,99	-	-

Tabelle A3.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 1 für das Bemessungsziel d = 5,00 m

RL 1	1600 m ²		2000 m ²		2600 m ²		3600 m ²	
	1 Raum = 1 Rauchabschnitt		2 Räume = 2 Rauchabschnitte		2 Räume = 2 Rauchabschnitte		3 Räume = 3 Rauchabschnitte	
h [m]	d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	5,24	5,21	-	5,22	-	5,21	-	-
8	6,15	6,09	-	6,10	-	6,08	-	-
10	6,55	6,52	-	6,52	-	6,51	-	-
12	6,83	6,83	-	6,82	-	6,81	-	-

Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 2 mittels des Zonenmodells CFAST

Tabelle A4.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 für das Bemessungsziel d = 4,00 m

RL 2	2000 m ²			2600 m ²			3600 m ²			
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte			2 Räume = 2 Rauchabschnitte			3 Räume = 3 Rauchabschnitte			
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
10	5,88	5,71	6,79	6,60	6,36	6,13	-	6,36	6,13	-
12	6,07	5,87	6,71	6,35	6,35	6,02	-	6,35	6,02	-

Tabelle A4.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 2 für das Bemessungsziel d = 5,00 m

RL 2	2000 m ²			2600 m ²			3600 m ²			
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte			2 Räume = 2 Rauchabschnitte			3 Räume = 3 Rauchabschnitte			
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
10	7,40	7,30	7,95	7,91	7,76	7,69	-	7,76	7,69	-
12	7,44	7,17	8,26	8,03	8,13	8,13	-	8,13	8,13	-

Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 3 mittels des Zonenmodells CFAST

Tabelle A5.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 für das Bemessungsziel $d = 4,00\text{ m}$

RL 3	2000 m ²			2600 m ²			3600 m ²			
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte			2 Räume = 2 Rauchabschnitte			3 Räume = 3 Rauchabschnitte			
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	4,41	4,31	4,42	4,30	4,40	4,28	4,14	4,40	4,28	4,14
8	4,64	4,46	4,60	4,41	4,50	4,24	4,04	4,50	4,24	4,04
10	4,76	4,54	4,67	4,43	4,32	3,89	3,74	4,32	3,89	3,74
12	4,75	4,49	4,53	4,26	3,79	3,36	3,07	3,79	3,36	3,07

Tabelle A5.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 3 für das Bemessungsziel $d = 5,00\text{ m}$

RL 3	2000 m ²			2600 m ²			3600 m ²			
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte			2 Räume = 2 Rauchabschnitte			3 Räume = 3 Rauchabschnitte			
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	5,22	5,26	5,25	5,25	5,22	5,29	5,26	5,22	5,29	5,26
8	6,14	6,06	6,15	6,05	6,12	6,01	5,90	6,12	6,01	5,90
10	6,51	6,36	6,47	6,30	6,27	6,05	5,87	6,27	6,05	5,87
12	6,73	6,54	6,60	6,39	6,05	5,73	5,50	6,05	5,73	5,50

Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 4 mittels des Zonenmodells CFAST

Tabelle A6.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m

RL 4	2000 m ²			2600 m ²			3600 m ²			
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte			2 Räume = 2 Rauchabschnitte			3 Räume = 3 Rauchabschnitte			
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	4,92	4,89	5,21	5,21	5,34	5,46	5,46	5,34	5,46	5,46
8	5,57	5,45	6,43	6,35	7,02	7,10	7,08	7,02	7,10	7,08
10	5,99	5,81	7,22	7,09	8,12	8,09	8,01	8,12	8,09	8,01
12	6,16	5,95	7,57	7,40	8,57	8,44	8,32	8,57	8,44	8,32

Tabelle A6.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 4 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m

RL 4	2000 m ²			2600 m ²			3600 m ²			
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte			2 Räume = 2 Rauchabschnitte			3 Räume = 3 Rauchabschnitte			
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	5,35	5,44	5,50	5,59	5,52	5,71	5,78	5,52	5,71	5,78
8	6,78	6,78	7,16	7,20	7,26	7,44	7,49	7,26	7,44	7,49
10	7,54	7,45	8,22	8,17	8,76	8,91	8,92	8,76	8,91	8,92
12	7,87	7,73	8,74	8,63	9,64	9,64	9,59	9,64	9,64	9,59

Ergebnisse der Berechnungen des Rechenlaufs RL 5 mittels des Zonenmodells CFAST

Tabelle A7.1 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 für das Bemessungsziel d = 4,00 m

RL 5	2000 m ²		2600 m ²		3600 m ²		
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte		2 Räume = 2 Rauchabschnitte		3 Räume = 3 Rauchabschnitte		
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	4,77	4,71	5,09	5,06	5,24	5,31	5,29
8	5,26	5,12	5,94	5,83	6,63	6,61	6,53
10	5,57	5,38	6,47	6,30	7,49	7,37	7,25
12	5,67	5,44	6,66	6,45	7,71	7,50	7,33

