

Berechnungsgrundlagen mit Beispielen für die Auslegung von Rauchabzugsanlagen

Dr.-Ing. Ulrich Max, AGB Bruchsal

Februar 2006

In Zusammenarbeit mit:

**Verein zur Förderung von Ingenieurmethoden
im Brandschutz e.V. – VIB, Holzminden**

Inhaltsverzeichnis

Abschnitt	Seite
1 Problemstellung	3
2 Physikalische Grundlagen zur Entrauchung für Zonenmodelle	6
2.1 Grundlagen der Berechnung	6
2.1.1 Modellierung des Brandraumes	7
2.1.2 Modellierung von Raumsystemen	9
2.1.3 Modellierung der Massenbilanzen	12
2.1.4 Modellierung der Energiebilanzen	14
2.2 Bemessungsbrände	17
2.2.1 Allgemeines	17
2.2.2 Kalorische Daten brennbarer Stoffe	17
2.2.3 Bemessungsbrände als Brandleistungskurven	21
3 Handrechenformel für die Berechnung	32
3.1 Grundlagen der Berechnung für RA im Dach nach Modell DIN 18232-2	32
3.2 Ermittlung der am Plume eingemischten Luftmenge	38
3.3 Flammenhöhe	39
3.4 Massenströme nach verschiedenen Theorien	41
3.5 Überprüfung des Näherungsverfahrens durch Wärmebilanzrechnung und mit Literaturangaben	45
3.6 Gang der Berechnung für verschiedene Plumeformeln:	52
3.6.1 Berechnung für fest vorgegebenes Verhältnis von Zuluft und NRA-Flächen	54
3.6.2 Berechnung der Zuluftflächen bei vorgegebenen NRA-Flächen	64
3.6.3 Berechnung der NRA-Flächen bei vorgegebenen Zuluftflächen	67
3.6.4 Berechnung der NRA-Flächen bei vorgegebener Zuluftgeschwindigkeit	70
3.7 Grundlagen der Berechnung für RA in Außenwänden nach Zonenmodell	73
4 Ergebnisse	80
4.1 Vergleich Berechnung nach DIN 18232-2 und Zonenmodellberechnung MRFC	80
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	84
6 Literatur	85

1 Problemstellung

Bei der Beobachtung der täglichen Baupraxis fällt auf, dass zunehmend komplexere Gebäude errichtet werden. Dabei können teilweise die bestehenden bauordnungsrechtlichen Vorschriften nicht oder nicht in Gänze erfüllt werden. Diese Abweichungen beziehen sich häufig auf die Überschreitung von zulässigen Rettungsweglängen, so dass Personen, die sich in den betroffenen Gebäuden befinden, durch die Einwirkung von Rauchgasen beeinträchtigt werden können. Weiterhin kann in ausgedehnten Gebäuden die Wirksamkeit der manuellen Brandbekämpfung durch die Feuerwehr eingeschränkt werden. Als Kompensationsmaßnahmen für diese Überschreitungen werden häufig anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen eingesetzt, so dass wieder gleichwertige Bedingungen geschaffen werden können. Als geeignete Maßnahmen dafür sind Anlagen zur Rauchableitung anzusehen, bei denen der Personenschutz dadurch verbessert wird, dass die Rauchgase ins Freie abgeleitet werden und damit die Personen nicht mehr belasten, die dann die von Rauchgasen weitgehend freigehaltenen Bereichen passieren oder dort eine Brandbekämpfung durchführen können. Für derartige Gebäude werden in der Regel ganzheitliche Brandschutzkonzepte erstellt, bei denen der Nachweis zu führen ist, dass die vorgesehenen Maßnahmen tatsächlich gleichwertig sind und die Schutzziele der Bauvorschriften in gleicher Weise erfüllt werden.

Die Festlegung der Schutzziele ist nicht in allen Fällen in den Bauvorschriften mit konkreten Anforderungen festgelegt. Sie sind aber teilweise ableitbar aus den allgemeinen Anforderungen zum Brandschutz. Bei weitgehenden Abweichungen sind im Brandschutzkonzept die zu stellenden Anforderungen noch zu konkretisieren. Dabei besteht ein großer Unterschied darin, ob die zu stellenden Anforderungen für die manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr oder für die Selbstrettung von Personen bzw. für den möglichen Aufenthalt von Personen im Gebäude bis zur Fremdrettung durch Rettungskräfte gelten sollen. Üblicherweise werden dabei für folgende Eigenschaften Anforderungen gestellt

- Dicke einer raucharmen Schicht, in der Aufenthalt von Personen möglich ist
- Rauchgastemperaturen (Strahlung)
- Temperatur (der unteren Schicht)
- Rauchgasbestandteile (der unteren Schicht)
- Sichtweite (in der unteren Schicht)

Bei der Erarbeitung neuerer Vorschriften für besondere Nutzungen werden unter bestimmten Voraussetzungen explizite Anforderungen an die Installation von Anlagen zur Rauchableitung gestellt. In Industriebauten ist für Räume mit einer Grundfläche von mehr als 1 600 m² nachzuweisen, dass dort eine „raucharme“ Schicht erreicht wird, die eine Dicke von mindestens 2,50 m hat. Ähnliches gilt für Versammlungsstätten. Auch in derart genutzten Räumen ist ab einer bestimmten Raumgröße eine Dicke der raucharmen Schicht von mindestens 2,5 m nachzuweisen. Bei einer nachgewiesenen Dicke der raucharmen Schichten von mehr als 5 m darf die zulässige Rettungsweglänge für jede zusätzliche Höhe der raucharmen Schicht von

2,5 m um 5 m verlängert werden. So kann z. B. die Rettungsweglänge in Räumen, die bis zu einer Höhe von 10 m entraucht werden, um 10 m von 30 m auf insgesamt 40 m verlängert werden.

Durch diese Regelungen sowie die Nachweispflicht bei bestehenden Abweichungen besteht daher in der Praxis ein zunehmender Nachweisbedarf. Dafür wurden in der Vergangenheit und werden auch noch heute ingenieurmäßige Verfahren entwickelt, mit denen die erforderlichen Nachweise geführt werden können. Als solche Verfahren dazu sind zu nennen:

- Normen,
- Handrechnungen einzelner Phänomene (z. B. Rauchgasproduktion),
- Zonenmodelle,
- CFD-Berechnungen (Feldmodelle),
- Systemcodes,
- Physikalische Modelle,
- Rauchversuche.

Erste Ansätze für die Berücksichtigung von thermodynamischen Prozessen bei der Festlegung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen in Industriebauten mit ingenieurmäßigen Verfahren sind bei der Entwicklung der DIN 18 230-1 zu beobachten. Diese beziehen sich vornehmlich auf die im Brandfall zu erwartenden Temperaturen und damit auf die erforderliche Widerstandsfähigkeit von Bauteilen gegenüber Temperaturbelastungen. Dabei ist die in einem Raum vorhandenen Menge der brennbaren Stoffe sowie deren Abbrandverhalten von besonderer Bedeutung.

Zur Rauchableitung in der Entstehungsphase eines Brandes sind NRA-Anlagen in DIN 18 232-2 genormt. Diese Einrichtungen werden automatisch ausgelöst und dienen der Rauchfreihaltung von Rettungswegen für Personen und unterstützen die manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr. Wärmeabzüge (WA) werden durch den Brand freigegeben und sind in der frühen Brandphase nicht geeignet, dies sicherzustellen, weil bereits eine nennenswerte Brandwirkung vorliegen muss, damit die Flächen durch brandbedingte Temperaturerhöhungen zerstört werden können. Der wesentliche Einsatzbereich liegt darin, dass die tragenden Bauteile durch Abfuhr eines großen Teiles der entstehenden Rauchgase thermisch entlastet werden und somit ihre Tragfähigkeit erhalten können. Ein Prüfverfahren für WA ist in DIN 18 232-4 und ein zugehöriges Bewertungsverfahren als Arbeitspapier in DIN 18 232-10 genormt bzw. in der Vorbereitung dazu. Die Wirkungsweise bezüglich der Rauchableitung der beiden unterschiedlichen Einrichtungen ist vergleichbar. Für NRA wie für WA ist der thermische Auftrieb die treibende Kraft für die Rauchableitung über Öffnungen im Bereich der Rauchgasschicht. Dabei darf die Nachströmung von Zuluft über unten angeordnete Öffnungen nicht vernachlässigt werden. Bezüglich der bei einem Brand ablaufenden thermodynamischen Prozesse werden dabei konservative Annahmen und Vereinfachungen getroffen.

Im Gegensatz zu den NRA werden bei mechanischen Rauchabzugsanlagen (MRA) die Rauchgase über Absauggeräte aus dem Bereich der Rauchgasschicht abgeführt. Die Wirksamkeit der Anlagen fällt dabei mit zunehmender Temperatur ab, weil die abgeführten Massenströme mit der bei zunehmender Temperatur der Rauchgase geringer werdenden Dichte abnehmen. Die Wirksamkeit der MRA wird daher konservativ abgeschätzt, wenn die Rauchgastemperaturen überschätzt werden. Bei NRA ist dagegen die Betrachtung konservativ, wenn die Rauchgastemperaturen unterschätzt werden.

Bei Zonenmodellen werden die Massen- und Energiebilanzen für jede Zone getrennt formuliert und in gewählten Zeitschritten gelöst. Einflüsse, die durch Impulse hervorgerufen werden, sind i. A. vernachlässigt, bzw. werden durch Submodelle näherungsweise berücksichtigt (z. B. Plume). Für die Formulierung dieser Bilanzen werden Submodelle verwendet. Komplexere oder größere Räume müssen in kleinere Raumbereiche aufgeteilt und miteinander gekoppelt werden. (Vollbrandmodelle und Einraummodelle scheiden damit automatisch aus, wenn derartige Probleme zu untersuchen sind.)

Bei CFD-Berechnungen (Feldmodelle) wird jeder einzelne Raum in eine Vielzahl von kleinen Volumen unterteilt, in denen die Temperatur sowie Druck und Strömungsgeschwindigkeiten in die verschiedenen Richtungen des Raumes berechnet werden. Die Modellierung des Raumes mit den verschiedenen Volumina stellt eine wichtige Aufgabe für die Anwender von CFD-Programmen dar.

In der Kerntechnik werden so genannte „Systemcodes“ verwendet, die für thermodynamische Problemstellungen, insbesondere bei Freisetzung von Dampf in Kernkraftwerken, verwendet werden. Diese wurden zeitweise ebenfalls an Fragestellungen im Zusammenhang mit Entrauchungsberechnungen eingesetzt, werden aber in der Zwischenzeit im konventionellen Brandschutz kaum noch eingesetzt.

Physikalische Modelle und Rauchversuche unterscheiden sich im Wesentlichen durch den Maßstab der Geometrieabbildung. Physikalische Modelle werden im Verlauf der Planung eingesetzt, während Rauchversuche i. d. R. am fertigen Gebäude vor allem als Funktionstest für Anlagen zur Rauchableitung durchgeführt werden. Mit physikalischen Modellen werden Strömungen und Temperaturentwicklungen im verkleinerten Maßstab nachgebildet. Dabei können naturgemäß nicht alle thermodynamisch relevanten Kenngrößen berücksichtigt werden. Bei größeren Maßstäben und größeren Brandleistungen führt dies zu deutlichen Abweichungen zwischen den im Modell und im tatsächlichen Gebäude gemessenen Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten.

Im folgenden Beitrag werden die wesentlichen Grundlagen für die Dimensionierung dieser Öffnungen dargestellt. Zunächst werden die allgemeinen Formulierungen für eine Modellierung in Zonenmodellen beschrieben. Aus diesen Formulierungen ist ein stark vereinfachendes Rechenmodell abgeleitet, das für die Auslegung nach DIN 18 232-2 verwendet wurde. Dieses Verfahren wird mit Beispielen unterlegt. Mit

diesem Verfahren können auch die erforderlichen Volumenströme für eine mechanische Rauchableitung (MRA) näherungsweise bestimmt werden.

Die Anwendung der neuen DIN 18 232-2 aus dem Jahr 2003 ist unter den Brandschutzexperten heftig umstritten. Der wesentliche Grund dafür besteht darin, dass die Norm mit ihrem Bemessungsverfahren nicht nur für die manuelle Brandbekämpfung mit geringeren Anforderungen an die Zusammensetzung der raucharmen Schicht sondern auch für einen längeren Aufenthalt von Personen ohne Atemschutz möglich sein soll. Der Raucheintrag an Zuluftöffnungen im Bereich oder in der Nähe der Rauchgasschicht sowie eine Rauchausbreitung über eine größere Fläche hinaus wird daher durch die konsequente Bildung von Rauchabschnitten durch entsprechend dimensionierte Rauchschrägen sowie durch konstruktive Vorschriften für die Höhenlage der Zuluftöffnungen realisiert. Mit dem im Folgenden vorgestellten Näherungsverfahren können die Auswirkungen der o. g. Effekte nicht berücksichtigt werden. Dies ist allerdings durch die Anwendung von Rechenmodellen z. B. Zonenmodellen oder CFD-Modellen möglich. Daher wird in der aktuellen Fassung der DIN 18 232-2 deren Anwendung explizit zugelassen.

2 Physikalische Grundlagen zur Entrauchung für Zonenmodelle

2.1 Grundlagen der Berechnung

Im Folgenden werden die physikalischen Grundlagen von Zonenmodellen beschrieben, wobei insbesondere auf die schon sehr weit entwickelten Mehrraumzonenmodelle eingegangen wird. Grundlage der vorliegenden Beschreibung ist das Brandsimulationsmodell MRFC (Multi-Room-Fire-Code), das besonders im deutschsprachigen Raum eingesetzt wird. Das Programm MRFC wurde erstmalig in [8] beschrieben. Inzwischen wurde es generell erweitert und dem Stand der Technik angepasst. Anhand zahlreicher Verifizierungen durch Nachrechnungen von Versuchsergebnissen und „blinden“ Vorausrechnungen von Experimenten konnte gezeigt werden, dass das Programm MRFC für die Unterstützung bzw. Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz gut geeignet ist.

Dem Programmpaket MRFC (**Multi-**R**oom-**F**ire-**C**ode) liegt ein Mehrraum-Mehrzonen-Modell zu Grunde, bei dem über eine Kopplung von nahezu beliebig zugeordneten Räumen mit jeweils mehreren Zonen, die das Brandgeschehen bestimmenden Parameter wie Gas- und Bauteiltemperaturen sowie Druckverteilungen und die daraus resultierenden Massenströme berechnet werden können. Beim Zwei-Zonen-Modell bestehen die beiden betrachteten Schichten im Raum aus Luft und Rauchgasen, für die jeweils eine homogene Temperaturverteilung angenommen wird. Die Massen- und Energieströme werden für den Brandbereich (Fireplume) sowie getrennt für beide Schichten im Raum formuliert und im Programm iterativ berechnet.**

2.1.1 Modellierung des Brandraumes

Grundlage des Brandraummodells ist ein rechteckiger Raum mit rechteckigen, vertikalen Seitenfenstern und Dachöffnungen als Ventilationsöffnungen, wie es die Abb. 2-1 verdeutlicht. Als Feuer wird ein lokaler Brand auf dem Boden des Raumes angenommen, wobei der Brandherd sich horizontal in zwei Richtungen ausbreiten kann. Der Brandverlauf wird entsprechend der Segmente im Brandraum in folgender Weise modelliert.

- I Der Brennstoff bzw. die Brandlast wird entzündet und brennt mit einer veränderlichen Abbrandrate $\dot{R}$ unter Energiefreisetzung ab, bis das Feuer erlischt oder gelöscht wird.
- II Die durch die Energiefreisetzung entstandenen Verbrennungsgase steigen aufgrund der Dichteunterschiede zur umgebenden Luft nach oben und vermischen sich zum Teil mit dieser. Hier im Plume verringern sich mit wachsender Höhe die Temperaturen und die Geschwindigkeit der Gase, während sich dagegen die Gesamtmasse und die Dichte erhöhen. Als Annahme gilt, dass die Verbrennung – d. h. der Bereich der leuchtenden Flamme – im Plume abgeschlossen ist und lediglich heiße Gase nach oben gelangen. Die leuchtende Flamme sendet Energie durch Strahlung aus (Flammenstrahlung). Die Hauptabstrahlungsrichtung ist die Normale zur Plumeachse. Der Feuerplume wirkt als treibende Kraft (Pumpe) im Raum.
- III In der Heißgasschicht, die sich wegen der Dichteunterschiede zur Umgebungsluft unter der Brandraumdecke ausbildet, strömt die gesamte Masse der beim Brand entstehenden Rauchgase. Nachdem sich während des Brandes durch die einströmenden Gase eine gewisse Schichtung in der Heißgasschicht ausgebildet hat, wird im Modell eine sofortige und vollständige Durchmischung der Rauchgase angenommen, d. h. es wird für den Bereich der Gasschicht gleichmäßige Temperatur, Dichte und Zusammensetzung zu jedem betrachteten Rechenzeitschritt vorausgesetzt. Weiterhin wird keine Vermischung mit der darunter liegenden Kaltluft angenommen. In Abhängigkeit von der Abbrandgeschwindigkeit $\dot{R}$ wächst die Gasschicht und beginnt, wenn sie die Höhe h' (s. Abb. 2-1) erreicht hat, wegen der Auftriebskräfte Gas aus den Fensteröffnungen und soweit eine Öffnung der NRA's erfolgt ist, auch aus den Dachöffnungen hinaus zu drücken.
- IV Der Raum unter der Heißgasschicht wird durch normale Umgebungsluft ausgefüllt. Die Luft wird zur Verbrennung in Segment I und II benötigt. Sie wird über die Einmischung aus der Heißgasschicht, die Aufheizung durch den Fußboden und

die angrenzenden Wände langsam erwärmt. Während eines Brandes gibt es verschiedene Möglichkeiten für die Massenänderung des Segmentes IV:

1. Zu Beginn des Brandes wirkt die Heißgasschicht wie ein Kolben, und kalte Luft wird unten aus dem Brandraum herausgedrückt.
 2. Die Gasschicht erreicht die Höhe h' , und es beginnt Gas aus dem Fenster auszuströmen. Ebenso wird noch Luft des Segmentes IV nach außen gedrückt. (Die Dachöffnung wird als geschlossen betrachtet).
 3. Es tritt ein Umschlag der Kaltluftströmungsrichtung ein. Heiße Gase strömen aus der Fensteröffnung aus, und kalte Luft wird durch den Feuerplume eingesaugt, damit die Gesamtmassenbilanz des Brandraumes erfüllt wird.
 4. Bei zu starker Abbrandrate wächst die Heißgasschicht zu schnell; dadurch wird der Zufluss von kalter Luft durch die Größe der Öffnung reguliert. Man spricht dann von einem ventilations-gesteuerten Brand, da nicht genug Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung in ausreichender Menge zur Verfügung steht.
- V Die Decke des Brandraumes ist die Fläche hinter der Gasschicht des Segments III. Sie setzt sich zusammen aus der Decke des Raumes und den Teilen der Seitenwände, die von der Gasschicht ebenfalls überdeckt werden. Da die Gasschicht in ihrer Höhe von den Ventilationsöffnungen und der Abbrandrate abhängt, verändert sich ebenso die Größe der Segmentfläche V. Die Wärmeverluste durch die Decke und Wände werden durch die Fourier-Gleichung beschrieben. Die Belastung der Innenoberfläche erfolgt durch Wärmestrahlung, die von allen Segmenten des Brandraumes herrührt und von konvektiven Einflüssen zwischen Gas und Wand.
- VI Die Bodenfläche des Brandraumes ist die Fläche hinter der kalten Luftschicht (Segment IV). Die Aufheizung dieses Segments erfolgt lediglich durch Wärmestrahlung. Durch konvektive Einflüsse zwischen Boden VI und kalter Luftschicht IV wird die Luftschicht erwärmt.

Im Falle, dass die Heißgasschicht die Flashover-Temperatur erreicht oder der Brandherd sich fast vollständig (ca. 80 %) über den Boden ausgebreitet hat, geht der Brand in den Vollbrand über.

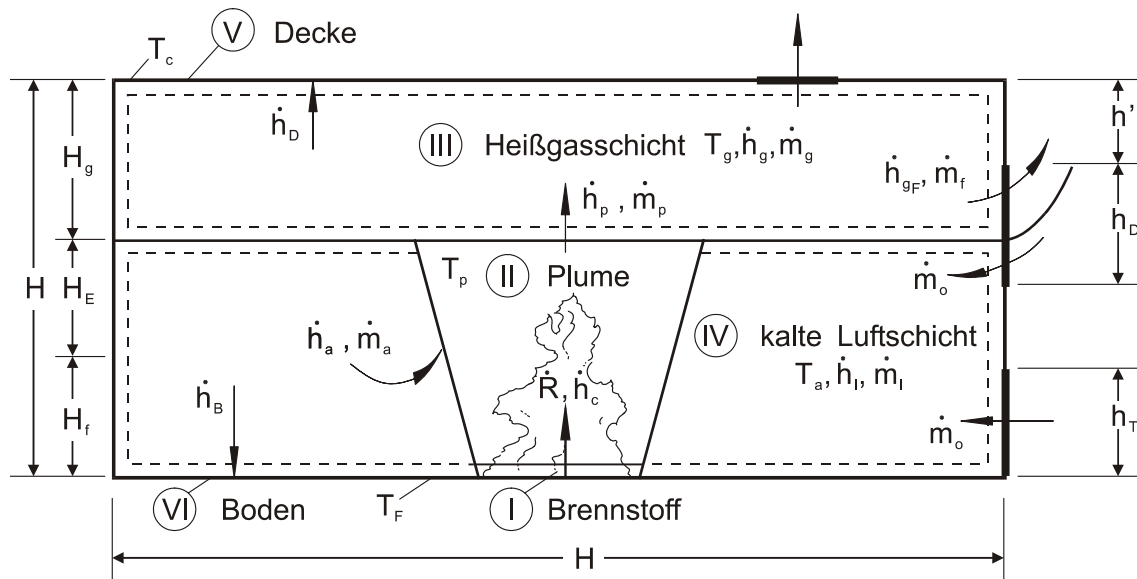


Abb. 2-1: Brandraummodell mit Geometrie, Segmenten, Massen- und Energieströmen

Ziel dieser Brandraummodellierung ist es, die Prozesse zu beschreiben, die in den einzelnen Segmenten ablaufen und ebenso die gegenseitige Beeinflussung der Brandraumsegmente untereinander. Dazu werden die Zustände im Segment durch Gleichungen beschrieben, die miteinander verknüpft sind. Die Zustände im Brandraum werden zeitabhängig dargestellt, so dass die Entwicklung des Feuers, die Abbrandrate, die Temperaturerhöhung, die Änderung der Massenströme und die örtlichen Wärmestromdichten erfasst werden. Die meisten verwendeten Gleichungen sind vom einfachen algebraischen Typ, einige sind gewöhnliche Differentialgleichungen erster Ordnung. Zur Berechnung der Bauteiltemperaturen in der Decke, im Fußboden und in den Wänden wird die Fourier-Gleichung verwendet.

2.1.2 Modellierung von Raumsystemen

Wird der Brandraum mit anderen Räumen und der Umgebung verbunden, ergibt sich ein Mehrraum-Zonenmodell. Es wird jedoch stets angenommen, dass das Feuer im Brandraum verbleibt, d. h. es gibt einen Brandraum und angrenzende Räume, die mit heißen Rauchgasen oder Rauchgasschichten gefüllt oder teilweise gefüllt sind.

Auf der Abb. 2-2 ist ein Element des Modells mit unterschiedlichen Annahmen für den betreffenden Raum dargestellt. Dabei ist der Raum im Aufriss aus einer betrachteten Mehrraumgeometrie herausgeschnitten. Je nach Brandverlauf sind für die Berechnungen unterschiedliche Annahmen für den Gaskörper zu treffen. Dieser ist bei einem vorhandenen beziehungsweise in der Ausbildung begriffenen Brand in zwei Gaskörper (Fälle 2a, 2b und 3a, 2b und 3) aufgeteilt. Sonst wird für jeden Raum eine einzige Schicht mit homogener Temperaturverteilung berücksichtigt (Fälle 1 und 4). Der eigentliche Flammenbereich wird gesondert behandelt (nur im Brandraum).

Je nach Ventilationsverhältnissen und Brandverlauf können in den einzelnen Räumen somit eine, zwei oder drei Zonen vorliegen, womit das Brandgeschehen abgebildet wird.

Im Modell werden folgende Fälle unterschieden (vgl. Abb. 2-2):

- Fall 1: Der Raum besteht aus einer einzigen kalten Schicht, die noch nicht verraucht ist. Das ist der Ausgangszustand für alle Räume. Er gilt solange, bis evtl. ein Zustrom von Brandrauch aus bereits verrauchten Nachbarräumen stattfindet.
- Fall 2a: Bei Brandbeginn bildet sich im Brandraum zunächst der Plume aus, der sich allmählich flächenartig ausbreitet. Der Raum besteht dabei solange aus einem heißen Plume sowie einer kalten Schicht über die gesamte Hallenhöhe, bis der betrachtete Bereich über dem Brandherd soweit erwärmt ist, dass sich ein Ceiling Jet ausbilden kann.
- Fall 2b: Ausgehend von Fall 2a breitet sich daran anschließend der Brandrauch in Form eines sogenannten Ceiling Jet aus. Dabei bildet sich eine Brandrauchfront mit variabler Schichthöhe, die mit der Zeit den gesamten Deckenbereich der Halle ausfüllt. Dabei werden für den oberen Teil des Plumes und dem Ceiling Jet die gleichen homogenen Temperaturen angenommen.
- Fall 3a: Der Brandraum besteht aus einem heißen Plume (Flammenzone und Brandrauchzone) und einer Brandrauchschicht mit einer homogenen Mischtemperatur, sowie einer sich langsam erwärmenden unteren Schicht mit ebenfalls homogenen Temperaturen. Im Programm wird berechnet, ob es unter diesen Bedingungen vorher zu einem Flashover im Raum kommt. Im Extremfall verschwindet die untere erwärmte Schicht, d. h. es kommt zu einem Vollbrand in dem Raum.
- Fall 3b: Bei diesem Raum fehlt der durch den Brand bedingte Plume. Durch Zustrom von Brandrauch aus bereits verrauchten angrenzenden Räumen hat sich jedoch eine Brandrauchschicht der Höhe z gebildet.
- Fall 4: Der Raum besteht nur aus einer verrauchten heißen Schicht. Dies trifft dann zu, wenn die Brandfläche die gesamte Grundfläche der Halle bedeckt oder sich die Brandrauchschicht über die gesamte Hallenhöhe erstreckt (Vollbrand).

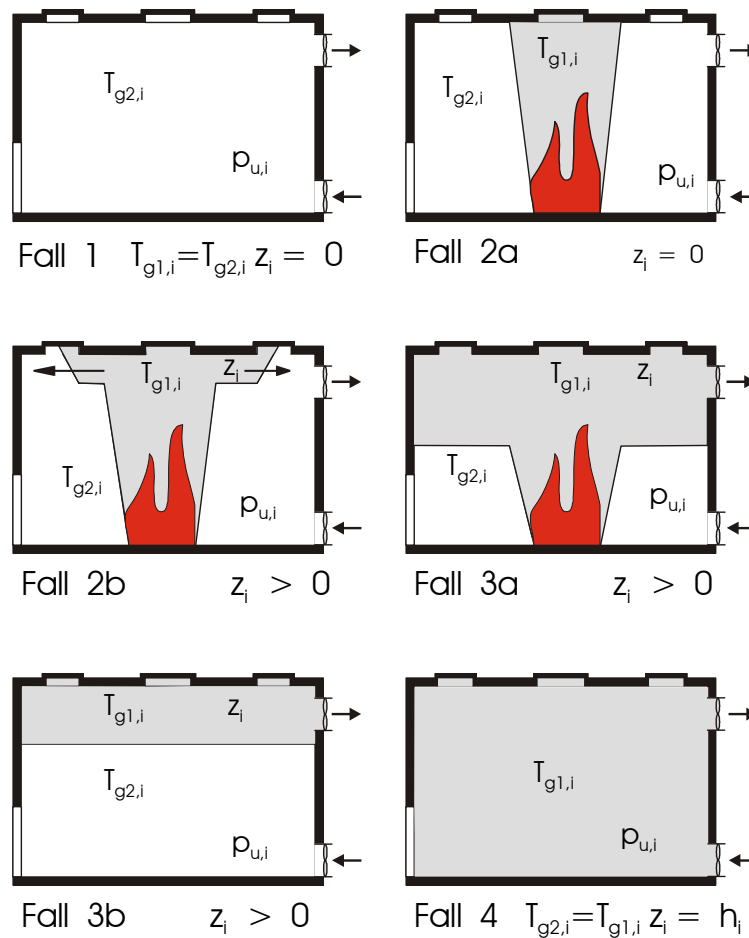


Abb. 2-2: Typische Raumelemente bei einer Mehrraumbetrachtung gemäß MRFC mit unterschiedlicher Aufteilung des Brandherdes und Brandrauches bzw. der Raumtemperaturen je nach Brandverlauf nach [4]

Als unbekannte Größen gehen in das Rechenmodell in den dargestellten Fällen 2 und 3 für jeden Raum i folgende physikalische Größen in die Berechnung ein:

- Gastemperatur der heißen Zone $T_{g1,i}$
- Gastemperatur der warmen Zone $T_{g2,i}$
- Höhe der Brandrauchschicht z_i
- Druck am Fußboden $p_{u,i}$

Mit diesen Unbekannten lassen sich alle Energie- und Massenströme bestimmen. Für die Berechnung der Decken-, Fußboden- und Wandtemperaturen muss raumweise zusätzlich für jedes Bauteil die Fourier-Gleichung gelöst werden. Die Kopplung zwischen einzelnen Räumen erfolgt dadurch, dass die Abflüsse aus den angekoppelten Räumen als Zuflüsse der vorgeschalteten Räume wieder in die Bilanz eingehen. Die Verbindung zwischen den Brandrauchschichten und den kalten

Schichten wird über Einmischströme und somit über die Bilanz des Plumes hergestellt.

Zur Lösung stehen für jede Schicht eine Massen- und eine Energiebilanz zur Verfügung. Das entstehende umfangreiche Gleichungssystem wird mit einer modifizierten Powell Hybrid Methode gelöst. Ausgehend von einem Startwert (alter Zustand) werden dabei die Unbekannten solange variiert, bis alle Gleichungen mit einer vorgegebenen Genauigkeit erfüllt sind. Räume im Sinne des Rechenprogramms können sein:

- Brandabschnitte, Brandbekämpfungsabschnitte (in Ausnahmefällen),
- einzelne baulich ausgebildete Räume,
- Hallenbereiche oder Räume die durch
 - Einbauten,
 - Teilabtrennungen,
 - virtuelle Trennungen

in miteinander verbundene Raumbereiche unterteilbar sind.

Letzteres ist gegeben, wenn die Halle zumindest teilweise durch im Raum angeordnete Unterzüge oder Einbauten in verschiedene Bereiche unterteilt ist. Solche Bereiche werden im Folgenden als „virtuelle Räume“ oder „virtuelle Raumbereiche“ bezeichnet. Diese sind dann durch sehr große Öffnungen, die weitgehend die gesamte Verbindungsfläche der Raumbereiche einnehmen.

Unter der Voraussetzung, dass in dem betrachteten Raumbereich zwei Schichten und im Brandraum der Brandherd vorliegen, ergeben sich für die Massen- und Energiebilanzen in den beiden Schichten der betrachteten Räume die im Folgenden beschriebenen Gleichungssysteme.

2.1.3 Modellierung der Massenbilanzen

Die beiden Massenbilanzen, die gelöst werden, lauten für den Raum i bei zwei Zonen (vgl. Abb. 2-3):

für die Brandrauchschicht

$$dm_{1,i} / dt + \sum \dot{m}_{s,ij} - \sum \dot{m}_{s,ji} - \dot{m}_{e1,i} + \dot{m}_{e2,i} - \dot{R}_i = 0 \quad \text{Gl. (2.1)}$$

für die untere Gasschicht

$$dm_{2,i} / dt + \sum \dot{m}_{a,ij} - \sum \dot{m}_{a,ji} - \dot{m}_{e1,i} + \dot{m}_{e2,i} = 0 \quad \text{Gl. (2.2)}$$

Darin sind:

- $dm_{1,i}$ Massenstromänderungen der Rauchgasschicht im Raum i
 $dm_{2,i}$ Massenstromänderungen der unteren Gasschicht im Raum i
 $\dot{m}_{a,ij}$ Massenströme an Öffnungen in der unteren Gasschicht von Raum i nach Raum j
 $\dot{m}_{a,ji}$ Massenströme an Öffnungen in der unteren Gasschicht von Raum j nach Raum i
 $\dot{m}_{s,ij}$ Massenströme an Öffnungen in der oberen Gasschicht von Raum i nach Raum j
 $\dot{m}_{s,ji}$ Massenströme an Öffnungen in der oberen Gasschicht von Raum j nach Raum i
 $\dot{m}_{e1,i}$ Massenströme durch Einmischung in den Plume i
 $\dot{m}_{e2,i}$ Massenströme der Verbrennungsluft der Brandquelle i
 $\dot{R}_i$ Massenstrom der Verbrennungsprodukte des brennbaren Stoffes der Brandquelle i

Für den Brandraum sind in Abb. 2-3 die Massenströme exemplarisch dargestellt, die in die Berechnungen eingehen. Die Massenströme zwischen den einzelnen Räumen und der Umgebung können im Programm MRFC zur Zeit in folgender Form berücksichtigt werden:

- Massenströme durch vertikale Öffnungen,
- Massenströme durch horizontale Öffnungen,
- Massenströme durch Schächte, Kanäle,
- Zwangsmassenströme (Zu- und Abluftventilatoren),
- geregelter Zwangsmassenstrom in Abhängigkeit von einer vorgegebenen stöchiometrischen Verbrennung.

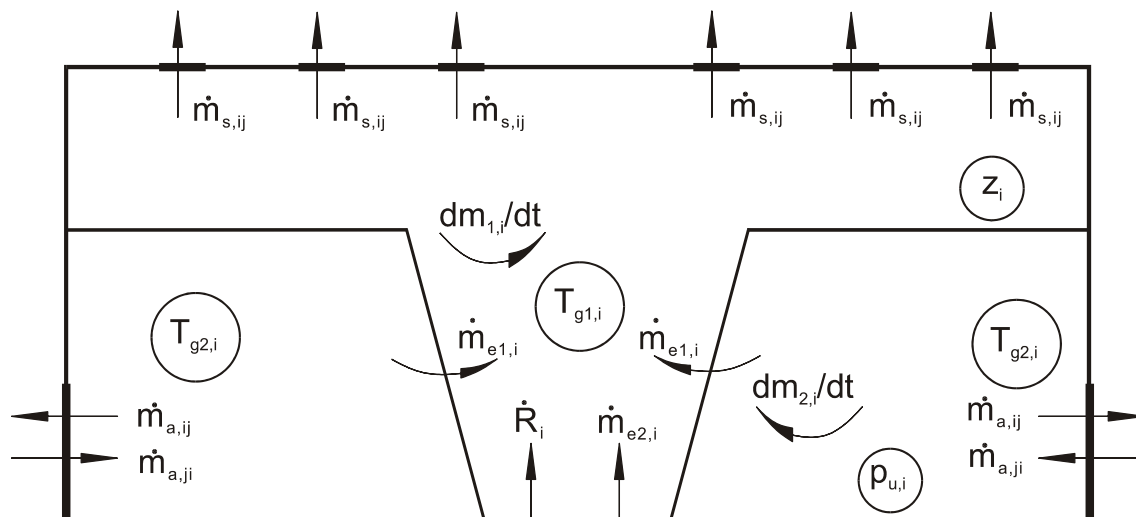


Abb. 2-3: Massenbilanzen und Massenströme für Brandraum im Modell MRFC

2.1.4 Modellierung der Energiebilanzen

Unter der Voraussetzung, dass in dem betrachteten Raum zwei Schichten und ein Brandherd vorliegen, ergeben sich die folgenden Gleichungssysteme für die Energiebilanzen:

Energiebilanz für die heiße Gasschicht des Raumes i:

$$dh_{1,i} / dt + \dot{h}_{ab1,i} - \dot{h}_{zu1,i} = 0 \quad \text{Gl. (2.3)}$$

In der Energiebilanz sind folgende Terme enthalten:

Energieabflüsse:

$$\dot{h}_{ab1,i} = \sum \dot{h}_{s,ij} + \sum \dot{h}_{01,ij} + \sum \dot{h}_{wn,i} + \sum \dot{h}_{sv1,i} + \dot{h}_{r,i} \quad \text{Gl. (2.4)}$$

Energiezuflüsse:

$$\dot{h}_{zu1,i} = \dot{h}_{c1,i} + \sum \dot{h}_{s,ji} + \sum \dot{h}_{01,ji} + \dot{h}_{sp1,i} \quad \text{Gl. (2.5)}$$

Für die unten liegende Gasschicht lautet die Energiebilanz:

$$dh_{2,i} / dt + \dot{h}_{ab2,i} - \dot{h}_{zu2,i} = 0 \quad \text{Gl. (2.6)}$$

Energieabflüsse:

$$\dot{h}_{ab2,i} = \sum \dot{h}_{a,ij} + \sum \dot{h}_{02,ij} + \sum \dot{h}_{wn,i} + \sum \dot{h}_{sv2,i} \quad \text{Gl. (2.7)}$$

Energiezuflüsse:

$$\dot{h}_{zu2,i} = \dot{h}_{sp2,i} + \sum \dot{h}_{a,ji} + \sum \dot{h}_{02,ji} \quad \text{Gl. (2.8)}$$

Darin sind:

- $dh_{1,i}$ Energieänderungen der heißen Schicht im Raum i
- $dh_{2,i}$ Energieänderungen der unteren Gasschicht im Raum i
- $\dot{h}_{ab1,i}$ Energieabflüsse aus der Rauchgasschicht im Raum i
- $\dot{h}_{zu1,i}$ Energiezuflüsse in die Rauchgasschicht im Raum i
- $\dot{h}_{ab2,i}$ Energieabflüsse aus der unteren Gasschicht im Raum i
- $\dot{h}_{zu2,i}$ Energiezuflüsse in die untere Gasschicht im Raum i
- $\dot{h}_{s,ij}$ Konvektionsenergie der aus der heißen Schicht des Raumes i in den Raum j strömenden Gase

- $\dot{h}_{s,ji}$ Konvektionsenergie der in die heiße Schicht des Raumes i aus dem Raum j strömenden Gase
 $\dot{h}_{a,ij}$ Konvektionsenergie der aus der unteren Schicht des Raumes i in den Raum j strömenden Gase
 $\dot{h}_{a,ji}$ Konvektionsenergie der in die untere Schicht des Raumes i aus dem Raum j strömenden Gase
 $\dot{h}_{01,ij}$ Strahlungsenergie aus der heißen Schicht des Raumes i in den Raum j
 $\dot{h}_{01,ji}$ Strahlungsenergie in die heiße Schicht des Raumes i aus dem Raum j
 $\dot{h}_{02,ij}$ Strahlungsenergie aus der unteren Schicht des Raumes i in den Raum j
 $\dot{h}_{02,ji}$ Strahlungsenergie in die untere Schicht des Raumes i aus dem Raum j
 $\dot{h}_{wn,i}$ Energieaustausch mit dem n-ten Umfassungsbauteil des Raumes i
 $\dot{h}_{sv1,i}$ Energieaustausch der heißen Schicht mit Einbauten des Raumes i
 $\dot{h}_{sv2,i}$ Energieaustausch der unteren Schicht mit Einbauten des Raumes i
 $\dot{h}_{sp1,i}$ Abstrahlungsverluste des Plumes an die obere Schicht im Raum i
 $\dot{h}_{sp2,i}$ Abstrahlungsverluste des Plumes an die untere Schicht im Raum i
 $\dot{h}_{r,i}$ durch Strahlung aus der heißen Schicht an Teile der unteren Schicht abgegebene Energie im Raum i
 $\dot{h}_{c1,i}$ durch Verbrennung in die heiße Schicht eingetragene Energie im Raum i

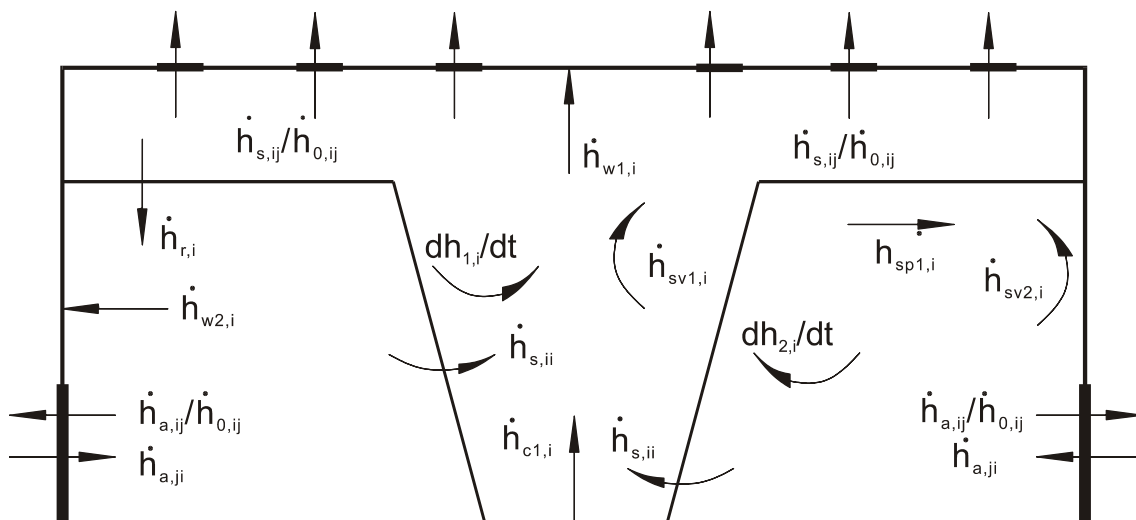


Abb. 2-4: Energiebilanzen und Energieströme für den Brandraum im Modell MRFC

Für den Brandraum sind in Abb. 2-4 die Energieströme exemplarisch dargestellt, die in die Berechnungen eingehen. Die Energiefreisetzung, d. h., die pro Zeiteinheit freigesetzte Wärmemenge wird über die zur Verfügung stehenden Abbrandmodelle berechnet, wobei in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Sauerstoffmenge entweder ein vollständiger oder ein unvollständiger Abbrand berücksichtigt wird. Die Energiezufuhr entspricht daher bei vollständiger Verbrennung dem Wärmepotential des Brandgutes und bei unvollständiger Verbrennung dem Wärmepotential der Brandgutmenge, die aufgrund der chemischen Zusammensetzung mit der zur Verfügung stehenden Sauerstoffmenge vollständig verbrannt werden kann.

Neben der Energiefreisetzung werden die Energieströme aus Konvektion und Strahlung

- der Rauchgase und Flamme, die durch Öffnungen oder über maschinelle Rauchabzugsanlagen abgeführt werden,
- die innerhalb des Gebäudes von den Rauchgasschichten an die Bauteile abgegeben werden,
- sowie die Strahlung der Flamme

berücksichtigt.

In die Energiebilanzen der einzelnen Gasschichten gehen darüber hinaus weitere Energieverluste (z. B. an vorhandene Einbauten) oder über Brandbekämpfungsmaßnahmen (z. B. durch Sprinkleranlagen) sowie die Änderung der in den Gasschichten gespeicherten Wärme in die Berechnung ein. Auf die Beschreibung dieser speziellen Programnteile wird hier nicht eingegangen.

Für die Bestimmung der Abbrandrate bzw. Energiefreisetzung stehen im Programm MRFC umfangreiche Abbrandmodelle zur Verfügung - diese sind:

- Vorgabe einer Abbrandfunktion über drei Zeitbereiche,
- Vorgabe der Energiefreisetzung über bis zu 100 Stützstellen, zwischen denen linear oder durch Spline-Funktionen interpoliert wird,
- geometrieabhängiges Abbrandmodell für Holzkrippen,
- temperatur- und ventilationsabhängiges Ölbrandmodell,
- temperatur- und ventilationsabhängiges Kabelbrandmodell,
- zeitabhängiges Ausbreitungsmodell für flächenartige Brände.

Eingabewerte sind u. a. der Heizwert, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes, die spezifischen Abbrandraten der ggf. verschiedenen Brennstoffe und die Brandgutzusammensetzung. Einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Brandsimulation hat die Bestimmung der pro Zeiteinheit in Wärmeenergie umgesetzten Menge an Brandgut. Im Zuge der Berechnung wird automatisch geprüft, ob und inwieweit Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung des Brandgutes zur Verfügung steht. Wenn genügend Sauerstoff vorhanden ist, findet im Wesentlichen eine Verbrennung mit Luftüberschuss statt und der Brandablauf ist brandlastgesteuert. Bei Sauerstoffmangel findet dagegen ein ventilationsgesteuerter Brand statt. Dieser führt zu einer unvollständigen Verbrennung, bei der nicht die gesamte Wärmemenge aus dem pyrolysierten Brandgut freigesetzt wird und u. a. größere Mengen von CO und gasförmige, unverbrannte Kohlenstoffverbindungen in die Rauchgase gelangen. Im Programm MRFC wird automatisch kontrolliert, welche Brand- bzw. Sauerstoffbedingungen jeweils vorliegen.

2.2 Bemessungsbrände

2.2.1 Allgemeines

Die Festlegung von Bemessungsbränden ist erforderlich, weil die explizite Berechnung der im Brandfall tatsächlich abbrennenden Brandgutmenge nicht bzw. nur in Ausnahmefällen möglich ist. Für die Beurteilung der Rauchausbreitung sind in vielen Fällen die Dicke und die Temperatur der Rauchgasschicht ausreichend. Dazu genügen in vielen Fällen die Festlegung der Brandleistung sowie die Größe des Brandherdes. In der internationalen Literatur sowie im aktuellen Brandschutzleitfaden der vfdb beziehen sich die Angaben zur Festlegung von Bemessungsbränden ausschließlich auf die Bestimmung der Brandleistung.

Für eine weitergehende Beurteilung der Rauchgasschicht oder der raucharmen Schicht sind weiter gehende Einflüsse zu berücksichtigen. Bei einem Brand fallen je nach Art der Sauerstoffzufuhr und der Zusammensetzung des Brandgutes, erstickend und auch toxisch wirkende Gase sowie Ruß und Asche an. Diese sind von großer Bedeutung bei der Beurteilung der Begehrbarkeit von Rettungswegen. Eine diesbezügliche Beurteilung der Gasschichten ist daher nur möglich, wenn die Art des Brandgutes bekannt ist oder durch normative Festlegungen definiert wird. Es ist zu berücksichtigen, dass die Ausbreitung der genannten Stoffe durch Zonen- oder CFD-Modelle möglich ist. Es bestehen aber deutliche Kenntnislücken in der Beschreibung der Quelltherme für die zu berücksichtigenden Stoffe. Mit dem im Folgenden vorgestellten Näherungsverfahren sind diesbezügliche Berechnungen nicht möglich.

2.2.2 Kalorische Daten brennbarer Stoffe

Die in den einzelnen Brandphasen auftretenden Brandleistungen sind sehr unterschiedlich. Für die Entzündung sind spezifische Brandleistungen um 25 kW/m² erforderlich. Schwelbrände laufen i. a. bei Leistungen kleiner 50 kW/m² ab, wohingegen bei vollentwickelten Bränden die Brandleistungen bis über 1000 kW/m² ansteigen können. Entscheidend für die Brandleistungen sind die Form und Verteilung des brennbaren Stoffes, dessen Heizwert und die Luftzufuhr.

Die Heizwerte chemischer Verbindungen lassen sich nicht aus denen ihrer Elemente berechnen, weil bei der Trennung dieser Verbindungen entweder Wärme zuzuführen oder abzuführen ist. Bei einigen festen Brennstoffen (Kohle) sind die Trennungswärmen der in diesen enthaltenen chemischen Verbindungen allerdings klein, so dass für solche Stoffe der untere Heizwert berechnet werden kann.