Tabelle A7.2 – Ergebnisse des Rechenlaufs RL 5 für das Bemessungsziel d = 5,00 m

RL 5	2000 m ²		2600 m ²		3600 m ²		
	2 Räume = 2 Rauchabschnitte		2 Räume = 2 Rauchabschnitte		3 Räume = 3 Rauchabschnitte		
h [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 1 d [m]	Raum 2 d [m]	Raum 3 d [m]
6	5,31	5,39	5,44	5,50	5,46	5,63	5,68
8	6,59	6,55	7,03	7,03	7,16	7,29	7,31
10	7,24	7,13	7,83	7,75	8,39	8,42	8,37
12	7,59	7,43	8,22	8,09	9,00	8,92	8,82

Anlage 8 – Ergebnisse der Berechnungen der Einraum-Rechnung zu RL 3 mittels des Zonenmodells CFAST

Ergebnisse der Berechnungen der Einraum-Rechnung zu RL 3 mittels des Zonenmodells CFAST

Tabelle A8.1 – Ergebnisse der Ein-Raum-Rechnung zu RL 3 für das Bemessungsziel $d = 4,00$ m

Ein-Raum Rechnung	1600 m ²	2000 m ²	2600 m ²	3600 m ²
	1 Raum = 1 Rauchabschnitt	2 Räume = 2 Rauchabschnitte	2 Räume = 2 Rauchabschnitte	3 Räume = 3 Rauchabschnitte
h [m]	d [m]	d [m]	d [m]	d [m]
6	4,42	4,43	4,44	4,44
8	4,69	4,67	4,65	4,63
10	4,87	4,84	4,78	4,73
12	4,96	4,89	4,78	4,67

Tabelle A8.2 – Ergebnisse der Ein-Raum-Rechnung zu RL 3 für das Bemessungsziel $d = 5,00$ m

Ein-Raum Rechnung	1600 m ²	2000 m ²	2600 m ²	3600 m ²
	1 Raum = 1 Rauchabschnitt	2 Räume = 2 Rauchabschnitte	2 Räume = 2 Rauchabschnitte	3 Räume = 3 Rauchabschnitte
h [m]	d [m]	d [m]	d [m]	d [m]
6	5,24	5,26	5,27	5,29
8	6,15	6,17	6,18	6,18
10	6,55	6,54	6,52	6,45
12	6,83	6,80	6,72	6,50

Anlage 9 – CFAST-Eingabedatensatz für eine Ein-Raum-Rechnung

CFAST-Eingabedatensatz für eine Ein-Raum-Rechnung

Randbedingungen des Eingabedatensatzes:

BMG 4, Bemessungsziel $d = 5,00$ m, Rauchabschnittsfläche 1600 m^2 , Raumhöhe $h = 12,00$ m

```
VERSN 31600 D5,00 H 12,00
#VERSN 3 1600 D5,00 H 12,00
TIMES 1600 0 10 20 0
DUMPR D5R16H12.HI
ADUMP D5R16H12.CSV NF
TAMB 293.150 101300.0.000000
EAMB 293.150 101300.0.000000
HI/F 0.000000
WIDTH 50.0000
DEPTH 32.0000
HEIGH 12.0000
CEILI OFF WALLS OFF FLOOR OFF #CEILI -GYPSUM #WALLS -GYPSUM #FLOOR -PLYWOOD
HVENT 1 2 1 5.15000 3.00000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000
CVENT 1 2 1 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000
1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000
HVENT 1 2 2 15.1500 12.0000 11.0000 0.000000 0.000000 0.000000
CVENT 1 2 2 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000
1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000
1.00000
CHEMI 16.0000 50.0000 10.0000 1.95000E+007 293.150 493.150 0.300000
LFBO 1
LFBT 2
CJET ALL
FPOS -1.00000 -1.00000 0.000000
FTIME 10.0000 50.0000 100.000 150.000 200.000 250.000 300.000
350.000 400.000 450.000 500.000 550.000 600.000 650.000 700.000
750.000 800.000 856.000 900.000 1600.00
FMASS 0.000000 8.38974E-005 0.00209744 0.00838974 0.0188769 0.0335590
0.0524359 0.0755077 0.102774 0.134236 0.169892 0.209744 0.253790 0.302031
0.354467 0.411097 0.471923 0.536944 0.615385 0.615385 0.615385
FQDOT 0.000000 1636.00 40900.0 163600. 368100. 654400. 1.02250E+006
1.47240E+006 2.00410E+006 2.61760E+006 3.31290E+006 4.09000E+006 4.94890E+006
5.88960E+006 6.91210E+006 8.01640E+006 9.20250E+006 1.04704E+007 1.20000E+007
1.20000E+007 1.20000E+007
HCR 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000
0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000
0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000 0.0800000
OD 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000
0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000
0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000
CO 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000
0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000
0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000 0.0300000
SELECT 1 0 0
#GRAPHICS ON
DEVICE 1
WINDOW 0. 0. -100. 1280. 1024. 1100.
LABEL 1 970. 960. 0. 1231. 1005. 10. 15 00:00:00 0.00 0.00
GRAPH 1 100. 50. 0. 600. 475. 10. 3 TIME HEIGHT
GRAPH 2 100. 550. 0. 600. 940. 10. 3 TIME CELSIUS
GRAPH 3 720. 50. 0. 1250. 475. 10. 3 TIME FIRE_SIZE(kW)
GRAPH 4 720. 550. 0. 1250. 940. 10. 3 TIME O|D2|O()
HEAT 0 0 0 3 1 U
TEMPE 0 0 0 2 1 U
INTER 0 0 0 1 1 U
O2 0 0 0 4 1 U
```