Der Sauerstoffbedarf zur Verbrennung fester und flüssiger Stoffe lässt sich demgegenüber theoretisch gut berechnen. Es gilt folgende theoretische Beziehung.

$$O_{\min} = 2,664 \cdot c + 7,937 \cdot k + 0,998 \cdot s - o \quad \text{Gl. (2.9)}$$

Darin sind:

- $O_{\min}$ Mindestsauerstoffbedarf in kg O_2 /kg Brennstoff
 c Kohlenstoffanteil in kg C/kg Brennstoff
 k Wasserstoffanteil in kg H_2 /kg Brennstoff
 s Schwefelanteil kg S/kg Brennstoff
 o Sauerstoffanteil in kg O_2 /kg Brennstoff.

Der zugehörige Luftbedarf an trockener Luft errechnet sich aus:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,232} \quad \text{Gl. (2.10)}$$

mit:

$L_{\min}$ Mindestluftbedarf in kg Luft/ kg Brennstoff.

Die praktische Menge trockener Verbrennungsluft ist dann:

$$L = \lambda \cdot L_{\min} \quad \text{Gl. (2.11)}$$

Darin sind:

- L tatsächlicher Luftbedarf in kg Luft/ kg Brennstoff
 λ Luftüberschusszahl.

Die gesamte Rauchgasmenge lässt sich aus den obigen Werten sofort berechnen:

$$G = \lambda \cdot L_{\min} \cdot (1 + x_D) + (1 - a) \quad \text{Gl. (2.12)}$$

Darin sind:

- G abzuführende Rauchgasmenge in kg Rauchgas/kg Brennstoff
 x_D Wasserdampfgehalt der Luft in kg Wasser/kg trockene Luft
 a Aschegehalt in kg Asche/kg Brennstoff.

In den nachstehenden Tab. 2.1 bis 4.6 sind kalorische Daten von brennbaren Stoffen auszugsweise zusammengestellt. Kalorische Daten dieser Art werden benötigt, um im Rahmen des Brandschutzingenieurwesens rechnerische Aussagen über den Brandverlauf in Gebäuden oder Räumen zu gewinnen. Dabei geht es darum, auf der Grundlage von Wärme- und Massebilanzen den Brandablauf, z. B. die Temperatur- und Rauchentwicklung im Gebäude, und die Temperaturbeanspruchung der Konstruktion rechnerisch zu ermitteln, um so die Gefährdung von Personen und Sachgütern theoretisch vorhersagen zu können.

Tab. 2.1: Heizwert und Luftbedarf von brennbaren Gasen

Gas	Heizwert [kWh/kg]	Luftbedarf [kg Luft/kg Brennstoff]	Energie / Luftmenge [kWh/kg Luft]
Acetylen	13,4	13,2	1,014
Butan	12,9	15,6	0,825
CO	2,8	2,5	1,139
Ethan	13,2	16,1	0,822
Methan	13,9	17,2	0,808
Propan	12,8	15,5	0,825
Wasserstoff	33,6	34,5	0,977

Tab. 2.2: Heizwert und Luftbedarf von brennbaren Flüssigkeiten

Flüssigkeit	Heizwert [kWh/kg]	Luftbedarf [kg Luft/kg Brennstoff]	Energie / Luftmenge [kWh/kg Luft]
Azeton	8,6	9,5	0,903
Benzol	11,1	13,2	0,842
Benzin	11,9	13,5	0,884
Chlorbenzol	11,2	12,9	0,852
Ethanol	7,4	8,9	0,831
Erdöl	11,6	13,0	0,855
Glycol	4,6	5,4	0,890
Heizöl EL	11,7	13,1	0,898
Hydrauliköl	9,8	10,9	0,831
Isopropanol	7,5	9,0	0,853
Methanol	5,5	6,4	0,825
n-Pentan	12,6	15,3	0,825
n-Oktan	12,4	15,0	0,825
c-Hexan	12,2	14,8	0,825
Petroleum	12,1	13,6	0,890
Terpentin	11,5	12,9	0,890
Xylol	11,1	12,5	0,890

Aus den Tabellen 3.7.1 bis 3.7.4 geht eine sehr wichtige und für praktische Zwecke bedeutsame Eigenschaft der brennbaren Stoffe hervor. Die pro freigesetzte Kilowattstunde theoretisch benötigte Luftmenge liegt bei Gasen zwischen 0,8 und 1,0 kg Luft, bei Flüssigkeiten zwischen 0,8 und 0,9 kg Luft sowie bei Kunststoffen zwischen 0,82 und 0,95 kg Luft. Für Feststoffe kann im Mittel mit 0,9 kWh/kg Luftmenge gerechnet werden [1].

Damit ist es leicht möglich, bei rechnerischen Untersuchungen festzustellen, ob das Brandgeschehen brandlastgesteuert (Luftüberschuss) oder ventilationsgesteuert (Luftunterschuss) abläuft, d. h., bei Kenntnis der Strömungsverhältnisse (Luftzufuhr und Rauchgasabfuhr) lässt sich abschätzen, welche Luftmenge für die Verbrennung

des betreffenden Stoffes überhaupt zur Verfügung steht, und ob eine stöchiometrische Verbrennung zumindest theoretisch möglich ist. Entsprechend dieser Menge sind die Abbrandgeschwindigkeiten und Energiefreisetzungen des Brandgutes begrenzt.

Tab. 2.3: Heizwert und Luftbedarf fester Stoffe (ohne Kunststoffe)

Feststoff	Heizwert [kWh/kg]	Luftbedarf [kg Luft/kg Brennstoff]	Energie / Luftmenge*) [kWh/kg Luft]
Autoreifen	12,2	13,6	≈ 0,9
Baumwolle	4,3	4,8	≈ 0,9
Braunkohle	5,8	6,4	≈ 0,9
Brechkoks	8,1	9,0	≈ 0,9
Bitumen	9,8	10,9	≈ 0,9
Dachbahn	8,0	8,9	≈ 0,9
Holz	4,8	5,2	0,930
Holzmöbel	4,8	5,2	≈ 0,9
Holzkohle	9,1	11,5	≈ 0,9
Kautschuk	11,7	13,0	≈ 0,9
Karton, Pappe	4,2	4,7	≈ 0,9
Korbwaren	4,8	5,3	≈ 0,9
Leder	5,3	5,9	≈ 0,9
Margarine	9,0	10,0	≈ 0,9
Papier	3,8	4,2	≈ 0,9
Putzlappen	8,8	9,8	≈ 0,9
Roggenmehl	4,6	5,1	≈ 0,9
Sanitärkrepp	3,7	4,1	≈ 0,9
Spanplatten	4,8	5,3	≈ 0,9
Steinkohle	9,3	11,4	0,814
Teppichfilz	6,0	6,7	≈ 0,9
Tonkassetten	6,0	6,7	≈ 0,9
Zucker	4,6	5,1	≈ 0,9

*) Für Kohlenwasserstoffverbindungen gilt als guter Näherungswert: 0,9 kWh/kg L

Tab. 2.4: Heizwert und Luftbedarf von Kunststoffen

Kunststoff	Heizwert [kWh/kg]	Luftbedarf [kg Luft/kg Brennstoff]	Energie / Luftmenge [kWh/kg Luft]
Acrylnitril	8,9	9,7	0,917
Cellulose	4,9	5,1	0,953
Melamin	5,4	6,4	0,840
Nylon 6.6	8,2	10,0	0,817
PMMA	6,9	8,3	0,836
Polyamid	7,9	8,9	0,884
Polycarbonat	8,3	9,8	0,844
Polyester	7,6	8,5	0,890
Polyesterharz (GFK)	5,3	6,0	0,890
Polyethylen	12,2	15,0	0,814
Polyoxymethylen	4,3	4,6	0,933
Polypropylen	12,2	15,0	0,814
Polystyrol	11,1	13,3	0,836
Polyvinylchlorid	5,0	6,0	0,828
Polyethylenterephthalat	6,1	7,2	0,850
Polytetrafluorethylen	1,4	2,8	0,503
PU-hart	6,7	7,5	0,894
PU-weich	6,4	7,2	0,894
PVC-Kabel	5,0	6,0	0,828

2.2.3 Bemessungsbrände als Brandleistungskurven

Eine Art von Bemessungsbränden beruht auf der Angabe einer konstanten Brandleistung oder einer zeitlich abhängigen Freisetzung von Energie im betrachteten Szenarium.

Diese Art der Bemessungsbrände können normiert sein, beispielsweise zur Bemessung von NRAs. Weiterhin können zeitlich abhängige Brandleistungs - Kurven auch aus Experimenten oder durch ingenieurmäßige Ansätze aus den vorhandenen brennbaren Stoffen abgeleitet werden. Dieser Sonderfall des ingenieurmäßigen Ansatzes wird in einem eigenen Abschnitt behandelt.

Zur Verwendung von normativen Brandleistungs – Zeit - Kurven sind in der Regel Angaben über die Brandfläche, der Brandentwicklungsdauer und je nach Fragestellung auch Angaben über die Brandlast notwendig und sinnvoll.

Grundsätzlich lassen sich die folgenden Fälle unterscheiden:

- Konstante Brandleistung,
- Zeitlich abhängige Brandleistungs - Kurven,
- Brandleistungs -Kurven aus experimentellen Daten.

2.2.3.1 Konstante Brandleistung

Zeitunabhängige konstante Design Fires beschreiben den Steady - State Fall, bei dem davon ausgegangen wird, dass der Brand innerhalb eines definierten zeitlichen Rahmens eine maximale Brandleistung erreicht und die danach konstant bleibt. Der Bemessungsbrand wird dabei so ausgelegt, dass es das größtmögliche zu erwartende Bemessungsbrandszenarium abdeckt, so dass für alle anderen kleineren Brände ausreichende Sicherheit gewährleistet ist. Zeitunabhängige konstante Design Fires beinhalten Angaben zur maximalen Brandleistung, Brandfläche usw. und kommen u. a. zur Anwendung in der

- Norm DIN 18 232-2 und DIN 18 232-5 bzw.
- Technischen Richtlinie TRVB S 125/97

In den oben genannten Bemessungsverfahren werden zwei verschiedene Angaben angegeben:

- Angabe einer flächenspezifischen Brandleistung in kW/m^2 oder kJ/hm^2 und einer Brandfläche.
- Angabe einer Brandleistung unabhängig von der zugrundeliegenden Brandfläche.

Die letztere Angabe ist zum Einsatz in einem brandschutztechnischen Design relativ unbrauchbar. Andererseits können solche Angaben (die beispielsweise aus schlecht dokumentierten Experimenten stammen) zur Überprüfung von ingenieurmäßig entwickelten Design Fires dienen.

2.2.3.2 Bemessungsbrände zur Bemessung von NRAs und MRAs nach DIN 18 232-2 bzw. DIN 18 232-5

Den Regelungen in DIN 18232 liegen konkrete Vorstellungen über die zu erwartenden Brandverläufe zugrunde. In Tabelle 2.1 sind die Parameter zusammengestellt, die u. a. zur Erarbeitung der Tabelle 2 in DIN 18232-2 verwendet wurden. Die Bemessungsgruppen wurden aus der zu erwartenden Brandausbreitungsgeschwindigkeit (besonders gering, mittel und besonders groß) und der erwarteten Brandentwicklungsdauer, die von der Branderkennungszeit und der Zeitdauer bis zur Einleitung des Löschangriffs durch die Feuerwehr ermittelt. Dabei wird unterstellt, dass dieser Zeitraum gleichgesetzt wird mit dem Zeitraum, ab dem eine weitere Brandausbreitung nicht mehr stattfindet!

Den Bemessungsgruppen entsprechen nach diesen Vorstellungen den in Tabelle 2.1 angegebenen Brandflächen, für die die Seitenlängen bei quadratischer Ausbreitung sowie der Durchmesser und der Umfang bei kreisförmiger Ausbreitung angegeben

sind. Auf dieser Brandfläche verbrennt das Brandgut mit einer spezifischen Brandleistung von 300 kW/m^2 , von der angenommen wird, dass 20 % durch Strahlung im Bereich des Feuerplume abgegeben und 80 % konvektiv in die Heißgasschicht eingetragen wird.

Für die Ermittlung der erforderlichen Leistungen von mechanischen Rauchabzugsanlagen werden im vorliegenden Entwurf des Teiles 5 der DIN 18232 die gleichen Brandflächen den einzelnen Bemessungsgruppen zugeordnet. Allerdings wird in diesem Fall von einer Brandleistung von 600 kW/m^2 ausgegangen, was zu den in Tabelle 2.1 auf den beiden unteren Zeilen angegebenen Energiefreisetzungen bzw. Brandleistungen führt.

Die unterschiedlichen Brandleistungen auf den Brandflächen in DIN 18232 Teil 2 und Teil 5 werden damit begründet, dass die ungünstigste Wirkung von Rauchabzugsanlagen mit natürlicher Ventilation bei geringen Brandleistungen und damit verbundenen niedrigen Rauchgastemperaturen und geringerem thermischem Auftrieb eintreten, während bei mechanischen Rauchabzugsanlagen der ungünstigste Rauchabzug bei hohen Brandleistungen und damit verbundenen hohen Rauchgastemperaturen mit geringer Dichte und geringen Förderleistungen der mechanischen Rauchabzugsanlagen anzunehmen ist. Die Förderleistung in m^3/h bleibt annähernd konstant, während der abgeführte Rauchgasmassenstrom in kg/s mit zunehmender Temperatur geringer wird. Dieses Argument ist wenig stichhaltig, weil ja gerade der Rauchabzug in der Phase der Brandentstehung greifen soll. 600 kW/m^2 liegt bereits an der unteren Grenze eines Flüssigkeitsbrandes. Für eine Bemessung des Rauchabzugs zur Sicherstellung des Personenschutzes sind die getroffenen Annahmen in DIN 18 232 Teil 5 entschieden zu hoch.

Tabelle 2.1: Bemessungsbrände für die Festlegungen in DIN 18232 Teil 2 und Teil 5

Annahmen DIN 18232	Einheit	Bemessungsgruppe						
		1	2	3	4	5	6	7
Flächen	m^2	5	10	20	40	80	160	320
Seitenlänge	m	2,236	3,162	4,472	6,325	8,944	12,649	17,889
Durchmesser	m	2,523	3,568	5,046	7,136	10,093	14,273	20,185
Umfang	m	7,927	11,210	15,853	22,420	31,707	44,840	63,413
Brandleistung nach Teil 2	kW	1500	3000	6000	12000	24000	48000	96000
konvektiver Anteil nach Teil 2	kW	1200	2400	4800	9600	19200	38400	76800
Brandleistung nach Teil 5	kW	3000	6000	12000	24000	48000	96000	19200
konvektiver Anteil nach Teil 5	kW	2400	4800	9600	19200	38400	76800	15360
								0
								0

Die DIN 18 232-2 legt 7 und die DIN 18 232-5 setzt 5 Bemessungsgruppen für Rauchabzüge fest. Sie werden über die zu erwartenden Brandausbreitungs-

geschwindigkeit und die zu erwartenden Brandentwicklungsdauer bestimmt. Die Berechnungen für die Werte der Brandausbreitungsgeschwindigkeit beruhen dabei auf der Annahme, dass die jeweils angegebenen Brandentwicklungsdauer (aus Spalte 2 der Tabelle 2.3) mit dem Zeitpunkt des Erreichens der maximalen Brandfläche identisch ist. Daraus ergeben sich für eine flächige Brandausbreitung folgende Mittelwerte (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Gemittelte Brandausbreitungsgeschwindigkeit nach DIN 18232, Teil 2 und 5

Brandausbreitungsgeschwindigkeit	[m/min]
besonders klein	0,15
mittel	0,25
besonders groß	0,45

Bei der Brandentwicklungsdauer handelt es sich um jene Zeitspanne zwischen dem Moment der Brandentstehung und dem Beginn wirksamer Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr. Die Zeit von der Brandentwicklung bis zur Branderkennung bleibt dabei unberücksichtigt, da für die Bemessung unterstellt wird, dass eine automatische Brandmeldeanlage mit Rauchmeldern vorhanden sein muss (bzw. ständig anwesendes, geschultes Personal). Gleichzeitig wird angenommen, dass ab dem Eintreffen der Feuerwehr am Brandort keine weitere Brandausbreitung mehr stattfindet. Diese Annahme ist relativ günstig.

Tabelle 2.3: Festlegungen zur Brandentwicklungsdauer nach DIN 18232, Teil 2 und Teil 5

Verhältnisse	Brandentwicklungsdauer [min]
Bei einer Werkfeuerwehr oder Vorhandensein einer Sprinkleranlage	≤ 5 min
Für Anfahrt und Einleitung des Löschangriffs durch die Feuerwehr	≤ 10 min
Bei ungünstigen Verhältnissen	≤ 15 min
Bei besonders ungünstigen Verhältnissen	≤ 20 min

Den Bemessungsgruppen entsprechen gemäß dieser Regelungen die in Tabelle 2.4 angeführten maximalen Brandflächen. 20 % dieser spezifischen Brandleistungen wird dabei durch Strahlung im Bereich des Flammenherdes („plume“) abgegeben. Die restlichen 80 % werden konvektiv in die Rauchgasschicht eingebracht. Die Brandausbreitung erfolgt radial, d.h. die rechnerische Brandfläche A_B ist kreisförmig.

Tabelle 2.4: Bemessungsgruppen nach DIN 18 232, Teil 5

Bemessungs-Gruppe (BG)	BG 1	BG 2	BG 3	BG 4	BG 5
max. Brandfläche [m ²]	5	10	20	40	80
Brandherdradius [m]	1,262	1,784	2,523	3,568	5,046
Brandherddurchmesser [m]	2,52	3,57	5,05	7,14	10,09
Brandherdumfang [m]	7,93	11,21	15,85	22,42	31,71

Aus Tabelle 1, Seite 6 der DIN 18 232-5 lassen sich nun insgesamt 11 Bemessungsbrände ableiten. Sie werden jeweils durch eine Brandfläche und die zugehörige Brandleistung, einer Brandausbreitungsgeschwindigkeit und der Brandentwicklungsdauer bestimmt (siehe Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Bemessungsbrände nach DIN 18 232, Teil 5

Szenarium	Bemessungs- - gruppe BG	Brand- fläche [m ²]	Brand- leistung [kW]	Brandausbrei- tungs- geschwindigkeit [m/min]	Brandent- wicklungsdauer [min]
Szenario 1:	1	5	3000	0,15	5
Szenario 2:	2	10	6000	0,15	10
Szenario 3:	2	10	6000	0,25	5
Szenario 4:	3	20	12000	0,15	15
Szenario 5:	3	20	12000	0,25	10
Szenario 6:	3	20	12000	0,45	5
Szenario 7:	4	40	24000	0,15	20
Szenario 8:	4	40	24000	0,25	15
Szenario 9:	4	40	24000	0,45	10
Szenario 10:	5	80	48000	0,25	20
Szenario 11:	5	80	48000	0,45	15

Die maximale Brandleistung in Szenario 10 und 11 beträgt somit fast 50 MW. Dies entspricht der Energiefreisetzung eines kleinen Großbrandes! Für übliche Bemessungsfälle in Atrien, Bahnhöfen und Einkaufspassagen werden im internationalen Bereich in allgemeinen 5 MW-Feuer als „design-fire“ verwendet (siehe Tabelle 2.6). Das sind nur 10 % des in der DIN 18 232-5 angeführten Größtwertes. Diesem Wert nähern sich nur die ersten 3 Bemessungsbrände der Norm. Die übrigen Szenarien übersteigen diesen Richtwert um 240, 480 bzw. 960 %! Es ist somit fraglich, ob dieser Norm-Entwurf im internationalen Vergleich überhaupt wirtschaftlich vertretbar ist.

Tabelle 2.6 : Brandszenarien nach CEN

Gebäude, Räume	Brandfläche [m ²]	Brandumfang [m]	Brandleistung [kW]
Verkaufsflächen mit			
• Normalsprinkler	10	12	6250
• Fast Response Sprinkler	5	9	3125
Büros			
• Normalsprinkler	16	14	3600
• ohne Sprinkler	47	24	10575
Hotelzimmer mit			
• Normalsprinkler	2	6	500
Großgarage	10	12	4000

2.2.3.3 Bemessungsbrände zur Bemessung von NRAs nach TRVB S125

Die TRVB S 125 (Technische Richtlinien für den vorbeugenden Brandschutz) sind Richtlinien die vom Österreichischen Feuerwehrverband herausgegeben werden. Diese TRVB beschreibt ein Verfahren zur Dimensionierung von Brandrauchabsauganlagen und Brandrauchentlüftungen auf der Basis eines ingenieurmäßigen Verfahrens.

Ausgangspunkt für alle Berechnungen in dieser Richtlinie sind Bemessungsbrände. Sie werden entweder aufgrund praktischer Erfahrungen (Experimenten) ermittelt oder aus der einschlägigen Fachliteratur entnommen, z.B. über die einer Nutzungsart zugeordnete Bemessungsgruppe aus TRVB A 126 [10].

Falls keine gesicherten Daten oder Ergebnisse realer Brandversuche vorliegen, können aus dem Anhang 7 der TRVB S 125 [13] vorgegebene Bemessungsbrände für verschiedene Nutzungen übernommen werden.

Die Richtlinie legt der Bemessung vier Gruppen zugrunde, die sich jeweils auf

- eine Bemessungsbrandfläche (A_B)
- einen zugehörigen Bemessungsbrandumfang (U_B)
- eine durch den Brand freigesetzte spezifische Brandleistung (q_B)

beziehen (s. Tabelle 2.7).

Tabelle 2.7: Bemessungsbrände nach der technischen Richtlinie TRVB S 125 [14]

BRE-Gruppe lt. TRVB A 126	Bemessungs brandumfang U_B [m]	Bemessungs brandfläche A_B [m ²]	Spezifische Brandleistung 1 q_B [kW/m ²]	Spezifische Brandleistung 2 q_B [kW/m ²]
BRE-Gr. 1	12	10	156	78
BRE-Gr. 2	18	20	312	156
BRE-Gr. 3	25	40	625	312
BRE-Gr. 4	36	80	1250	625
			MA	NA

Die Rechenwerte der spezifischen Brandleistung 1 gelten ausschließlich zur Bemessung einer maschinellen RWA (MA), der spezifischen Brandleistung 2 zur Berechnung einer natürlichen Brandrauchentlüftungsanlage (NA).

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Nutzungsart eines Gebäudes. In Abhängigkeit von der Nutzung des Brandraumes ergeben sich verschiedene

- Brandbelastungen
- Brandlastverteilungen und
- unterschiedliche Brandausbreitungsgeschwindigkeiten.

Die Richtlinie verweist in diesem Zusammenhang auf die TRVB A 126 Tabelle 2 Spalte 11 [9], wo jeder speziellen Nutzung eine der vier BRE-Gruppen zugeordnet wird (siehe Tabelle 2.8):

Tabelle 2.8: Auszug aus Tab. 2 der Technischen Richtlinie TRVB A 126 (Brand-schutztechnische Kennzahlen verschiedener Nutzungen, Lagerungen, Lagergüter) [10]

Nutzung als Betrieb (beinhaltet Herstellung)	Mobile Brandbelastung [MJ/m ²]	BRE-Gruppe bzw. BRA-Gruppe
Eisenwarengeschäft	300	1
Apotheke (inkl. Lager)	800	2
Auto, Reparaturwerkstätte	300	3
Chem. Reinigung	300	4
Dachpappe	2000	4

Weiterhin legt die TRVB S 125 fest, dass die Bemessungsbrandfläche (A_B)

- bei Vorhandensein einer Brandmeldeanlage (BMA) um eine BRE-Gruppe
- bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage um zwei BRE-Gruppen

herabgesetzt werden kann. Es muss jedoch mit der Brandleistung der tatsächlichen Nutzung gerechnet werden! Die Grundlage hierfür ist die Annahme, dass im Brandfall mit einer Branddetektion durch eine BMA die Brandleistung zwar dieselbe bleibt, weil dieselben Stoffe verbrennen, die Brandfläche aber um die Hälfte kleiner wird, da

der Löschvorgang durch eine rechtzeitige Meldung des Brandes früher eingeleitet werden kann.

Bei Vorhandensein einer Sprinkleranlage wird sogar nur mit einem Viertel der Brandfläche der eigentlichen BRE-Gruppe gerechnet, weil davon ausgegangen wird, dass durch zum Brandherd richtig positionierte Sprinkler die Brandfläche auf ein Viertel eingedämmt werden kann. Aus den eben angeführten Grundlagen ergeben sich 9 mögliche Bemessungsbrände für die Bemessung einer BRA-Anlage:

Tabelle 2.9: Bemessungsbrände nach TRVB S 125 für die Bemessung einer maschinellen Entrauchung

Design Fire	BRE-Gruppe	Bemessungs- brandumfang U_B [m]	Bemessungs- brandfläche A_B [m ²]	Spezifische Brandleistung q_B [kW/m ²]
Design Fire 1:	1	12	10	156
Design Fire 2:	2 + BMA	12	10	312
Design Fire 3:	2	18	20	312
Design Fire 4:	3 + Sp.	12	10	625
Design Fire 5:	3 + BMA	18	20	625
Design Fire 6:	3	25	40	625
Design Fire 7:	4 + Sp.	18	20	1250
Design Fire 8:	4 + BMA	25	40	1250
Design Fire 9:	4	36	80	1250

BMA Brandmeldeanlage vorhanden

Sp. Sprinkleranlage vorhanden

2.2.3.4 Zeitlich abhängige Brandleistungskurven (Heat-Release-Curves)

Zeitlich abhängige Brandleistungskurven die gegebenenfalls auch abhängig von der Art der Brandlast sind, lassen sich aus Angaben über die Brandentwicklungsphase realisieren. Der durch eine konstante Energiefreisetzung beschriebene Zustand eines Brandes (steady - state) wird in der Realität, wenn überhaupt, erst nach einer bestimmten Zeit erreicht. Der Zeitraum der bis zum Erreichen eines solchen Zustandes verstreicht, ist bei normierten Brandleistungen über die zugrunde liegenden Maßnahmen ableitbar. So werden beispielsweise zur Bemessung von NRAs die Bemessungsbrände als solche definiert wie sie beim Einsetzen einer Löschmaßnahme vorliegen. Solche Zeiträume können sein:

- Ansprechen und Einsatz einer Sprinkleranlage
- Ansprechen und Einsatz einer Löschanlage
- Eingriffszeit bis zum Löschangriff einer Feuerwehr

Die wichtigsten Vertreter solcher Brandleistungskurven sind:

- t^2 - Modelle
- Brandausbreitungsmodelle

t^2 - Modelle

Im Angelsächsischen Raum (USA) werden in der Praxis die Brandausbreitung und die Brandleistungskurven häufig anhand einfacher t^2 - Modelle beschrieben. Nach NFPA wird folgende Beziehung vorgeschlagen:

$$Q_c = \alpha \cdot (t - t_i)^2 \quad \text{Gl. (2.1)}$$

Darin sind:

- Q_c Brandleistung in kW
 t_i Zeit bis zur Entzündung in s
 t Zeit in s
 α Ausbreitungsfaktor in kJ/s^3 .

In der nachstehenden Tabelle 2.10 sind die entsprechenden α -Werte in Abhängigkeit von den im NFPA Standard genannten Stoffen angegeben.

Tabelle 2.10: Flammenausbreitungsparameter für das quadratische Ausbreitungsmodell gemäß NFPA

Stoffgruppen	Flammenausbreitung	α [kJ/s^3]	Zeitdauer in [s] für $Q_c=10^3$ kW
keine Angabe	langsam	0.0029	587
Baumwolle lose, Polyestermatratze	mittel	0.0117	252
Kunststoffschaum, gestapelte Holzplatten, gefüllte Postsäcke	schnell	0.0469	146
Methylalkohol, schnellbrennende Polstermöbel	sehr schnell	0.1876	73

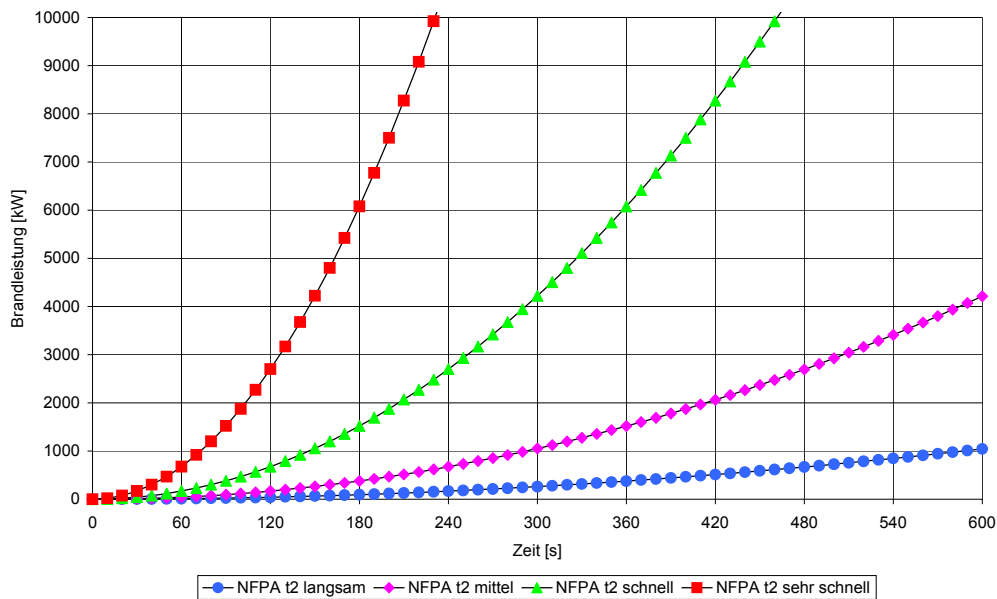


Bild 2.1: Darstellung der t^2 - Modelle nach NFPA

Brandausbreitungsmodell nach MRFC

Allgemein lässt sich die quadratische Ausbreitung eines Brandes durch das im Brandsimulationsprogramm MRFC [4] beschriebene Brandausbreitungsmodell genauer beschreiben. Für eine von der Zeit abhängige quadratische Brandfläche A_f gilt bei konstanter Brandausbreitungsgeschwindigkeit v in zwei Richtungen:

$$A_f = (v \cdot (t - t_i))^2 \quad \text{Gl. (2.2)}$$

Darin sind:

- A_f Brandfläche in m^2
- v Brandausbreitung nach der Entzündung in x - und y Richtung in m/s
- t_i Zeit bis zur Entzündung in s
- t Zeit in s .

Die Brandleistung auf dieser Brandfläche bei vollständiger Verbrennung ist:

$$Q_C = \dot{r} \cdot H_U \cdot A_f \quad \text{Gl. (2.3)}$$

Darin sind:

- $\dot{r}$ spez. Abbrandgeschwindigkeit in $\text{kg/m}^2 \text{ h}$
- H_U Heizwert in kWh/kg .

Ein Vergleich der Faktoren in den Gleichungen Gl. (2.2) und Gl. (2.3) zeigt, dass die folgende Beziehung gilt:

$$v = \left(\frac{\alpha}{\dot{r} \cdot H_U} \right)^{1/2} \quad \text{Gl. (2.4)}$$

Mit den spezifischen mittleren Brandleistungen von 100 kWh/m², 300 kWh/m² und 800 kWh/m² für die in Tabelle 3.6.3 nach NFPA angegebenen Stoffgruppen errechnen sich aus Gl. (2.2) Feuerausbreitungsgeschwindigkeiten von etwa 10 mm/s, 12.5 mm/s und 15 mm/s, d. h. im NFPA-Modell wird die Brandausbreitungsgeschwindigkeit der einzelnen Stoffe nur sehr wenig bzw. gar nicht berücksichtigt. Das NFPA-Modell hebt somit vor allem auf die spezifischen Brandleistungen ab.

Nach den vorliegenden Erfahrungen ist die nach NFPA angegebene Spannweite für Brandausbreitungsgeschwindigkeiten zu gering! Der für Methylalkohol und schnellbrennende Polyestermöbel genannte Wert von 15 mm/s ist bei einem fortentwickelten Brand mit Sicherheit falsch. In Tabelle 2.11 sind diesbezüglich neuere Werte genannt.

Im Rahmen von Brandschutzberechnungen bzw. Brandsimulationen hat sich die Anwendung des in [12] beschriebenen Modells gemäß den Gleichungen Gl. (2.2) und Gl. (2.3) bewährt. Die praktisch anzunehmenden Werte für die Brandausbreitung sind in Tabelle 2.12 zusammengestellt. Für den Industriebereich haben sich Werte von 5 bis 15 mm/s bewährt. Bei Großbränden (z. B. Brand der Fordwerke in Köln) wurden anhand der Auslösung von Sprinklergruppen mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeiten von rund 15 mm/s beobachtet.

Tabelle 2.11: Brandausbreitung bei festen Stoffen nach [20]

Brennbare Stoffe/Objekte	Mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeiten in mm/s
Bauten mit Holzkonstruktionen, Möbel usw.	16-20
Gummierzeugnisse in Stapeln auf offener Fläche	18
Bretterstapel	33
Rundholzstapel	3,8-12
Kautschuk in geschlossenem Lager	6,6
Strohdach (trocken)	40,0
Papier in Rollen	4,5
Textilerzeugnisse in geschlossenem Lager	5,5
Torf in Stapeln	16
Decken aus B2 Baustoffen bei Werkhallen	28-53

Tabelle 2.12: Brandausbreitungsgeschwindigkeit für geometrische Ausbreitungsmodelle nach Gl. (4.6.3)

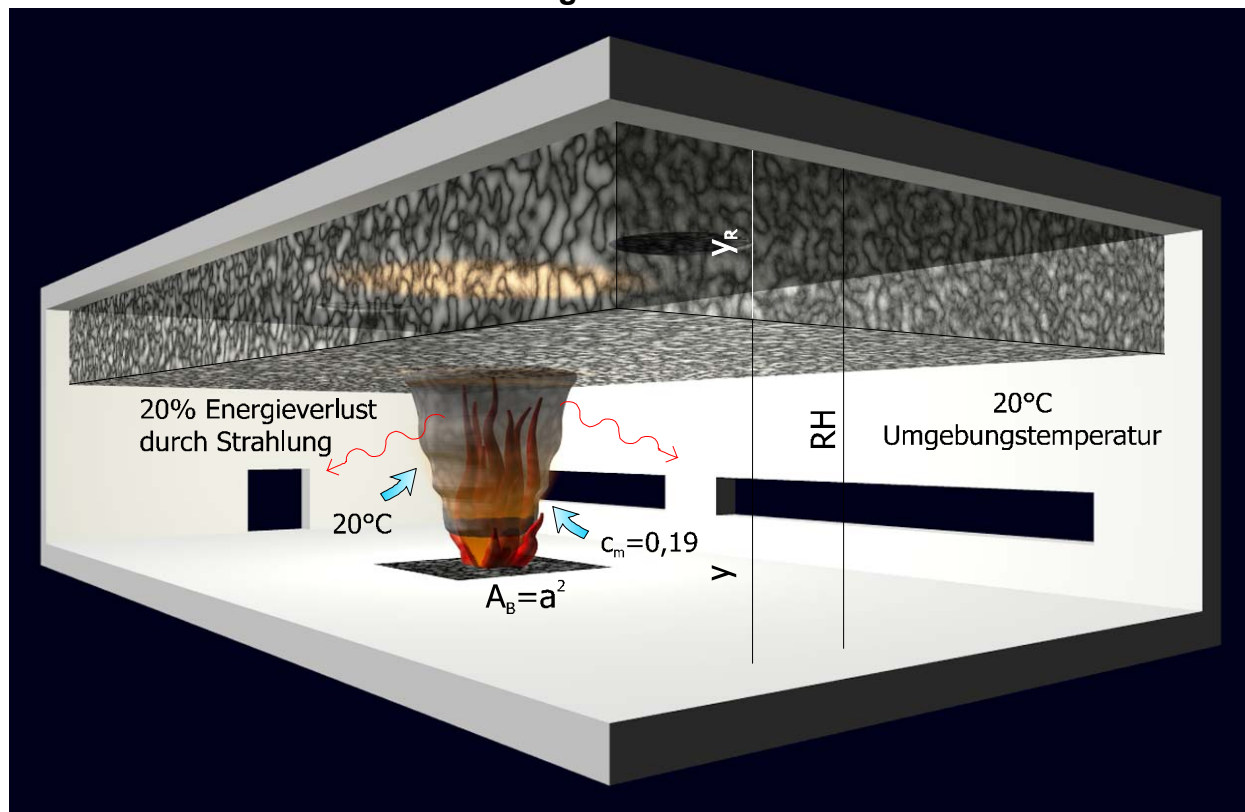
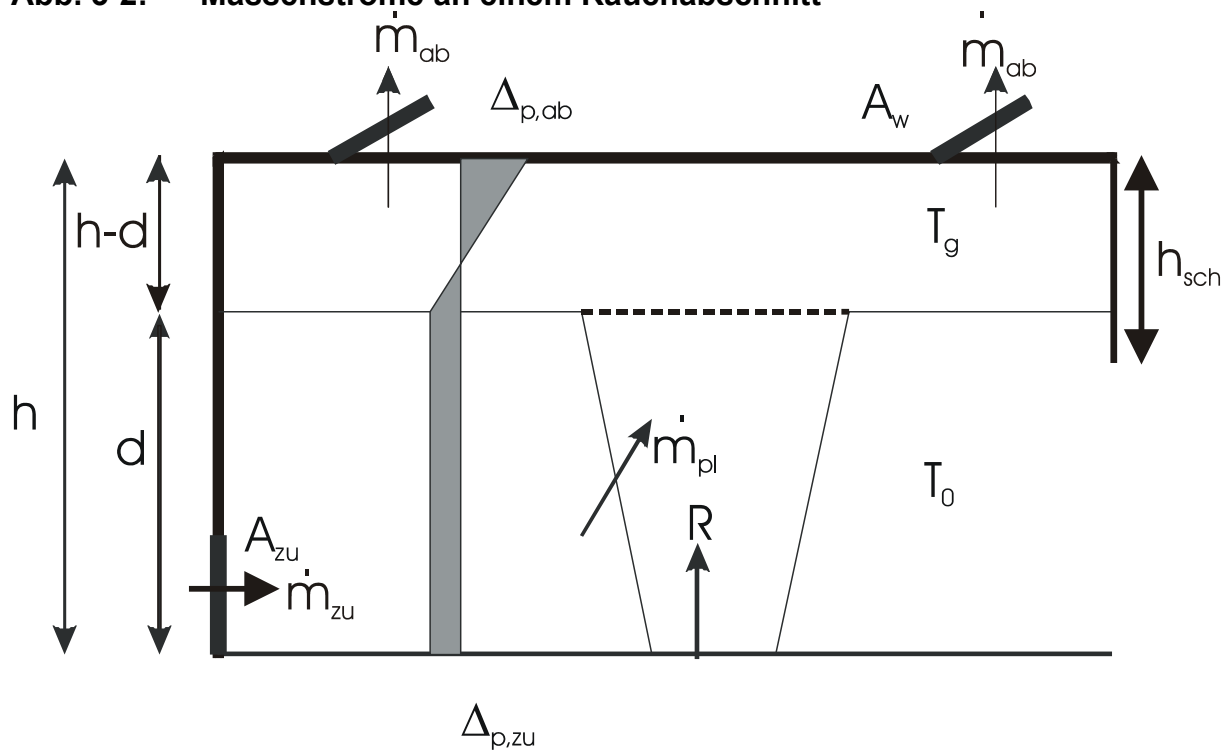
Brandausbreitung	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in mm/s	
	nach [15]	nach DIN 18232 [11]
Entstehungsphase	1-2	-
langsam	5	2,5
mittel	8	4,0
schnell	12-20	7,5
sehr schnell	30-50	-
Flashover	80-120	-

Die für DIN 18 232 angegebenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind aus den in der Norm angegebenen Brandentwicklungsdauern und den zugrunde gelegten Brandflächen, die in der Norm nicht explizit genannt sind, rechnerisch ermittelt worden (siehe [11]).

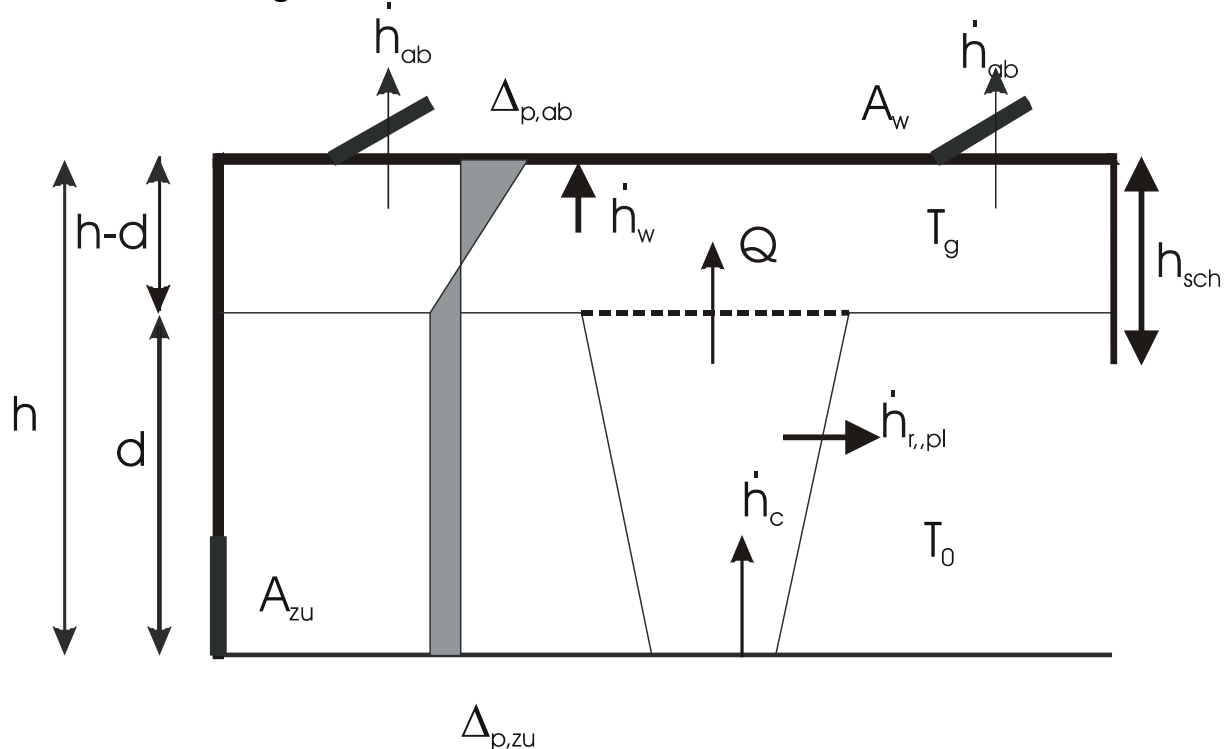
3 Handrechenformel für die Berechnung

3.1 Grundlagen der Berechnung für RA im Dach nach Modell DIN 18232-2

Die Berechnung der erforderlichen Öffnungsflächen für natürliche RA-Geräte erfolgt auf der Basis eines stark vereinfachten Zonenmodells, bei dem ausschließlich die Massenbilanz für die Rauchgasschicht erfüllt wird. Die wesentlichen Modellannahmen können der isometrischen Darstellung eines Rauchabschnitts (Abb. 3-1) entnommen werden. Die berücksichtigten Massenströme sind in Abb. 3-2 dargestellt. Die Energiebilanz für die untere Schicht ist nicht berücksichtigt. Die Abgabe von Wärme an die Bauteile und die Strahlungsverluste am Plume (Abb. 3-3) werden mit einem Näherungsfaktor berücksichtigt. Es werden die in den folgenden Abbildungen enthaltenen Angaben zur Druckverteilung und sonstiger Randbedingungen für die Berechnung unterstellt.

Abb. 3-1: Isometrische Darstellung eines Rauchabschnittes**Abb. 3-2: Massenströme an einem Rauchabschnitt**

Massenströme an einem Rauchabschnitt

Abb. 3-3: Energieströme an einem Rauchabschnitt

Energieströme an einem Rauchabschnitt

Für die folgenden Ausführungen gelten diese Beziehungen bzw. Formelzeichen:

d	Steighöhe der Rauchgase bis zum Eindringen in die Rauchgasschicht in m
$h-d$	Dicke der Rauchgasschicht in m
h_{sch}	Höhe der Rauchschürze ab Deckenunterkante in m
$\dot{R}$	Abbrandrate in kg/s
T_0	Temperatur der Umgebungsluft in K
T_g	Rauchgastemperatur in K
Δp_{zu}	Druckdifferenz zur Umgebung an den Zuluftöffnungen in Pa
Δp_{ab}	Druckdifferenz zur Umgebung an den NRA-Öffnungen in Pa
$\dot{m}_{pl}$	in die Rauchgassäule eingemischte Umgebungsluft in kg/s
$\dot{m}_{ab}$	über NRA-Öffnungen abgeführter Rauchgasmassenstrom in kg/s
$\dot{m}_{zu}$	über Zuluftöffnungen nachströmender Massenstrom in kg/s
$\dot{h}_c$	Brandleistung in kW
$\dot{h}_{r,pl}$	Strahlungsverluste am Plume in kW
$\dot{h}_w$	Wärmeabgabe an Bauteile in der Rauchgasschicht in kW
$\dot{h}_{ab}$	Wärmeabgabe über ausströmende Rauchgase in kW
$\dot{Q}$	durch Konvektion in die Rauchgasschicht eingetragene Wärmemenge in kW

Die Berechnung gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- Stationäre Verhältnisse, d. h. Schicht ist stabil, Temperaturen sind konstant, Änderungen der Schicht werden vernachlässigt
- Wärmeabgabe an die Bauteile ist konstant
- Temperatur der unteren Schicht entspricht der Umgebungstemperatur, d. h. eine Erwärmung der unteren Schicht wird nicht berücksichtigt
- Die Einmischung aus der unteren Schicht bestimmt sich aus einer Plumberechnung (Die Anwendbarkeit der verschiedenen aus der Literatur bekannten Beziehungen wird in Abschnitt 3.4 diskutiert.)

Es gilt für die Druckdifferenz an den RA-Geräten im Dach folgende Beziehung:

$$\Delta p = \Delta p_{zu} + \Delta p_{ab} = (\rho_0 - \rho_g) \cdot g \cdot (h-d) = \rho_0 \cdot g \cdot (h-d) \cdot (1 - T_0/T_g) \quad \text{Gl.(3-1)}$$

$$\text{mit } \rho_g = \rho_0 \cdot T_0 / T_g \quad \text{Gl.(3-2)}$$

Aus der Massenbilanz für die Rauchgasschicht und die untere Luftschicht ergibt sich

$$\dot{m}_{zu} = \dot{m}_{ab} = \dot{m}_{pl} + \dot{R} \quad \text{Gl.(3-3)}$$

Mit der Bernoulli-Gleichung ergibt sich die Geschwindigkeit für die Zuluft zu

$$0,5 \cdot \rho_0 \cdot v_{zu}^2 = \Delta p_{zu}, \text{ d. h. } v_{zu} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{zu}}{\rho_0}} \quad \text{Gl.(3-4)}$$

und der Massenstrom zu

$$m_{zu} = v_{zu} \cdot A_{zu} \cdot \rho_0 = A_{zu} \cdot \sqrt{2\Delta p_{zu} \rho_0} \quad \text{Gl.(3-5)}$$

Für die Abluftströme gilt entsprechend

$$0,5 \cdot \rho_g \cdot v_{ab}^2 = \Delta p_{ab}, \text{ d. h. } v_{ab} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{ab}}{\rho_g}} \quad \text{Gl.(3-6)}$$

$$m_{ab} = v_{ab} \cdot A_{ab} \cdot \rho_g = A_{ab} \cdot \sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_g} = A_{ab} \cdot \sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}} \quad \text{Gl.(3-7)}$$

Aus $m_{ab} = m_{zu}$ (Gl. 3-3) wird:

$$A_{ab} \cdot \sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}} = A_{zu} \cdot \sqrt{2\Delta p_{zu} \rho_0} \quad \text{Gl.(3-8)}$$

bzw:

$$\Delta p_{zu} = \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \Delta p_{ab} \quad \text{Gl.(3-9)}$$

Mit Gl (3-9) wird Gl. (3-1) zu:

$$\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right) \Delta p_{ab} = (h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \rho_0 g = (h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) \rho_0 g$$

bzw.