Anlage 10 – FDS-Datensatz (Auszug)

FDS-Datensatz (Auszug)

Randbedingungen des Eingabedatensatzes:

BMG 4, Bemessungsziel $d = 4,00$ m, Rauchabschnittsfläche 1600 m^2 , Raumhöhe $h = 10,00$ m

```
&HEAD CHID='B' , TITLE= '1600m2,h=10,d=4' /
```

```
MISC DATABASE= 'C:\FDS3\DATABASE3\DATABASE3.DATA/'
```

```
MISC DATABASE_DIRECTORY= 'C:\FDS3\DATABASE3\'
```

```
&TIME TWFIN=1500. /
```

```
&MISC NFRAMES=40 , DTCORE=30./
```

```
&GRID IBAR= 48,  
      JBAR=75,  
      KBAR=30/
```

```
&PDIM XBAR0=0.          ,XBAR= 32. ,  
      YBAR0=0.          ,YBAR= 50.,  
      ZBAR0=0.          ,ZBAR= 10. /
```

```
&SURF ID= 'FEUER', HRRPUA=300., TAU_Q= -850
```

```
&OBST XB= 12.84, 19.16, 21.84, 28.16,0.,0.5,  
SURF_IDS='FEUER','INERT','INERT',BLOCK_COLOR='RED'/
```

```
&VENT XB= 5.9, 6.9, 9.5, 10.5, 10., 10., SURF_ID= 'OPEN',VENT_COLOR='CYAN'/  
&THCP XB= 5.9, 6.9, 9.5, 10.5, 10., 10., QUANTITY= 'MASS FLOW', LABEL='M_RWA 01'/  
&THCP XB= 5.9, 6.9, 9.5, 10.5, 10., 10., QUANTITY= 'TEMPERATURE', LABEL= 'T_RWA 01'/
```

```
&VENT XB= 12.3, 13.3, 9.5, 10.5, 10., 10., SURF_ID= 'OPEN',VENT_COLOR='CYAN'/  
&THCP XB= 12.3, 13.3, 9.5, 10.5, 10., 10., QUANTITY= 'MASS FLOW', LABEL='M_RWA 02'/  
&THCP XB= 12.3, 13.3, 9.5, 10.5, 10., 10., QUANTITY= 'TEMPERATURE', LABEL= 'T_RWA 02'/
```

```
&VENT XB= 0., 0. , 24.10, 25.90, 0., 3., SURF_ID= 'OPEN',VENT_COLOR='BLUE'/  
&THCP XB= 0., 0. , 24.10, 25.90, 0., 3., QUANTITY= 'MASS FLOW', LABEL='M_TOR 01'/  
&THCP XB= 0., 0.5, 24.10, 25.90, 0., 3., QUANTITY= 'TEMPERATURE', LABEL= 'T_TOR 01'/
```

```
&VENT XB= 32., 32. , 24.10, 25.90, 0., 3., SURF_ID= 'OPEN',VENT_COLOR='BLUE'/  
&THCP XB= 32., 32. , 24.10, 25.90, 0., 3., QUANTITY= 'MASS FLOW', LABEL='M_TOR 02'/  
&THCP XB= 32., 31.5, 24.10, 25.90, 0., 3., QUANTITY= 'TEMPERATURE', LABEL= 'T_TOR 02'/
```

```
&PLD DTSAM= 30. , QUANTITIES= 'TEMPERATURE' , 'U-VELOCITY' , 'V-VELOCITY' , 'W-  
VELOCITY', 'soot density' /
```

```
&SLCF DTSAM= 5. , PBX= 1. , QUANTITY= 'soot density' /  
&SLCF DTSAM= 5. , PBX= 25. , QUANTITY= 'soot density' /  
&SLCF DTSAM= 5. , PBX= 1. , QUANTITY= 'soot density' /  
&SLCF DTSAM= 5. , PBX= 36. , QUANTITY= 'soot density' /
```