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} = \frac{(h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} \quad \text{Gl.(3-10)}$$

aus Gl. (3-3) und Gl. (3-7) wird daraus:

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{ab} \sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}} \quad \text{bzw.} \quad A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} \quad \text{Gl.(3-11)}$$

Damit kann die erforderliche aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche mit Δp_{ab} nach Gl. (3-10) berechnet werden. Zur Berechnung ist noch die Temperatur der Rauchgasschicht zu bestimmen. Diese ergibt sich aus der Energiebilanz der Rauchgasschicht.

$$dh / dt + \dot{h}_{ab} - \dot{h}_{zu} = 0 \quad \text{Gl.(3-12)}$$

In dieser Energiebilanz sind folgende Terme enthalten:

$$- \text{Energieabflüsse : } \dot{h}_{ab} = \sum \dot{h}_{ab} + \sum \dot{h}_{01} + \sum \dot{h}_w + \sum \dot{h}_{sv} + \dot{h}_r + \dot{h}_s \quad \text{Gl.(3-13)}$$

$$- \text{Energiezuflüsse : } \dot{h}_{zu} = \dot{Q} \quad \text{Gl.(3-14)}$$

Mit:

 $\dot{h}_{ab}$ = Energiestrom der Rauchgasschicht aus RWA - Öffnungen $\dot{h}_{01}$ = Strahlung durch RWA - Öffnung (wird vernachlässigt) $\dot{h}_w$ = Energiestrom an Decke und Wand im Bereich der Rauchgasschicht $\dot{h}_{sv}$ = sonstige Energieverluste (wird vernachlässigt) $\dot{h}_r$ = Strahlung der Rauchgasschicht (wird vernachlässigt) $\dot{h}_s$ = Energiestrom zur Erwärmung der Rauchgasschicht

Die Lösung der Bilanzen führt zu umfangreichen Gleichungssystemen, die nicht mehr geschlossen (von Hand) lösbar sind. Sie werden mit Rechenprogrammen unter Verwendung von Lösungsprozeduren aus der numerischen Mathematik gelöst. Solche Programme stehen auf der Basis der in Abschnitt 2 kurz erläuterten Zonenmodelle für die Anwendung zur Verfügung. Unter der Voraussetzung, dass die Temperaturen der Rauchgasschicht und der Bauteiloberflächen stationär sind (d. h.

sich nicht verändern $dT_g/dt = 0$), wird auch dh/dt in der Energiebilanz der Rauchgasschicht zu null. Vereinfachend werden auch die Strahlung durch die NRA-Öffnungen, sonstige Energieverluste z. B. an Einbauten o. ä. sowie die durch Strahlung der Rauchgasschicht an die Bauteile im Bereich der unteren Schicht abgegebenen Energieströme im Rahmen dieses Näherungsverfahrens vernachlässigt. Durch Vergleich (Kalibrierung) mit Wärmebilanzrechnungen mit dem Rechenprogramm MRFC (Mehrraum- Mehrzonenmodell) wird ein Anteil der Brandleistung bei der Berechnung der Rauchgastemperatur subtrahiert, so dass diese Energieströme ebenfalls zumindest pauschal berücksichtigt sind. Im Rahmen einer genaueren Rechnung werden diese Anteile bei einem Nachweis im Einzelfall berücksichtigt.

Die im ausströmenden Rauchgasmassenstrom enthaltene Wärmemenge $\dot{h}_{ab}$ berechnet sich unter Einbeziehung der Massenbilanz für die Rauchgasschicht $\dot{m}_{ab} = \dot{m}_{pl} + \dot{R}$ aus der Beziehung:

$$\dot{h}_{ab} = (\dot{m}_{pl} + \dot{R})(T_g - T_0)c_{pg} \quad \text{Gl.(3-15)}$$

Die Abbrandrate $\dot{R}$ wird üblicherweise vernachlässigt bzw. die aus der Literatur bekannten Beziehungen (werden später behandelt) beinhalten sowohl die am Plume eingemischte Menge der Luft aus der unteren Schicht als auch die Menge der verbrannten Brennstoffe (Abbrandrate). Der Energiestrom, der mit den Rauchgasen abgeführt wird, bestimmt sich aus:

Aus Gl. (3-3) und Gl. (3-12) wird daraus:

$$\dot{Q} = \dot{h}_{ab} + \dot{h}_w = (\dot{m}_{pl} + \dot{R})(T_g - T_0)c_{pg} + \dot{h}_w \quad \text{Gl.(3-16)}$$

Die in die Bauteile abgeführte Wärmemenge errechnet sich für den stationären Fall aus:

$$\dot{h}_w = f_{rc,w} \cdot A_w \cdot k \cdot (T_g - T_0) = f_{rc,w} \cdot A_w \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \cdot (T_g - T_0) \quad \text{Gl. (3-17)}$$

Es ist insbesondere bei den Bauteilen mit Wärmedämmung bzw. bei Bauteilen mit einem vergleichsweise hohen Wärmespeichervermögen nicht davon auszugehen, dass der stationäre Fall bei einem fortentwickelten Brand auftritt. Für die Kalibrierung wird daher ein freier Parameter $f_{rc,w}$ vorgesehen, mit dem auch die übrigen hier nicht explizit berücksichtigten Energieströme erfasst werden.

Wenn die Energiebilanz unter Berücksichtigung von $\dot{h}_{ab}$ (Energiestrom durch die Rauchgase), $\dot{h}_w$ (Energiestrom in die Bauteile) und der in die Rauchgasschicht

konvektiv eingetragenen Wärmemenge $\dot{Q}$ als Anteil aus der Brandleistung nach Abzug der Strahlungsverluste am Plume eingetragenen Brandleistung (Anteil $f_{r,pl}$ an der Brandleistung) aufgestellt wird, ergibt sich daraus die Energiebilanz für die Rauchgasschicht.

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c \\ \dot{h}_{ab} + \dot{h}_w &= (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c \\ (\dot{m}_{pl} + \dot{R})(T_g - T_0) c_{pg} + f_{rc,w} \cdot A_w \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \cdot (T_g - T_0) &= (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c = (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c \\ (\dot{m}_{pl} + \dot{R})(T_g - T_0) c_{pg} + f_w \cdot \dot{h}_c &= (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c \\ (\dot{m}_{pl} + \dot{R})(T_g - T_0) c_{pg} &= (1 - f_{r,pl} - f_w) \dot{h}_c\end{aligned}\quad \text{Gl.(3-18)}$$

Die Brandleistung berechnet sich aus der Brandfläche (A_{br}) für die entsprechende Bemessungsgruppe und der flächenspezifischen Brandleistung $\dot{h}_c''$ (in kW/m²) auf dieser Fläche zu

$$\dot{h}_c = A_{Br} \dot{h}_c'' \quad \text{Gl.(3-19)}$$

Aus Gl. (3-18) und Gl. (3-19) berechnet sich die Temperaturerhöhung der Rauchgasschicht über die Umgebungstemperatur zu:

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}} \quad \text{Gl.(3-20)}$$

3.2 Ermittlung der am Plume eingemischten Luftmenge

Für den Massenstrom der in den Plume eingemischten Frischluft werden in der Literatur verschiedene Beziehungen angegeben, die jeweils aus Brandversuchen mit bestimmten Randbedingungen abgeleitet wurde. Bei der Bestimmung der erforderlichen Abzugsflächen sind daher verschiedene Beziehungen zu berücksichtigen. Außerdem ist jeweils zu beachten, dass der betrachtete Fall im Gültigkeitsbereich der Plumeformeln liegt. Von den bekanntesten Plumeformeln werden u. a. die folgenden berücksichtigt:

- Thomas und Hinkley
- McCaffrey
- Zukoski

In Bild 3-1 sind die Ausbildung der Flamme und des Plumes schematisch dargestellt. In der Praxis wird der Brandbereich entweder als Punktquelle aufgefasst, oder dem Feuerplume wird ein sogenannter virtueller Quellpunkt zugeordnet. Der Winkel zwischen Plumenachse und Plumenkegel beträgt ungefähr 15° . Es ist zu unterscheiden, ob mit der Brandleistung $\dot{Q}_c = \dot{h}_c = A_{Br} \dot{h}_c''$ (netto wie gegeben) oder mit der konvektiven Brandleistung $\dot{Q}$ (abzüglich der Strahlungsverluste am Plume an die Bauteile) zu rechnen ist

$$\dot{Q} = (1 - f_{r,Pl}) \dot{h}_c = (1 - f_{r,Pl}) A_{Br} \dot{h}_c'' \quad \text{Gl. (3-21)}$$

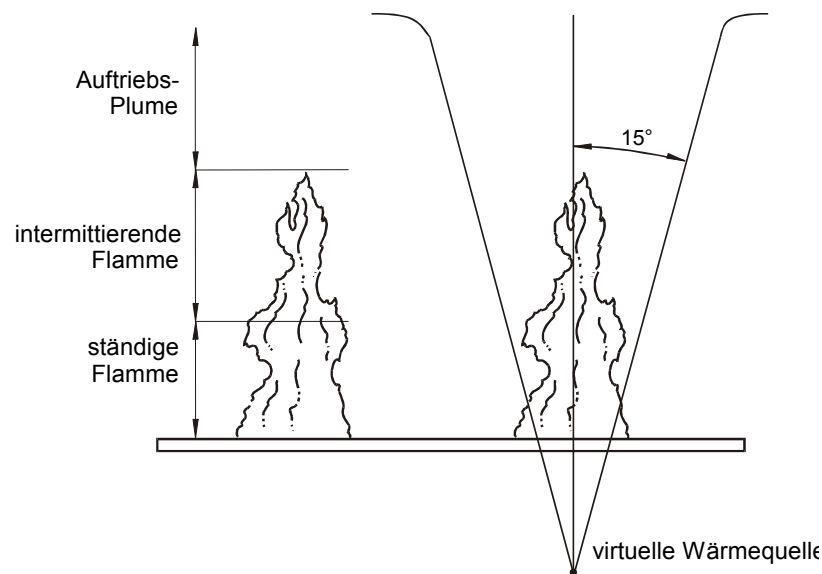


Bild 3-1: Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume

3.3 Flammenhöhe

Die Höhe des Flammenbereiches inklusive der intermittierenden Zone beträgt nach

Zukoski et al. für $l/D < 6$ und $\frac{\dot{Q}_c^{2/5}}{D} < 26$:

$$l_F = 0,23 \cdot \dot{Q}_c^{2/5} \quad \text{Gl. (3-22)}$$

Darin sind:

l_F Flammenhöhe in m

$\dot{Q}_c$ Brandleistung in kW

D Durchmesser des Brandherdes in m.

Für Holzkrippen gilt nach Thomas et al. im Bereich $3 < l_F/D < 10$:

$$l_F = 0,20 \cdot \dot{Q}_C^{0,61} / D^{0,5} \quad \text{Gl. (3-23)}$$

Für den Bereich $7 < \dot{Q}_C^{2/5} / D < 700 \text{ kW}^{2/5} / \text{m}$ gilt nach Heskestad allgemein:

$$l_F = 0,23 \cdot \dot{Q}_C^{2/5} - 1,02 \cdot D \quad \text{Gl. (3-24)}$$

Für die Unterscheidung, welche Plumeformel für die Berechnung des Massenstroms verwendet wird, wird die Flammenhöhenformel Gl (12ii) aus Thomas: „The size of flames from natural fires. 9th symposium on combustion (1961), S.844-859“ zugrundegelegt

$$h_{fl} / D = 42 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61} \quad \text{Gl.(3-25)}$$

(der Klammerausdruck ist dimensionslos, mit SI-Einheiten, also $\dot{m}''$ in $\text{kg/m}^2\text{s}$, ρ_0 in kg/m^3 , g in m/s^2 und D in m , auch wenn Thomas andere Einheiten im gks-System verwendet hat, aber es stimmt mit konventionellen SI-Einheiten)

Bild 3-2: Korrelation für die Flammenhöhe nach Thomas

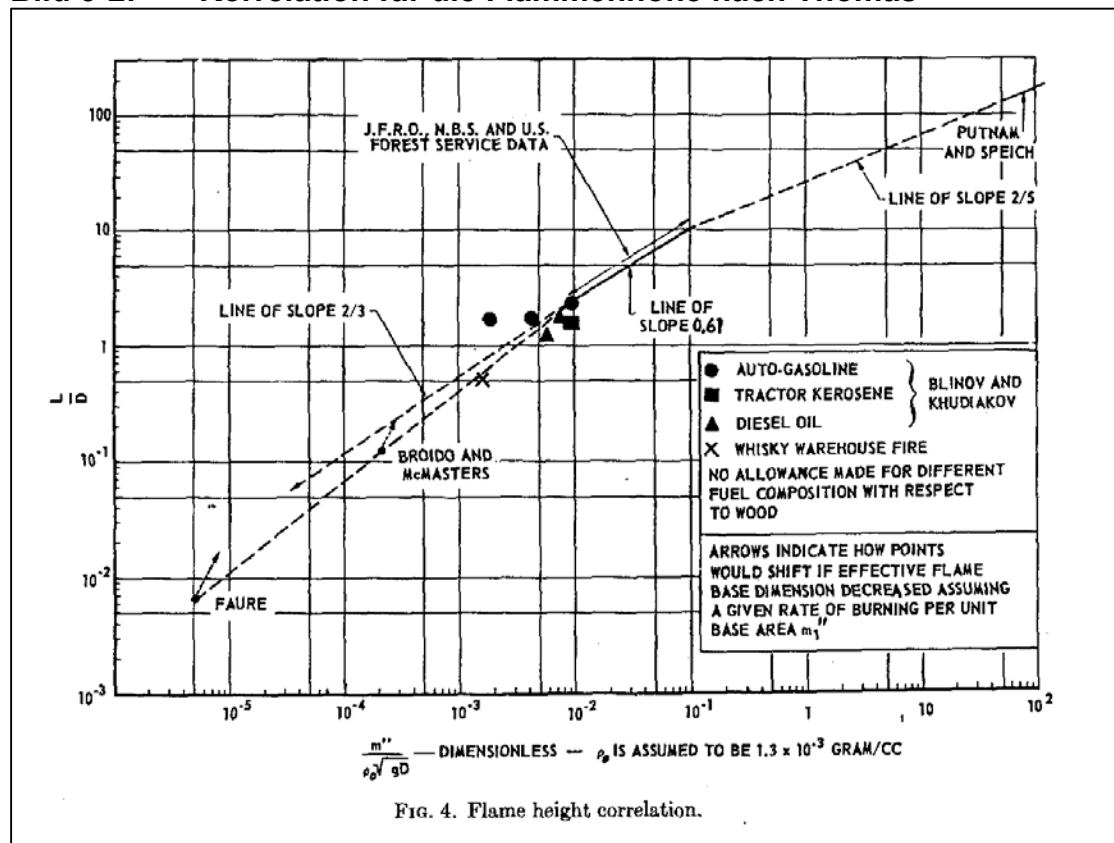


Bild 3-2 ist der Arbeit von Thomas entnommen (S. 847), hierauf bezieht sich die Gleichung (12ii). $\left(\frac{\dot{m}''}{\rho_0 (gD)^{1/2}} \right)$ ist hierbei eine FROUDE-Zahl bzw. deren Quadratwurzel, und bezeichnet das dimensionslose Verhältnis von Trägheitskräften zu Auftriebskräften.

Die flächenspezifische Abbrandrate errechnet sich aus der flächenspezifischen Brandleistung und dem Heizwert des Brennstoffs (in den Versuchen Holz) zu:

$$\dot{m}'' = \frac{q''}{H_{ui,eff}} = \frac{(1 - f_{r,pl}) \cdot \dot{h}_c''}{H_{ui,eff}} \quad \text{Gl.(3-26)}$$

Der untere Heizwert $H_{ui,eff}$ von Holz wird dabei effektiv mit 15000 kJ/kg (eigene Annahme) berücksichtigt wegen Feuchtegehalt, unvollständige Verbrennung etc. Falls überwiegend andere Brandstoffe mit höheren effektiven Heizwerten zur Anwendung kommen, ist dies ggfs. zu berücksichtigen. (Heizwert = „unterer“ Heizwert ohne Ausnutzung der Wasserdampfrekondensation aus der freigesetzten Wärme, Brennwert = „oberer“ Heizwert in alter Bezeichnung, also bei Ausnutzung vollständiger Wasserdampfrekondensation, vgl. „Brennwertkessel“)

$$\begin{aligned} 300 &= \dot{h}_c'' \\ A_{Br} &= \frac{\pi D^2}{4} \\ \dot{h}_c &= A_{Br} \dot{h}_c'' = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \dot{h}_c'' \\ \dot{Q} &= (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c = (1 - f_{r,pl}) \frac{\pi D^2}{4} \cdot \dot{h}_c'' = 0,7854 \cdot (1 - f_{r,pl}) \cdot D^2 \cdot \dot{h}_c'' \end{aligned} \quad \text{Gl.(3-27)}$$

Damit berechnet sich die Flammenhöhe zu:

$$h_{fl} = 42 \cdot D \cdot \left(\frac{(1 - f_{r,pl}) \cdot \dot{h}_c''}{H_{ui,eff} \cdot \rho_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61} \quad \text{Gl.(3-28)}$$

42 entspricht dem Achsenabschnitt beim Durchgang durch 1 im doppeltlogarithmischen Maßstab,
0,61 entspricht der Steigung

3.4 Massenströme nach verschiedenen Theorien

In den Formeln dieses Abschnittes wird die Aufstiegshöhe der Rauchgase zur besseren Unterscheidung vom Durchmesser der Brandfläche D mit z bezeichnet.

Diese entspricht d in Abb. 3-2 und in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Thomas und Hinkley (Literatur [2])

Die angegebene Beziehung wurde von Thomas und Hinkley aus Versuchen abgeleitet, bei denen die Flammen in die Rauchgasschicht hineinragten. Der Massenstrom berechnet sich mit den Parametern

z = Höhe über Plumequelle in [m]

D = Durchmesser Brandherd in [m]

d = Aufstiegshöhe des Plume (d in Abb. 3-2 und in Abb. 3-3)

zu:

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = c_{TH} \cdot \pi D \cdot d^{1,5} \quad \text{Gl.(3-29)}$$

$$\text{mit: } D = \sqrt{A_{Br} \cdot \frac{4}{\pi}} \quad \text{Gl.(3-30)}$$

$c_{TH} = 0,188$ für große Räume und großen Abstand Decke Brandherd

mit $d > 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$ Faktor 1,0

$c_{TH} = 0,21$ für große Räume und kleinen Abstand Decke Brandherd

mit $d \leq 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$ Faktor 1,117

$c_{TH} = 0,337$ für kleine Räume Faktor 1,793

In kleinen Räumen ist die folgende Beziehung zu verwenden. (*Was sind kleine Räume?*)

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,337 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2\sqrt{\pi A_{Br}} \quad \text{Gl.(3-31)}$$

mit U = Umfang der Brandfläche wird aus (30) für kreisrunde Brandflächen mit dem Durchmesser D

$$D = 2\sqrt{\frac{A_{Br}}{\pi}} \quad \text{Gl.(3-32)}$$

$$U = 2\sqrt{\pi A_{Br}} \quad \text{Gl.(3-33)}$$

Die genannte Beziehung in Gl. (3-29) gilt für folgende Bereiche:

$D > d/10$ (d. h. bis zu begrenzten Aufstiegshöhen) Gl.(3-35)

$d < 2,5 \cdot U$ Gl.(3-36)

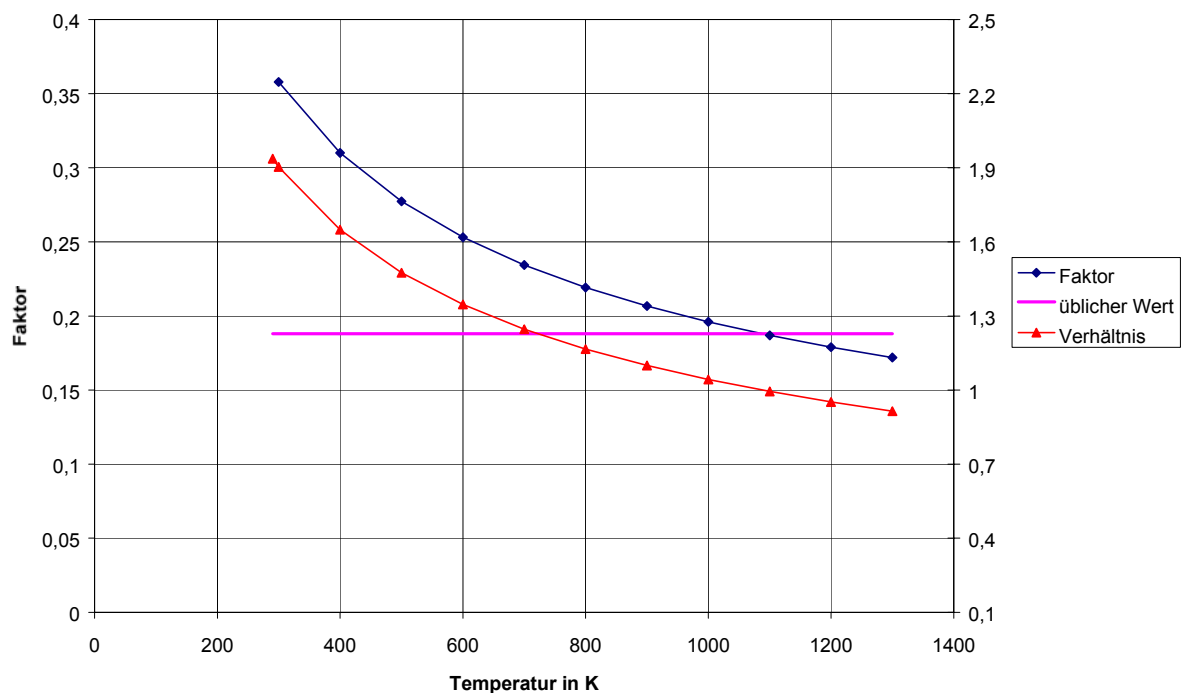
$200 < \dot{h}_c'' < 750 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ Gl.(3-37)

Der konstante Vorfaktor von 0,188 hat nach der Originalliteratur nur Gültigkeit, wenn die Temperatur in der Rauchgasschicht (nicht nur diejenige der in die Rauchgasschicht eintretenden Rauchgase) ca. 800 °C beträgt. Bei geringeren Temperaturen ist ein davon abweichender Zusammenhang zu beachten. Es gilt dann:

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,096 \cdot U \cdot \rho_0 \cdot z^{3/2} \cdot \left(g \cdot \frac{T_0}{T_f} \right)^{1/2} \quad \text{Gl.(3-38)}$$

Der Faktor $0,096 \cdot \rho_0 \cdot \left(g \cdot \frac{T_0}{T_f} \right)^{1/2}$ ist im folgenden Diagramm ausgewertet. Daraus geht

hervor, dass der Massenstrom nach der üblichen Formel für Rauchgastemperaturen bis zu etwa 800 °C bis maximal 100 % unterschätzt wird. Wenn die Korrektur berücksichtigt werden soll, ist eine iterative Berechnung erforderlich, bzw. es ist nur eine Verwendung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Energiebilanz zumindest der Rauchgasschicht möglich. Dies ist bei den Zonenmodellen nach der Wärmebilanzrechnung der Fall. Bei einer Rauchgastemperatur von etwa 500 °C entspricht der Faktor der in Gl. (3-20) definierten Konstante c_{TH} , die für eine Aufstiegshöhe von $d \leq 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$ gültig ist.



McCaffrey (Literatur [6])

Die Herleitung der Formel erfolgte aus Versuchen mit Gasbrennern.

Parameter: d = Höhe über Plumequelle in [m]

$\dot{Q}$ = konvektive Energiefreisetzung in [kW]

Die Bestimmung erfolgt für die drei Bereiche

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,0109644 \cdot \dot{Q} \cdot \left(\frac{d}{\dot{Q}^{0,4}} \right)^{0,566} \quad \text{für} \quad d \leq 0,08 \cdot \dot{Q}^{0,4} \quad \text{Gl.(3-39)}$$

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,0249994 \cdot \dot{Q} \cdot \left(\frac{d}{\dot{Q}^{0,4}} \right)^{0,892247} \quad \text{für} \quad d \leq 0,20 \cdot \dot{Q}^{0,4} \quad \text{Gl.(3-40)}$$

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,1255552 \cdot \dot{Q} \cdot \left(\frac{d}{\dot{Q}^{0,4}} \right)^{1,895} \quad \text{für} \quad d > 0,20 \cdot \dot{Q}^{0,4} \quad \text{Gl.(3-41)}$$

Die Gültigkeit der Beziehungen ist für alle drei Bereiche gegeben. In CFAST wird die Anwendung auf 60 MW begrenzt. Eine Begründung dafür ist nicht bekannt. Im Originalartikel von McCaffrey reichen die Versuche bis 57 kW.

Zukoski (Literatur [3])

Parameter: d = Höhe über Plumequelle in [m]

$\dot{Q}$ = konvektive Energiefreisetzung in [kW]

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,976 \cdot \dot{Q} \cdot \left(\frac{d - z_0}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{5/3} = 0,976 \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot (d - z_0)^{5/3} \quad \text{Gl.(3-42)}$$

$$\text{mit: } z_0 = h_{fl} - 0,175 \cdot \dot{Q}^{2/5} \quad \text{Gl.(3-43)}$$

Zugrundegelegt ist die Flammenhöhenformel Gl (12ii) aus Thomas:

$$h_{fl} = 42 \cdot D \cdot \left(\frac{(1 - f_{r,pl}) \cdot \dot{h}_c''}{H_{ui,eff} \cdot \rho_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61} \quad \text{siehe (Gl.(3-26))}$$

Gültigkeitsbereich ist $\Delta T/T_0 \ll 1$

Für flächenmäßig beschränkte Brandquellen und unter der Voraussetzung, dass die raucharme Zone mindestens doppelt so hoch ist als die ab Fußbodenhöhe gerechnete Flammenhöhe.

Mit dem Rechenprogramm MRFC ist die gezielte Auswahl von verschiedenen Plumeformeln möglich. Als Standardfall ist vorgesehen, dass für Brände mit kleinen Ausdehnungen bzw. in der Brandentstehungsphase der Plume nach McCaffrey und für große Brände der Plume nach Thomas und Hinkley verwendet wird. Die Plumeformel nach McCaffrey wird verwendet, solange gilt:

$$D < 0,25 \cdot (h-z) \text{ und } h_{fl} < 0,5 \cdot (h-z) \quad \text{Gl.(3-44)}$$

Der Plume nach Thomas und Hinkley wird angewendet, wenn die beiden Bedingungen

$$D > 0,5 \cdot (h-z) \text{ und } h_{fl} > (h-z) \quad \text{Gl.(3-45)}$$

Mit folgenden Größen jeweils in [m]

- D = äquivalenter Brandherddurchmesser
- H = Raumhöhe
- Z = Dicke der Rauchgasschicht
- h_{fl} = Flammenhöhe

erfüllt sind. Dazwischen wird linear zwischen den Massenströmen nach McCaffrey und nach Thomas und Hinkley interpoliert.

3.5 Überprüfung des Näherungsverfahrens durch Wärmebilanzrechnung und mit Literaturangaben

Mit dem Programm MRFC wurden verschiedene Brandsimulationsrechnungen für 1600 m² große Rauchabschnitte durchgeführt. Das Verhältnis von Zuluft/Abluft wurde einheitlich mit 1,5fach angenommen. Es wurden verschiedene Materialien für die Umfassungsbauteile berücksichtigt. Diese waren:

- 10 cm Mineralwolle (Standardfall)
- 10 cm Beton
- 6 mm Stahlblech

Die für die Berechnungen in der alten Fassung der DIN 18232-2 verwendete Formel nach Tanaka entspricht der in diesem Beitrag enthaltenen Beziehung nach Zukoski, allerdings ohne Berücksichtigung der virtuellen Brandherdlage z_0 in Gl.(3-42). Bei den durchgeführten Vergleichsrechnungen wurden die folgenden Beziehungen ausgewählt:

- Thomas und Hinkley
- Zukoski

Es wurde festgestellt, dass bei den in DIN 18232-2 definierten Brandszenarien, insbesondere bei den kleineren Bränden in den Bemessungsgruppen 1 bis 3 bei großen Aufstiegshöhen für die festgelegte spezifische Brandleistung von 300 kW/m², der Gültigkeitsbereich der Formel nach Thomas und Hinkley verlassen wird. Es wurde daher festgelegt, dass die Formel nach Thomas und Hinkley erst dann angewendet wird, wenn die Flammen in die Rauchgasschicht hineinragen, d. h. solange $h_{fl} > d$ ist. Davor wird die Beziehung nach Zukoski mit virtueller Lage des Brandherdes

angewendet. Da die Beziehungen nicht zueinander kompatibel sind wurde ein Übergangsbereich definiert, bei dem zwischen den beiden Plumeformeln linear interpoliert wird. Die Grenze für den Übergang zwischen den Plumeformeln wird bei $2 \cdot h_{fl} = d$ gesetzt. Es gilt also:

Plumeformel nach Zukoski mit virtuellem Ursprung

$$d \geq 2 \cdot h_{fl}$$

Lineare Interpolation zwischen Zukoski und Thomas und Hinkley

$$2 \cdot h_{fl} > d > h_{fl}$$

Plumeformel nach Thomas und Hinkley

$$h_{fl} \geq d$$

Es wurden die in Tabelle 13 angegebenen Gültigkeitsbereiche für die einzelnen Plumeformeln definiert. In Tabelle 13 sind die Interpolationsfaktoren f_{int} für die Ermittlung des maßgebenden Massenstroms am Plume angegeben. Der Massenstrom berechnet sich aus der Beziehung:

$$\dot{m}_{pl} = f_{int} \cdot \dot{m}_{pl,Zuk} + (1 - f_{int}) \cdot \dot{m}_{pl,Tom / Hin} \quad \text{Gl.(3-46)}$$

mit:

$$f_{int} = 1 \quad \text{für} \quad d > 2 \cdot h_{fl}$$

$$= 0 \quad \text{für} \quad d < h_{fl}$$

$$f_{int} = \frac{d - h_{fl}}{h_{fl}} \quad h_{fl} < d < 2 \cdot h_{fl}$$

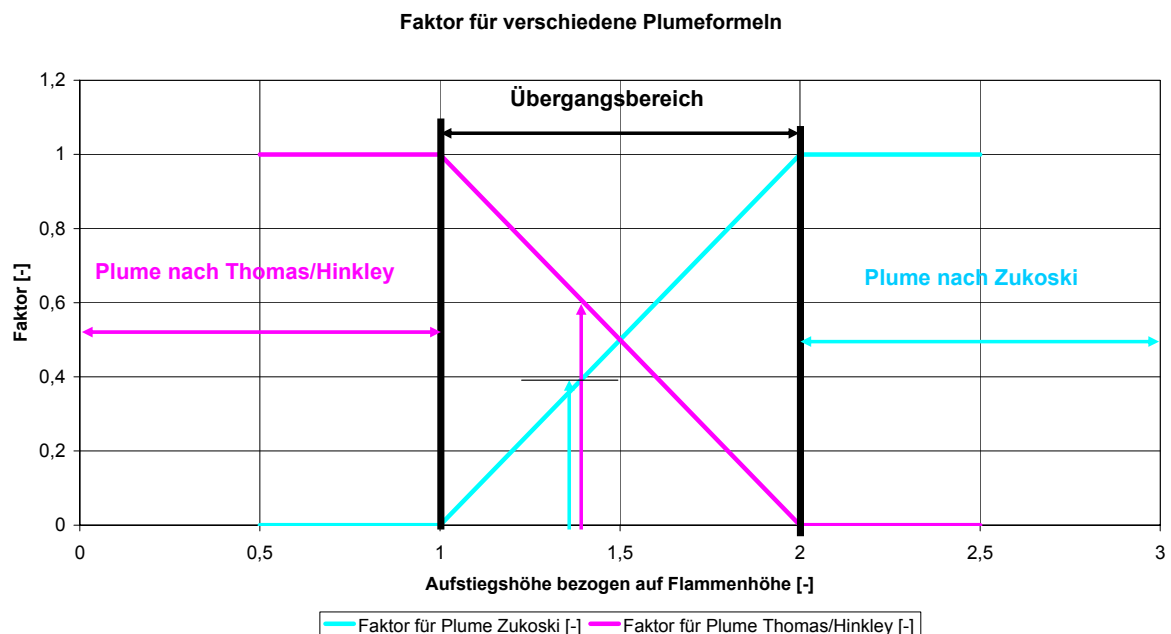


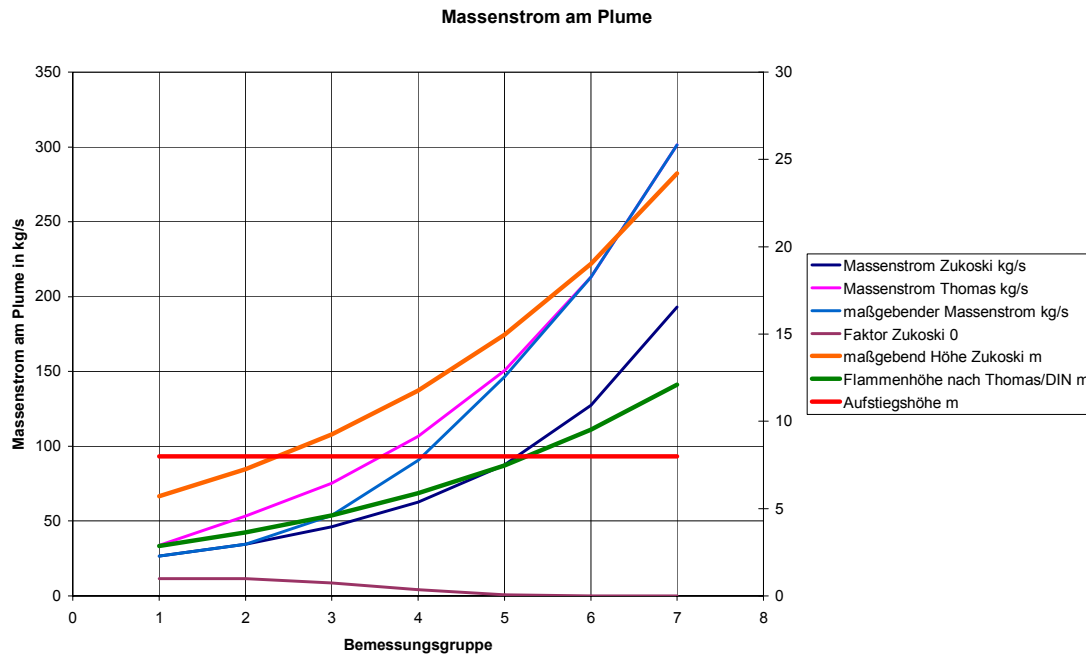
Tabelle 13: Gültigkeitsbereiche der verschiedenen Plumeformeln für Berechnung

Raumhöhe bis 20 m	Dicke der rauchfreien Schicht [m]	Bemessungsgruppe/Brandgröße						
		1	2	3	4	5	6	7
		5	10	20	40	80	160	320
D äquivalent		2,52	3,57	5,05	7,14	10,09	14,27	20,19
Q Plume		1200	2400	4800	9600	19200	38400	76800
zfl		2,85338	3,63051	4,61929	5,87737	7,4781	9,51479	12,1062
z0 (Gl. 3-1)		-0,13	-0,3061	-0,5751	-0,9767	-1,5659	-2,4188	-3,6403
z0 (Gl. 3-2)		-1,1586	-1,7725	-2,6836	-4,0285	-6,005	-8,8985	-13,12
	2,5	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	3	0,051	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	3,5	0,227	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	4	0,402	0,102	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	4,5	0,577	0,239	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	5	0,752	0,377	0,082	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	5,5	0,928	0,515	0,191	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	6	Zukoski	0,653	0,299	0,021	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	6,5	Zukoski	0,790	0,407	0,106	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	7	Zukoski	0,928	0,515	0,191	Tho-Hin	Tho-Hin	Tho-Hin
	7,5	Zukoski	Zukoski	0,624	0,276	0,003	Tho-Hin	Tho-Hin
	8	Zukoski	Zukoski	0,732	0,361	0,070	Tho-Hin	Tho-Hin
	8,5	Zukoski	Zukoski	0,840	0,446	0,137	Tho-Hin	Tho-Hin
	9	Zukoski	Zukoski	0,948	0,531	0,204	Tho-Hin	Tho-Hin
	9,5	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,616	0,270	Tho-Hin	Tho-Hin
	10	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,701	0,337	0,051	Tho-Hin
	10,5	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,787	0,404	0,104	Tho-Hin
	11	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,872	0,471	0,156	Tho-Hin
	11,5	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,957	0,538	0,209	Tho-Hin
	12	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,605	0,261	Tho-Hin
	12,5	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,672	0,314	0,033
	13	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,738	0,366	0,074
	13,5	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,805	0,419	0,115
	14	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,872	0,471	0,156
	14,5	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,939	0,524	0,198
	15	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,576	0,239
	15,5	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,629	0,280
	16	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	Zukoski	0,682	0,322

Diese Festlegungen ergeben sich für eine spezifische Brandleistung von 300 kW/m². Bei anderen Brandleistungen stellen sich andere Anwendungsbereiche ein. Bei größeren Brandleistungen gilt die Formel von Thomas und Hinkley dann auch bei geringeren Aufstiegshöhen als in der zuvor angegebenen Tabelle. Bei geringeren spezifischen Brandleistungen ist auch bei geringeren Aufstiegshöhen als oben angegeben mit der Formel nach Zukoski zu rechnen.

In Bild 3-3 sind für eine Aufstiegshöhe von 8 m die maßgebenden Höhen sowie die Massenströme für eine spezifische Brandleistung von 300 kW/m² dargestellt.

Bild 3-3: Massenströme in den verschiedenen Bemessungsgruppen bei einer Aufstiegshöhe von 8 m mit spezifischer Brandleistung von 300 kW/m²



Aus Bild 3-4 geht hervor, dass sich der Übergangsbereich für die gleiche Aufstiegshöhe von 8 m bei spezifischen Brandleistungen von 600 kW/m² zu geringeren Bemessungsgruppen verschiebt. Danach wird der maßgebende Massenstrom für fast den gesamten Anwendungsbereich nach der Beziehung von Thomas und Hinkley ermittelt. Diese Festlegungen wurden für die Ermittlung der erforderlichen Volumenströme bei der Dimensionierung von mechanischen Rauchabzugsanlagen nach DIN 18232-5 verwendet. Aus Bild 3-5 geht hervor, dass sich der Übergangsbereich bei spezifischen Brandleistungen von 100 kW/m² zu höheren Bemessungsgruppen verschiebt. Danach wird der maßgebende Massenstrom für einen weiten Anwendungsbereich bei den geringeren Bemessungsgruppen, die mit einer geringeren Brandleistung verbunden sind, nach der Beziehung von Zukoski ermittelt. Der Übergangsbereich beginnt dann erst bei Bemessungsgruppe 5.

Bild 3-4: Massenströme in den verschiedenen Bemessungsgruppen bei einer Aufstiegshöhe von 8 m mit spezifischer Brandleistung von 600 kW/m²

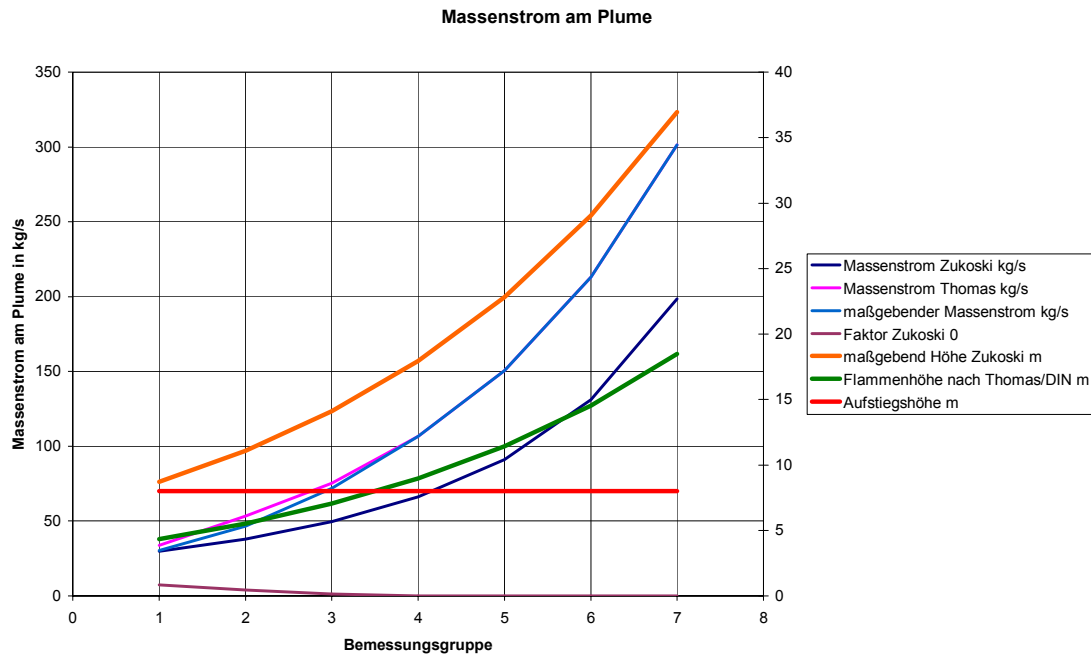
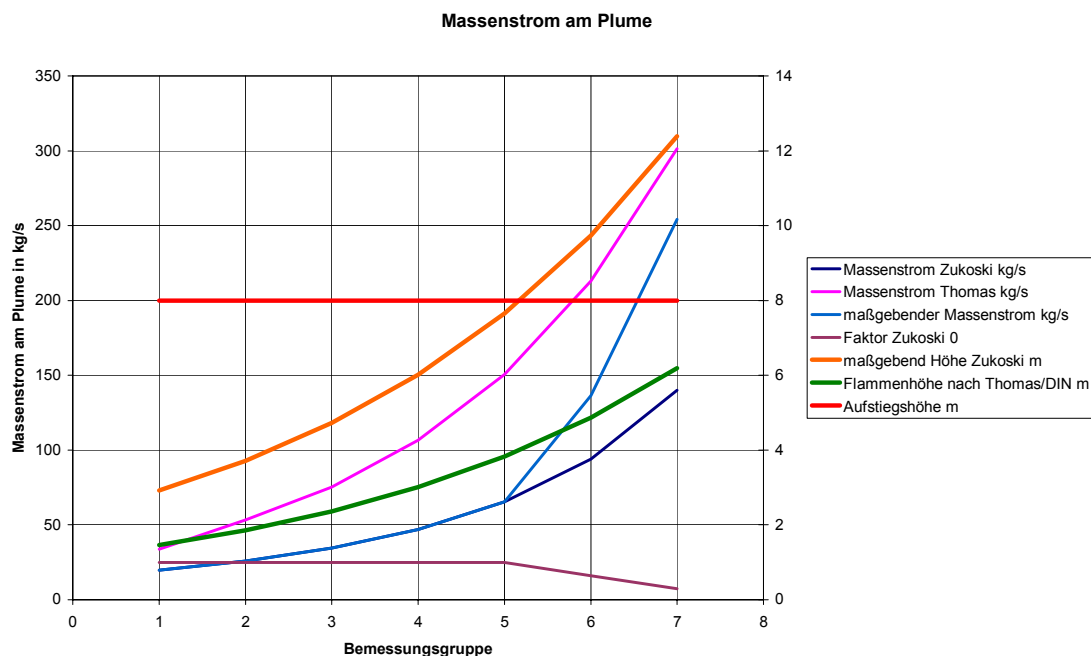


Bild 3-5: Massenströme in den verschiedenen Bemessungsgruppen bei einer Aufstiegshöhe von 8 m mit spezifischer Brandleistung von 100 kW/m²



Im Folgenden soll überprüft werden, ob die abgeleiteten Berechnungsmethode mit in der Literatur verwendeten Formeln übereinstimmt. Die mittlere Temperaturerhöhung ergibt sich unter Lösung der Energiebilanz in Gl. (3-13) aus Gl. (3-15) zu:

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl}) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg} + f_{rc,w} \cdot A_w \cdot \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_a}}} \quad \text{Gl.(3-47)}$$

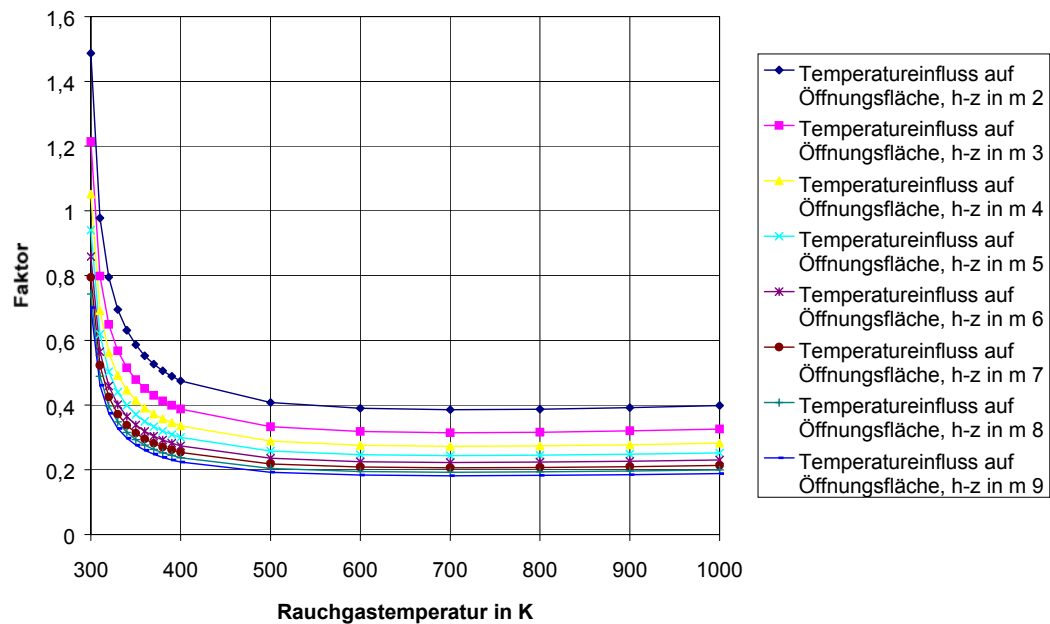
Nach der Literaturstelle BRE 186 wird die erforderliche Öffnungsfläche der RA-Geräte nach der folgenden Beziehung (Gl. (3-48)) ermittelt. Darin wird die nach Gl. (3-20) ermittelte mittlere Rauchgastemperatur verwendet.

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\rho_0} \sqrt{\frac{\left(T_g^2 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 T_0 T_g \right)}{2(h-d)(T_g - T_0)gT_0}} \quad \text{Gl.(3-48)}$$

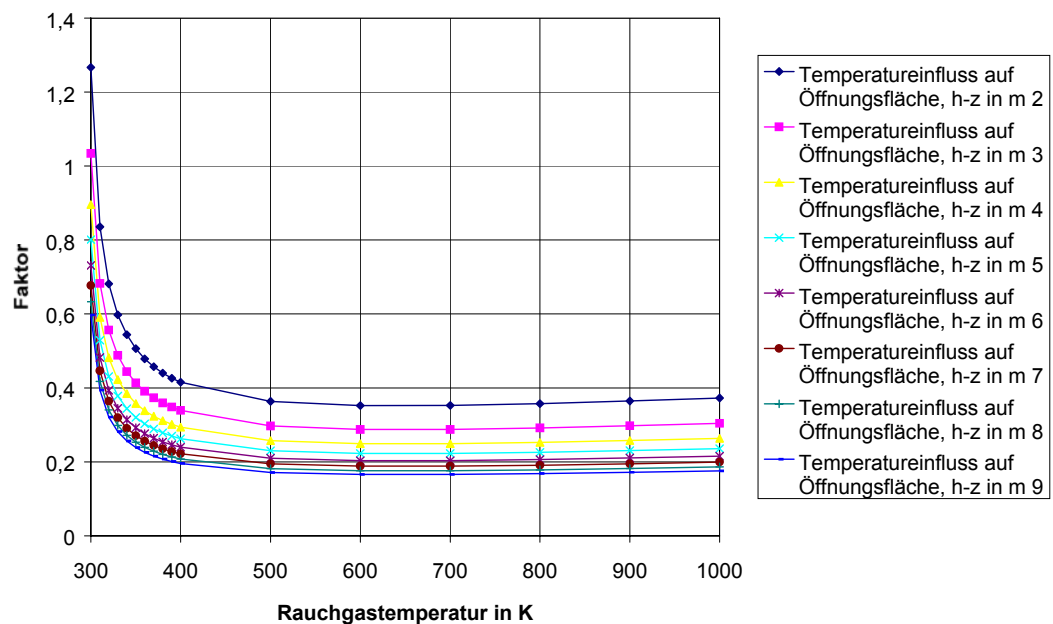
Gl.(3-10) in Gl.(3-11) eingesetzt liefert:

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{\frac{(h-z) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g}{2 \left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}}} = (\dot{m}_{pl} + \dot{R}) \sqrt{\frac{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \right)}{(h-z) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) 2 \rho_0 g \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\rho_0} \sqrt{\frac{\left(T_g^2 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 T_0 T_g \right)}{2(h-z)(T_g - T_0)gT_0}}$$

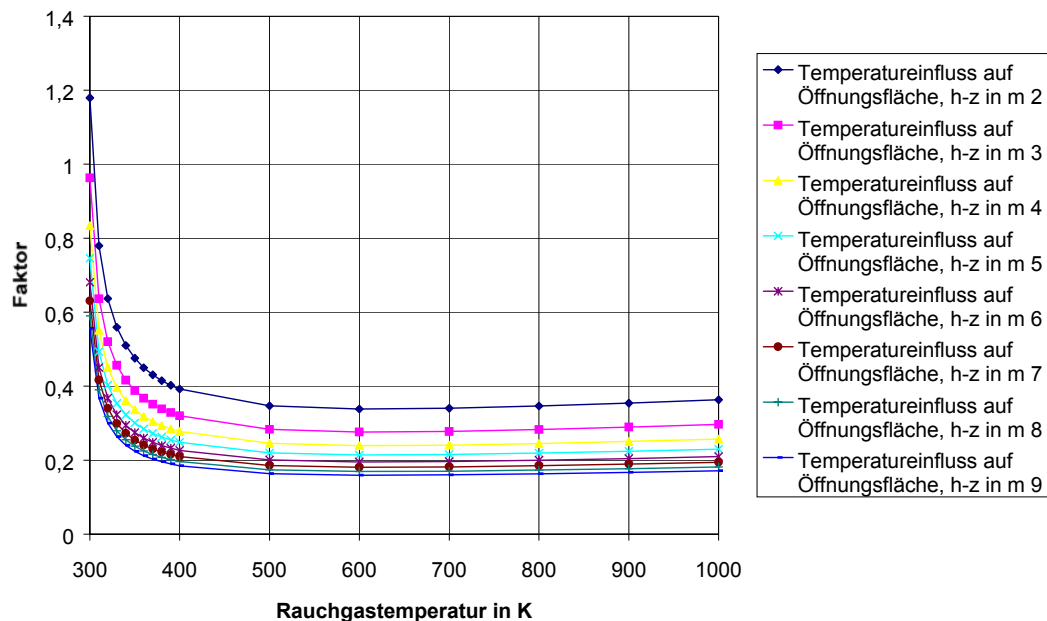
Die Rauchgastemperatur hat, insbesondere bei Temperaturen in der Rauchgas-schicht von weniger als 400 °C, einen größeren Einfluss auf die erforderliche Öffnungsfläche der NRA-Geräte. Der Wurzelausdruck in Gl. (3-48) ist in der folgenden Darstellung für unterschiedliche Rauchgasdicken und ein Verhältnis der Zu- und Abluftflächen von 1:1 ausgewertet.



Für ein Verhältnis der Zuluft zu Abluftflächen von 1:1,5 ergibt sich die folgende Auswertung:



Für ein Verhältnis der Zuluft- zu Abluftflächen von 1:2 ergibt sich die folgende Auswertung:



3.6 Gang der Berechnung für verschiedene Plumeformeln:

Je nach Fragestellung ergeben sich andere Strategien und Reihenfolgen für die Berechnung. Die Aufgabenstellung Ermittlung der Dicke der raucharmen Schicht kann nicht geschlossen gelöst werden, weil die Rauchgasmenge nicht bekannt ist, die in die Rauchgasschicht eingetragen wird. In diesem Fall ist eine iterative Berechnung mit Schätzung der Aufstiegshöhe und Berechnung des Fehlers in der Massenbilanz und Verbesserung der Schätzung aus dem Fehler bis zur Konvergenz (kleiner Fehler in der Massenbilanz) erforderlich. Diese Aufgabe kann z. B. mit dem Programm EXCEL gelöst werden.

Für die übrigen Fälle können die erforderlichen Flächen entweder für die NRA-Öffnungen oder die Zuluftflächen berechnet werden, wenn eine der Flächen bekannt ist oder ein fest vorgegebenes Verhältnis zwischen Zu- und NRA-Öffnungsflächen vorgegeben wird. Bei der Forderung nach einer maximalen Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft ergeben sich diese direkt aus der damit festliegenden Druckdifferenz an den Zuluftöffnungen. Die erforderliche Öffnungsfläche der NRA-Öffnungen errechnet sich dann direkt aus der im Dach vorliegenden Druckdifferenz.

Die folgenden Parameter sind bei allen Dimensionierungsaufgaben (Bestimmung der Dicke der raucharmen Schicht ist keine Dimensionierungsaufgabe) die gleichen und werden nicht verändert. Sie werden daher zunächst festgelegt. Ein Teil der Parameter wird für die Handrechnung nicht benötigt, wenn bestimmte Annahmen z. B. für die Wärmeabgabe an die Bauteile getroffen werden.

Festlegung der konstanten Parameter:

Hallenhöhe	h	m
Dicke der raucharmen Schicht	d	m
Flächenspezifische Brandleistung	$\dot{h}_c''$	kW/m ²
Verhältnis von Zu- und Abluftflächen	$f_{zu/ab} = A_{zu}/A_{ab}$	
Fraktalwert für Strahlungsverluste am Plume	$f_{r,Pl}$	
Stoffwerte der Bauteile s, λ		

Stoff	S in m	λ in W/mK
Mineralwolle	0,10	0,044
Beton	0,10	2,21
Stahl	0,006	44,7

Wärmeübergang innen:	$\alpha_i = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$
Wärmeübergang außen:	$\alpha_a = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$
Faktor für Abgabe an die Bauteile nach stationärer Berechnung	$f_{rc,w}$
Faktor für Abgabe an die Bauteile als Anteil an Brandleistung	f_w
Umgebungstemperatur	$T_0 = 293 \text{ K}$
Dichte der Luft bei Umgebungstemperatur	$\rho_0 = 1,2045 \text{ kg/m}^3$
Spezifische Wärmekapazität der Luft (konstant)	$c_{pg} = 1,04 \text{ kWs/kgK}$

Berechnung für Bemessungsgruppen und Höhenverhältnisse:

Für jede Bemessungsgruppe:

Bemessungsgruppe	BMG	
Brandfläche	$A_{Br} = 5 \cdot 2^{(BMG-1)}$	m ² Gl.(3-61)
Brandleistung	$\dot{Q} = \dot{h}_c = A_{Br} \dot{h}_c''$	kW
Durchmesser Brandfläche	$D = \sqrt{\frac{4 A_{Br}}{\pi}}$	m
Umfang Brandfläche	$U = \sqrt{4 A_{Br} \pi}$	m
Flammenhöhe	l_f	m Gl.(3-16-18)
Lage virtueller Plumeursprung	z_0	m z. B. Gl.(3-32)

Für unterschiedliche Höhen der raucharme Schicht:

Überprüfung des Gültigkeitsbereichs für Plumeformel

Massenstrom am Plume je nach Plumeformel $\dot{m}_{pl} + \dot{R}$

Berechnung der Temperaturerhöhung über Umgebungstemperatur

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl}) c_{pg}} \quad \text{Gl.(3-15)}$$

Dichte der Rauchgase $\rho_g = \rho_0 \cdot T_0 / T_g$

Nachdem die Öffnungsflächen und Druckdifferenzen bekannt sind, können die weiteren Ergebnisse berechnet werden. Dies gilt für die folgenden Größen:

Strömungsgeschwindigkeit der Abluft $v_{ab} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{ab}}{\rho_g}}$ Gl.(3-6)

Volumenstrom der Abluft $\dot{V}_{ab} = v_{ab} \cdot A_{ab} \cdot 3600 = \frac{\dot{m}_{ab}}{\rho_g} \cdot 3600$ Gl.(3-76)

Volumenstrom Zuluft $\dot{V}_{zu} = v_{zu} \cdot A_{zu} \cdot 3600 = \frac{\dot{m}_{zu}}{\rho_0} \cdot 3600$ Gl.(3-79)

3.6.1 Berechnung für fest vorgegebenes Verhältnis von Zuluft und NRA-Flächen

Berechnung der Druckdifferenz an den Rauchabzugsöffnungen

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} = \frac{(h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} \quad \text{aus Gl.(3-10)}$$

Berechnung der erforderlichen Rauchabzugsöffnungsflächen

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_g}} \quad \text{aus Gl.(3-11)}$$

Zuluftöffnungen:

$$A_{zu} = f_{zu/ab} \cdot A_{ab} \quad \text{Gl.(3-77)}$$

Druckdifferenz an Zuluftöffnungen $\Delta p_{zu} = \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g} \Delta p_{ab}$ Gl.(3-9)

Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft $v_{zu} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{zu}}{\rho_0}}$ Gl.(3-4)

Aus Gl.(3-9) und Gl.(3-4) wird $v_{zu} = \frac{A_{ab}}{A_{zu}} \cdot \sqrt{\frac{2T_0 \Delta p_{ab}}{T_g \rho_0}} = \frac{1}{f_{zu,ab}} \cdot \sqrt{\frac{2T_0 \Delta p_{ab}}{T_g \rho_0}}$ Gl.(3-78)

Beispiel 1:

Es ist die erforderliche Öffnungsfläche zu ermitteln für eine Halle mit

–A = 1500 m²

–h = 13 m

–d = 2,5 m (angestrebte Dicke der raucharmen Schicht)

Für das Brandszenarium gelten folgende Bedingungen:

- Brandausbreitung mittel
- Zeit bis zur Einleitung von Löschmaßnahmen 10 min
- Rauchmeldergesteuerte Auslösung der Geräte
- BMG 4 , 12 MW, 40 m² mit D = 7,14 m

Berechnung

Die Flammenhöhe wird berechnet aus

$$h_{fl} / D = 42 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61} \quad \text{Gl.(3-25)}$$

zu $h_{fl} = 5,877 \text{ m}$

Mit den Eingangsgrößen

–D = 7,14 m

–Heizwert 15 000 kJ/kg

–Dichte Luft 1,2045 kg/m³

–g = 9,81 m/s²

–Strahlungsverlust = 0,2

–spezifische Brandleistung 300 kW/m²

berechnet sich der Plumemassenstrom unter der Bedingung, dass die

- Flammenhöhe > Aufstiegshöhe

➤Aus dem Plume nach Thomas und Hinkley mit

➤ $d \leq 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$ Faktor: 1,105

$$\dot{m}_{pl} = 1,105 \cdot 0,188 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2 \sqrt{\pi A_{Br}} \quad \text{Gl.(3-34)}$$

mit:

d = 2,5 m

U = D · π = 7,14 · π = 22,42 m

zu $\dot{m}_{pl} = 18,61 \text{ kg/s}$

Die Erhöhung der Rauchgastemperatur berechnet sich mit den Bedingungen

•T₀ = 293 K

•Strahlungsverlust 20 %

•Verlust an Bauteile 40 %

•c_{p,g} = 1,04 kWs/kgK

aus

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}} \quad \text{Gl.(3-15)}$$

$$\text{zu } T_g - T_0 = 248 \text{ K}$$

Die Druckdifferenz an den RA-Geräten berechnet sich aus

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h - d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g} \right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \right)} \quad \text{aus Gl.(3-10)}$$

$$-h = 13 \text{ m}$$

$$-d = 2,5 \text{ m}$$

$$-A_{zu}/A_{ab} = 1,5$$

$$\text{zu } \Delta p_{ab} = 45,84 \text{ Pa}$$

Die erforderliche RA- und Zuluftflächen berechnen sich aus:

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{18,61}{\sqrt{2 \cdot 45,84 \cdot 1,2045 \cdot \frac{293}{293 + 248}}} = 2,41 \text{ m}^2$$

$$\text{zu } A_{ab} = 2,41 \text{ m}^2 \text{ (aerodynamisch wirksame Fläche)}$$

und aus

$$A_{zu} = f_{zu/ab} \cdot A_{ab} / c_{v,zu}$$

$$-c_v = 0,7 \text{ für normale Öffnungen}$$

$$\text{zu } A_{zu} = 1,5 \cdot 2,41 / 0,7 = 5,16 \text{ m}^2$$

Für eine Dicke der raucharmen Schicht von 2,5 m für eine 13 m hohe Halle kann der Wert für die erforderliche RA-Fläche auch aus Tabelle 2 der DIN 18232-2 in der Bemessungsgruppe 4 zu 2,41 m² abgelesen werden.

Die Strömungsgeschwindigkeit an den Zuluftöffnungen ergibt sich aus

$$\Delta p_{zu} = \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \Delta p_{ab}$$

und

$$v_{zu} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{zu}}{\rho_0}}$$

zu $v_{zu} = 4,07 \text{ m/s}$

2. Beispiel

Bedingungen wie 1. Beispiel, jedoch für eine Aufstiegshöhe von 7,5 m.

Die Flammenhöhe bleibt wie für das 1. Beispiel bei $h_{fl} = 5,877 \text{ m}$

Der Plumemassenstrom wird errechnet unter Berücksichtigung der Randbedingungen, dass die Aufstiegshöhe in diesem Fall zwischen der einfachen und der doppelten Flammenhöhe liegt. Es gilt:

$$2 \cdot h_{fl} > 7,5 \text{ m} > h_{fl}$$

und der Massenstrom wird interpoliert zwischen den Formeln nach Zukoski und nach Thomas/Hinkley mit einem Interpolationsfaktor

$$\rightarrow f_{int} = (7,5 - 5,877) / 5,877 = 0,276$$

Nach Thomas/Hinkley errechnet sich der Massenstrom mit $d \leq 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$ zu:

$$\dot{m}_{pl} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2\sqrt{\pi A_{Br}} \quad \text{Gl.(3-34)}$$

mit:

$$d = 7,5 \text{ m}$$

$$U = D \cdot \pi = 7,14 \cdot \pi = 22,42 \text{ m}$$

$$\text{zu } \dot{m}_{pl,T} = 96,70 \text{ kg/s}$$

Nach Zukoski bestimmt sich der Massenstrom aus

$$\dot{m}_{pl} = 0,076 \cdot \dot{Q} \cdot \left(\frac{z - z_0}{\dot{Q}^{0,4}} \right)^{1,667} = 0,076 \cdot (z - z_0)^{1,667} \cdot \dot{Q}^{0,333} \quad \text{Gl.(3-42)}$$

$$\text{mit: } z_0 = h_{fl} - 0,175 \cdot \dot{Q}^{\frac{2}{5}} \quad \text{Gl.(3-43)}$$

$$-Q = (1 - 0,20) \cdot 1200 = 9600 \text{ kW}$$

$$\text{zu } \dot{m}_{pl,Z} = 56,92 \text{ kg/s (Zukoski)}$$

Die Interpolation mit dem o. g. Interpolationsfaktor liefert

$$\rightarrow \dot{m}_{pl} = 0,276 \cdot 56,92 + (1 - 0,276) \cdot 96,70 = 85,72 \text{ kg/s}$$

Die Erhöhung der Rauchgastemperatur berechnet sich aus

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}} \quad \text{Gl.(3-15)}$$

$$\text{zu } T_g - T_0 = 53,84 \text{ K}$$

Die Druckdifferenz an den RA-Geräten berechnet sich aus

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g} \right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \right)} \quad \text{aus Gl.(3-10)}$$

$$-h = 13 \text{ m}$$

$$-d = 7,5 \text{ m}$$

$$-A_{zu}/A_{ab} = 1,5$$

$$\text{zu } \Delta p_{ab} = 7,335 \text{ Pa}$$

Die erforderliche RA- und Zuluftflächen berechnen sich aus:

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{85,72}{\sqrt{2 \cdot 7,335 \cdot 1,2045 \cdot \frac{293}{293 + 53,84}}} = 22,19 \text{ m}^2$$

$$\text{zu } A_{ab} = 22,19 \text{ m}^2 \text{ (aerodynamisch wirksame Fläche)}$$

und aus

$$A_{zu} = f_{zu/ab} \cdot A_{ab} / c_{v,zu}$$

$$\text{zu } A_{zu} = 1,5 \cdot 22,19 / 0,7 = 47,54 \text{ m}^2$$

Für eine Dicke der raucharmen Schicht von 7,5 m für eine 13 m hohe Halle kann der Wert für die erforderliche RA-Fläche auch aus Tabelle 2 der DIN 18232-2 in der Bemessungsgruppe 4 zu 22,19 m² abgelesen werden.

Die Strömungsgeschwindigkeit an den Zuluftöffnungen ergibt sich aus

$$\Delta p_{zu} = \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \Delta p_{ab}$$

und

$$v_{zu} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{zu}}{\rho_0}}$$

$$\text{zu } v_{zu} = 2,138 \text{ m/s}$$

Beispiel 3:

Bedingungen wie 1. Beispiel, jedoch für eine Aufstiegshöhe von 12 m.

Die Flammenhöhe bleibt wie für das 1. Beispiel bei $h_{fl} = 5,877$ m

Es berechnet sich der Plumemassenstrom unter der Bedingung, dass die

•Doppelte Flammenhöhe < Aufstiegshöhe

➤ Aus dem Plume nach Zukoski

zu $m_{pl} = 115,75$ kg/s

Die Berechnung der gesuchten Ergebnisse erfolgt in gleicher Weise wie bei den Beispielen 1 und 2. Die Erhöhung der Rauchgastemperatur berechnet sich danach zu

$$T_g - T_0 = 39,87 \text{ K}$$

Die Druckdifferenz an den RA-Geräten berechnet sich zu

$$\Delta p_{ab} = 1,017 \text{ Pa}$$

Die erforderliche RA- und Zuluftflächen berechnen sich zu

$$A_{ab} = 78,80 \text{ m}^2 \text{ (aerodynamisch wirksame Fläche)}$$

und zu

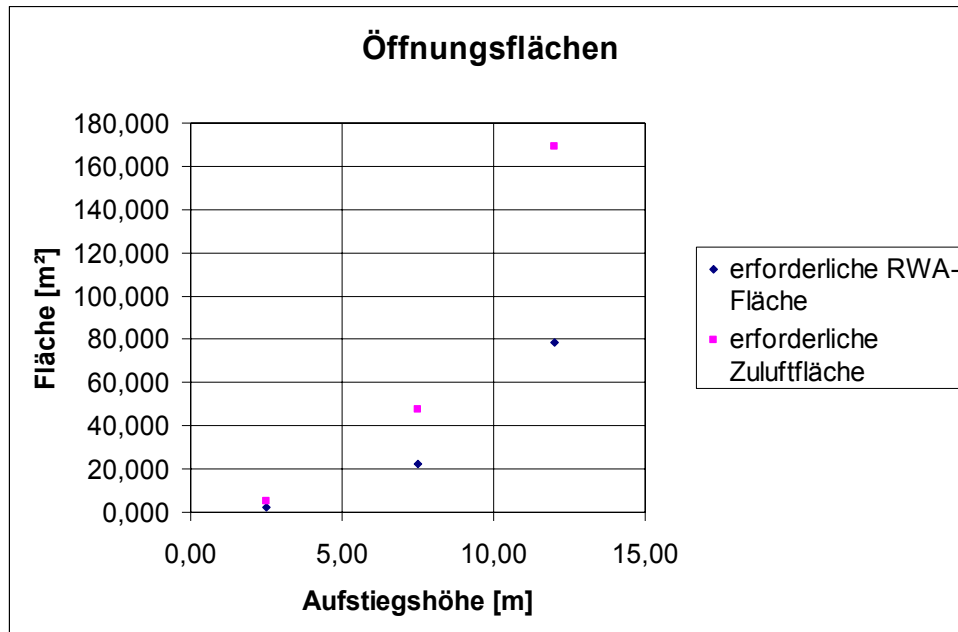
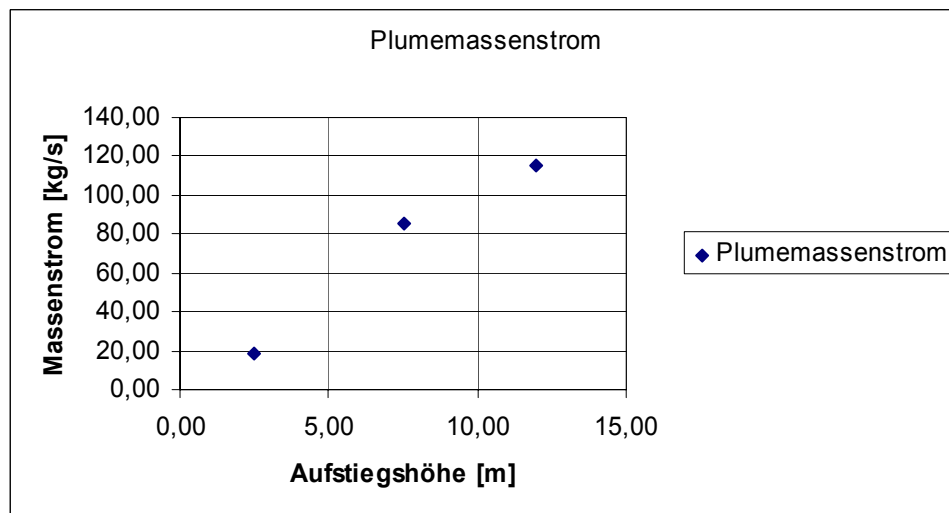
$$A_{zu} = 1,5 \cdot 78,80 / 0,7 = 168,86 \text{ m}^2$$

Für eine Dicke der raucharmen Schicht von 12 m für eine 13 m hohe Halle kann der Wert für die erforderliche RA-Fläche auch aus Tabelle 2 der DIN 18232-2 in der Bemessungsgruppe 4 zu $78,80 \text{ m}^2$ abgelesen werden.

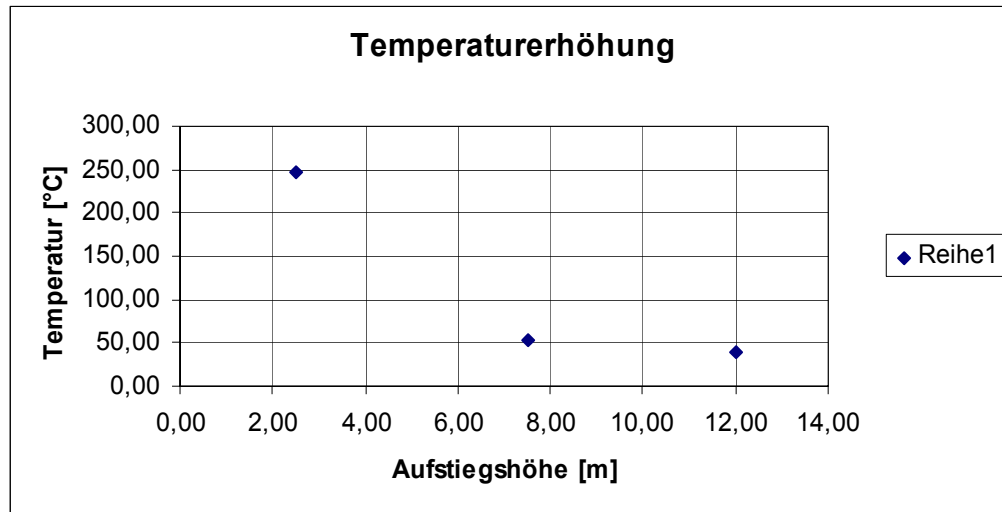
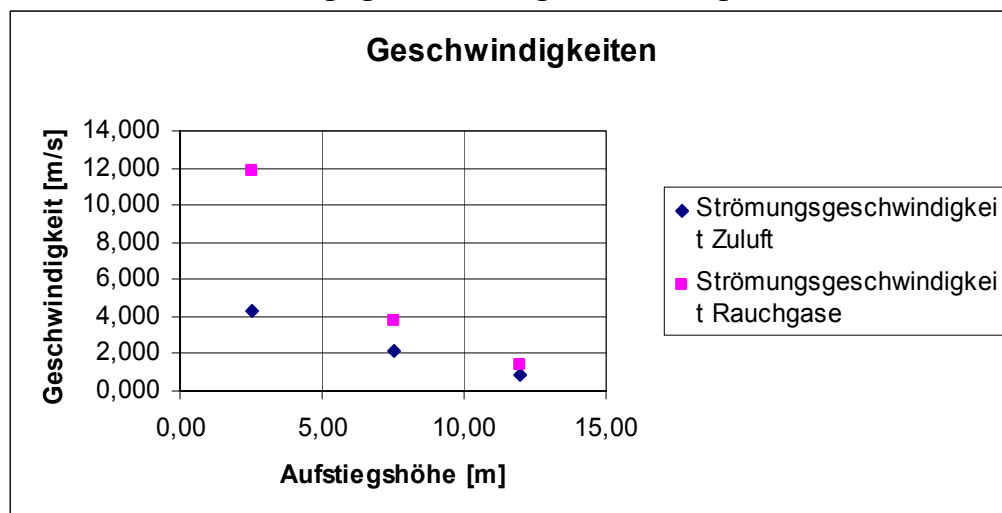
Die Strömungsgeschwindigkeit an den Zuluftöffnungen ergibt sich zu

$$v_{zu} = 0,813 \text{ m/s}$$

Im Vergleich der drei Beispiele mit den Aufstiegshöhen von 2,5 sowie 5,5 und 12 m für die $1\,500 \text{ m}^2$ große Halle ergeben sich diese Ergebnisse, die in den folgenden Diagrammen zusammengestellt sind.

Bild 3-6: Öffnungsflächen für RA-Geräte und Zuluft für 1500 m² Halle**Bild 3-7: Plumemassenstrom bei verschiedenen Aufstiegshöhen für BMG 4**

In Abhängigkeit von der gewählten Aufstiegshöhe der Rauchgase in der 13 m hohen Halle werden unterschiedliche RA-Öffnungsflächen zwischen 2,5 und 79 m² erforderlich. Bei der geringsten Aufstiegshöhe errechnet sich der geringste Plumemassenstrom nach Thomas/ Hinkley von ca. 19 kg/s. Bei der größten Aufstiegshöhe bei einer Dicke der Rauchgasschicht von 1 m wird die Plumeformel nach Zukoski verwendet. Sie liefert den größten Plumemassenstrom von 116 kg/s.

Bild 3-8: Temperaturerhöhung bei verschiedenen Aufstiegshöhen**Bild 3-9: Strömungsgeschwindigkeit Rauchgase und Zuluft**

Die berechneten Erhöhungen der Rauchgastemperaturen sind bei der Aufstiegshöhe von 2,5 m mit ca. 250 K am größten und bei der Aufstiegshöhe von 12 m mit knapp 40 K am geringsten. Die Strömungsgeschwindigkeiten erreichen bei der Aufstiegshöhe von 2,5 m Werte von mehr als 4 m/s. Die Nähe der Oberkante der Zuluftöffnungen zur Schichtgrenze ist in diesem Fall zu beachten. Bei der großen Geschwindigkeit kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Einmischung von Rauchgasen in die untere Schicht im Bereich der Zuströmung stattfinden kann. Bei der großen Aufstiegshöhe von 12 m besteht diese Gefahr nicht, weil die Zuluftöffnungen in der Nähe des Fußbodens einen großen Abstand zur Schichtgrenze haben und außerdem Geschwindigkeiten auftreten, die mit weniger als 1 m/s sehr gering sind.

Beispiel 4 (größere Halle, Erleichterung A):

Es ist die erforderliche Öffnungsfläche zu ermitteln für eine Halle mit

—A = 2 600 m²

—h = 9 m

—d = 2,5 m, 4 m, 8 m (angestrebte Dicke der raucharmen Schicht)

Für das Brandszenarium gelten folgende Bedingungen für die Festlegung des Brand-szenariums:

- Brandausbreitung mittel
- Zeit bis zur Einleitung von Löschmaßnahmen 10 min
- Brandmeldeanlage
- BMG 3 , 6 MW, 20 m² mit D = 5,05 m

Berechnung

Wenn die Halle nach dem Näherungsverfahren (analog zu den Beispielen 1 bis 3) berechnet werden soll, müssen zwei Rauchabschnitte gebildet werden. Dabei müssen nach einer Berechnung wie bei den Beispielen 1 bis 3 Rauchschürzen mit folgenden Höhen und RA-Flächen sowie Zuluftflächen installiert werden:

geplante Dicke der raucharmen Schicht [m]	Höhe der Rauchschürzen [m]	RA-Flächen gesamt aerodynamisch [m ²]	Zuluftflächen [m ²]
2,5	7 (d<4 m)	4,52 (2·2,3)	4,84
4	5,5 (d<4 m)	12,33 (2·6,2)	13,21
8	1	71,38 (2·35,7))	76,84

Bei den geplanten Dicken der raucharmen Schicht bzw. bei den dafür anzusetzenden Aufstiegshöhen von 2,5 und 4 m ist zu beachten, dass dafür die Schürzen um mindestens 0,5 m in die raucharme Schicht hinein ragen müssen. Die Gesamthöhe aus Aufstiegshöhe und Schürzenhöhe ist dann um 0,5 m größer als die Hallenhöhe. Für die RA-Flächen sind in Klammer die aus Tabelle 2 der Norm abgelesenen Werte angegeben.

Die Berechnung nach der Erleichterung A ist nur möglich, wenn die Halle mindestens 9 m hoch ist (und durch mindestens 1 m hohe Rauchschürzen in Rauchabschnitte unterteilt ist). Diese Voraussetzungen sind erfüllt. Sie kann als ein Rauchabschnitt ausgebildet werden. Dabei werden die berechneten Flächen für einen Rauchabschnitt mit 1 600 m² erhöht um die Fläche:

$$\Delta A_w = \frac{2600 - 1600}{100} \cdot 0,1 \cdot A_{w,1600}$$

Bei einer Fläche von 2600 m² ergibt sich für die gewählten Aufstiegshöhen damit die gleiche Fläche wie in der Tabelle aufgeführt. Zusätzliche Rauchschürzen sind nicht erforderlich.

Es ist vorgesehen, die Erleichterung A auch für Räume mit einer Höhe von mindestens 7 m zuzulassen. Dazu ist eine Änderung in der bestehenden DIN 18232-2 geplant. Diese wurde vom Arbeitskreis beschlossen und muss noch im Ausschuss bestätigt werden.

Beispiel 5 (größere Halle, Erleichterungen A und B):

Hallenfläche 6500 m²

Sonst gelten die gleichen Voraussetzungen wie bei Beispiel 4.

Die Erleichterung kann auch angewendet werden, wenn die Rauchabschnitte auf bis zu 2 600 m² vergrößert werden und sonst Rauchschürzen mit den in der Tabelle im Beispiel 4 angegebenen Höhen installiert werden. Bei Rauchabschnittsgrößen von maximal 1 600 m² (Normalfall) müssen mindestens 5 und bei Rauchabschnittsflächen von maximal 2 600 m² mindestens 3 Rauchabschnitte gebildet werden. Die über 1 600 m² vergrößerten Rauchabschnitte müssen außerdem durch mindestens 1 m hohe Rauchschürzen unterteilt werden.

Bei Wahl der folgenden Rauchabschnittsgrößen ergeben sich folgende Ergebnisse:

Aufstiegshöhe [m]	Anzahl / Fläche der Rauchabschnitte	RA-Flächen aerodynamisch [m ²]	Zuluftflächen [m ²]
2,5	3/2167	10,85	9,94
4	3/2167	29,59	27,12
8	3/2167	171,31	157,03
2,5	4/1625	9,94	9,94
4	4/1625	27,12	27,12
8	4/1625	157,03	157,03
2,5	5/1300	11,30	9,94
4	5/1300	30,82	27,12
8	5/1300	178,44	157,03

Die geringste RA-Fläche ergibt sich dabei für 4 Rauchabschnitte. Die Zuluftflächen bleiben unverändert gegenüber der Fläche für einen Rauchabschnitt.

Die Anwendung der Erleichterung B ist unter den gleichen Voraussetzungen wie bei Erleichterung A ebenfalls möglich. Dabei werden neben den mindestens 1 m hohen Rauchschürzen ($A < 1\,600\text{ m}^2$) keine weiteren Rauchschürzen erforderlich. Mit diesen Rauchschürzen entstehen mindestens 5 Rauchabschnitte. In jedem Rauchabschnitt muss eine RA-Fläche von mindestens 50 m^2 angeordnet werden. Für die gesamte Halle ergibt sich dann eine Fläche von

$$A_w = 250\text{ m}^2$$

Die vorhandenen Rauchschürzen mit der Höhe von 1 m werden unterströmt, d. h. es findet eine Rauchausbreitung in mindestens einen weiteren Rauchabschnitt statt. Die RA- und Zuluftflächen müssen daher mindestens so groß sein wie für einen Rauchabschnitt bei der vorhandenen Schürzenhöhe von 1 m. Dafür ergeben sich folgende Flächen von

$$A_{w,\min} = 73,70\text{ m}^2 \text{ (aerodynamisch)} \quad \text{für die RA-Fläche und}$$

$$A_{zu,\min} = 157,92\text{ m}^2 \text{ (geometrisch) für die Zuluftflächen}$$

Bei dieser Auslegung kann die Dicke der raucharmen Schicht nicht konstruktiv gewählt werden. Sie ergibt sich zu einer Höhe, die nur wenig unterhalb der vorhandenen Schürzenhöhe liegt.

3.6.2 Berechnung der Zuluftflächen bei vorgegebenen NRA-Flächen

Berechnung der Druckdifferenz an den NRA-Geräten aus Gl.(3-11)

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_w \sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}} \quad \text{bzw.} \quad A_w = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}}$$

zu

$$\Delta p_{ab} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_w} \right)^2}{2\rho_0 \frac{T_0}{T_g}} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_w} \right)^2}{2\rho_g}$$

Dabei darf die Druckdifferenz nicht größer werden als die hydrostatische Druckdifferenz der Rauchgasschicht. Es muss daher gelten:

$$\Delta p_{ab} \leq (h - d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g$$

Wenn diese Bedingung nicht eingehalten wird, muss die NRA-Fläche vergrößert werden, damit die Berechnung weitergehen und eine physikalisch sinnvolle Lösung gefunden werden kann.

Berechnung der Druckdifferenz an den Zuluftöffnungen aus Gl.(3-1) zu:

$$\Delta p_{zu} = (h - z) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g - \Delta p_{ab}$$

Berechnung der Zuluftfläche aus Gl.(3-3) und Gl.(3-5)

$$\dot{m}_{zu} = \dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{zu} \sqrt{2 \Delta p_{zu} \rho_0}$$

zu

$$A_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{zu} \rho_0}}$$

Beispiel:

Es ist die erforderliche Öffnungsfläche zu ermitteln für eine Halle mit

–A = 1500 m²

–h = 12 m

–d = 5,5 m (angestrebte Dicke der raucharmen Schicht)

–A_w = 15 m² (geplante Fläche der RA-Geräte, 1 % der Grundfläche)

Für das Brandszenarium gelten folgende Bedingungen:

- Brandausbreitung mittel
 - Zeit bis zur Einleitung von Löschmaßnahmen 10 min
 - Rauchmeldergesteuerte Auslösung der Geräte
- BMG 4 , 12 MW, 40 m² mit D = 7,14 m

Berechnung

Die Flammenhöhe wird berechnet aus

$$h_{fl} / D = 42 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61} \quad \text{Gl.(3-25)}$$

zu h_{fl} = 5,877 m

Mit den Eingangsgrößen

–D = 7,14 m

–Heizwert 15 000 kJ/kg

–Dichte Luft 1,2045 kg/m³

–g = 9,81 m/s²

–Strahlungsverlust = 0,2

–spezifische Brandleistung 300 kW/m²

berechnet sich der Plumemassenstrom unter der Bedingung, dass die

- Flammenhöhe (5,877 m) > Aufstiegshöhe (5,5 m)

➤ Aus dem Plume nach Thomas und Hinkley mit $z \leq 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$

$$\dot{m}_{pl} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot U \quad \text{Gl.(3-34)}$$

mit:

$$d = 5,5 \text{ m}$$

$$U = D \cdot \pi = 7,14 \cdot \pi = 22,42 \text{ m}$$

$$\text{zu } \dot{m}_{pl} = 60,73 \text{ kg/s}$$

Die Erhöhung der Rauchgastemperatur berechnet sich mit den Bedingungen

- $T_0 = 293 \text{ K}$

- Strahlungsverlust 20 %

- Verlust an Bauteile 40 %

- $c_{p,g} = 1,04 \text{ kWs/kgK}$

aus

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}} \quad \text{Gl.(3-15)}$$

$$\text{zu } T_g - T_0 = 76 \text{ K}$$

Die Druckdifferenz an den RA-Geräten berechnet sich aus

$$\Delta p_{ab} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_w} \right)^2}{2 \rho_0 \frac{T_0}{T_g}} = \frac{\left(\frac{60,73}{15} \right)^2}{2 \cdot 1,2045 \cdot \frac{293}{293 + 76}} = 8,569 \text{ Pa}$$

$$-h = 12 \text{ m}$$

$$-A_w = 15 \text{ m}^2$$

$$\text{zu } \Delta p_{ab} = 8,569 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{ab} = 8,569 \text{ Pa} \leq (h - d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g} \right) \rho_0 g = 5,5 \left(\frac{76}{76 + 293} \right) 1,2045 \cdot 9,81 = 15,819 \text{ Pa}$$

Damit wird die Druckdifferenz an den Zuluftöffnungen zu

$$\Delta p_{zu} = 15,819 - 8,569 = 7,250 \text{ Pa}$$

Daraus errechnet sich die erforderliche Zuluftfläche zu

$$A_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{zu} \rho_0}} = \frac{60,73}{\sqrt{2 \cdot 7,250 \cdot 1,2045}} = 14,53 \text{ m}^2$$

$$A_{zu}/A_{ab} = f_{zu/ab} = 14,53/15 = 0,969$$

$-c_v = 0,7$ für normale Öffnungen

$$\text{zu } A_{zu} = 14,53/0,7 = 20,76 \text{ m}^2$$

Die Strömungsgeschwindigkeit an den Zuluftöffnungen ergibt sich zu

$$v_{zu} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{zu}}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7,25}{1,2045}} = 3,47 \text{ m/s}$$

$$\text{zu } v_{zu} = 3,47 \text{ m/s}$$

3.6.3 Berechnung der NRA-Flächen bei vorgegebenen Zuluftflächen

Berechnung der Druckdifferenz an den Zuluftflächen aus Gl.(3-3) und Gl.(3-5)

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{zu} \sqrt{2\Delta p_{zu} \rho_0}$$

zu

$$\Delta p_{zu} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_{zu}} \right)^2}{2\rho_0}$$

Dabei darf die Druckdifferenz nicht größer werden als die hydrostatische Druckdifferenz der Rauchgasschicht. Es muss daher gelten:

$$\Delta p_{zu} \leq (h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g$$

Wenn diese Bedingung nicht eingehalten wird, muss die Zuluftfläche vergrößert werden, damit die Berechnung weitergehen kann.

Berechnung der Druckdifferenz an den NRA-Öffnungen aus Gl.(3-1) zu:

$$\Delta p_{ab} = (h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g - \Delta p_{zu}$$

Berechnung der NRA-Öffnungsfläche aus Gl.(3-7) und Gl.(3-3)

$$\dot{m}_{ab} = \dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{ab} \sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_g}$$

zu

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_g}}$$

Beispiel:

Es ist die erforderliche Öffnungsfläche zu ermitteln für eine Halle mit

–A = 1500 m²

–h = 12 m

–d = 5,5 m (angestrebte Dicke der raucharmen Schicht)

–A_{zu} = 15 m² (geplante Fläche von Toren, Torhöhe 4 m)

Für das Brandszenarium gelten folgende Bedingungen:

- Brandausbreitung mittel
 - Zeit bis zur Einleitung von Löschmaßnahmen 10 min
 - Rauchmeldergesteuerte Auslösung der Geräte
- BMG 4 , 12 MW, 40 m² mit D = 7,14 m

Berechnung

Die Flammenhöhe wird berechnet aus

$$h_{fl} / D = 42 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61} \quad \text{Gl.(3-25)}$$

zu $h_{fl} = 5,877 \text{ m}$

Mit den Eingangsgrößen

–D = 7,14 m

–Heizwert 15 000 kJ/kg

–Dichte Luft 1,2045 kg/m³

–g = 9,81 m/s²

–Strahlungsverlust = 0,2

–spezifische Brandleistung 300 kW/m²

berechnet sich der Plumemassenstrom unter der Bedingung, dass die

- Flammenhöhe (5,877 m) > Aufstiegshöhe (5,5 m) und Aufstiegshöhe kleiner als dreifache Seitenlänge der Brandfläche

➤Aus dem Plume nach Thomas und Hinkley

$$\dot{m}_{pl} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2 \sqrt{\pi A_{Br}} \quad \text{Gl.(3-34)}$$

mit:

d = 5,5 m

U = D · π = 7,14 · π = 22,42 m

zu $\dot{m}_{pl} = 60,73 \text{ kg/s}$

Die Erhöhung der Rauchgastemperatur berechnet sich mit den Bedingungen

•T₀ = 293 K

•Strahlungsverlust 20 %

•Verlust an Bauteile 40 %

•c_{p,g} = 1,04 kWs/kgK

aus

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}} \quad \text{Gl.(3-15)}$$

$$\text{zu } T_g - T_0 = 76 \text{ K}$$

Die wirksame Öffnungsfläche der Tore ergibt sich mit $c_v = 0,7$ zu

$$A_{zu} = 0,7 \cdot 21,5 = 15,0 \text{ m}^2$$

Die Druckdifferenz an den Toren berechnet sich aus

$$\Delta p_{zu} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_{zu}} \right)^2}{2 \rho_0} = \frac{\left(\frac{60,73}{15} \right)^2}{2 \cdot 1,2045} = 6,804 \text{ Pa}$$

$$-h = 12 \text{ m}$$

$$-A_{zu} = 15 \text{ m}^2$$

$$\text{zu } \Delta p_{zu} = 6,804 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{zu} = 6,804 \text{ Pa} \leq (h - d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g} \right) \rho_0 g = 5,5 \left(\frac{76}{76 + 293} \right) 1,2045 \cdot 9,81 = 15,819 \text{ Pa}$$

Damit wird die Druckdifferenz an den RA-Öffnungen zu

$$\Delta p_{ab} = 15,819 - 6,804 = 9,015 \text{ Pa}$$

Daraus errechnet sich die erforderliche RA-Fläche (aerodynamisch) zu

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_g}}$$

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{60,73}{\sqrt{2 \cdot 9,015 \cdot 1,2045 \cdot \frac{293}{293 + 76}}} = 14,63 \text{ m}^2$$

$$A_{zu}/A_{ab} = f_{zu/ab} = 15 / 14,63 = 1,026$$

Die Strömungsgeschwindigkeit an den Zuluftöffnungen ergibt sich zu

$$v_{zu} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{zu}}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,804}{1,2045}} = 3,361 \text{ m/s}$$

$$zu v_{zu} = 3,361 \text{ m/s}$$

3.6.4 Berechnung der NRA-Flächen bei vorgegebener Zuluftgeschwindigkeit

Berechnung der Zuluftflächen aus Gl.(3-3) und Gl.(3-5)

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{zu} \cdot v_{zu} \rho_0$$

zu

$$A_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{v_{zu} \rho_0}$$

Berechnung der Druckdifferenz an den Zuluftflächen aus Gl.(3-4) zu

$$\Delta p_{zu} = 0,5 \cdot \rho_0 \cdot v_{zu}^2$$

Dabei darf die Druckdifferenz nicht größer werden als die hydrostatische Druckdifferenz der Rauchgasschicht. Es muss daher gelten:

$$\Delta p_{zu} \leq (h - d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g$$

Wenn diese Bedingung nicht eingehalten wird, muss die Zuluftgeschwindigkeit reduziert werden, damit die Berechnung weitergehen kann. Dies kann insbesondere bei geringen Rauchgastemperaturen und geringen Dicken der Rauchsicht eintreten.

Berechnung der Druckdifferenz an den NRA-Öffnungen aus Gl.(3-1) zu:

$$\Delta p_{ab} = (h - d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g - \Delta p_{zu}$$

Berechnung der NRA-Öffnungsfläche aus Gl.(3-7) und Gl.(3-5)

$$\dot{m}_{ab} = \dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{ab} \sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_g}$$

zu

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_g}}$$

Beispiel:

Es ist die erforderliche Öffnungsfläche zu ermitteln für eine Halle mit

–A = 1500 m²

–h = 12 m

–d = 5,5 m (angestrebte Dicke der raucharmen Schicht)

–v_{zu} = 1 m/s

Für das Brandszenarium gelten folgende Bedingungen:

- Brandausbreitung mittel
- Zeit bis zur Einleitung von Löschmaßnahmen 10 min
- Rauchmeldergesteuerte Auslösung der Geräte
- BMG 4 , 12 MW, 40 m² mit D = 7,14 m

Berechnung

Die Flammenhöhe wird berechnet aus

$$h_{fl} / D = 42 \left(\frac{\dot{m}''}{\rho_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61} \quad \text{Gl.(3-25)}$$

zu h_{fl} = 5,877 m

Mit den Eingangsgrößen

–D = 7,14 m

–Heizwert 15 000 kJ/kg

–Dichte Luft 1,2045 kg/m³

–g = 9,81 m/s²

–Strahlungsverlust = 0,2

–spezifische Brandleistung 300 kW/m²

berechnet sich der Plumemassenstrom unter der Bedingung, dass die

- Flammenhöhe (5,877 m) > Aufstiegshöhe (5,5 m)

➤Aus dem Plume nach Thomas und Hinkley mit $d < 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot U \quad \text{Gl.(3-34)}$$

mit:

d = 5,5 m

U = D · π = 7,14 · π = 22,42 m

zu m_{pl} = 60,73 kg/s

Die Erhöhung der Rauchgastemperatur berechnet sich mit den Bedingungen

•T₀ = 293 K

•Strahlungsverlust 20 %

•Verlust an Bauteile 40 %

•c_{p,g} = 1,04 kWs/kgK

aus

$$(T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}} \quad \text{Gl.(3-15)}$$

$$\text{zu } T_g - T_0 = 76 \text{ K}$$

Die (aerodynamisch wirksame) Öffnungsfläche errechnet sich aus

$$A_{zu} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{v_{zu} \rho_0} = \frac{60,73}{1,0 \cdot 1,2045} = 50,419 \text{ m}^2$$

Die geometrische Öffnungsfläche der Tore ergibt sich mit $c_v = 0,7$ zu

$$A_{zu} = 50,419 / 0,7 = 72,03 \text{ m}^2$$

Die Druckdifferenz an den Toren berechnet sich aus

$$\Delta p_{zu} = 0,5 \cdot \rho_0 \cdot v_{zu}^2 = 0,5 \cdot 1,2045 \cdot 1,0^2 = 0,6022 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{zu} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_{zu}} \right)^2}{2 \rho_0} = \frac{\left(\frac{60,73}{50,419} \right)^2}{2 \cdot 1,2045} = 0,6022 \text{ Pa}$$

$$-h = 12 \text{ m}$$

$$-A_{zu} = 50,419 \text{ m}^2$$

$$\text{zu } \Delta p_{zu} = 0,6022 \text{ Pa}$$

$$\Delta p_{zu} = 0,6022 \text{ Pa} \leq (h - d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g} \right) \rho_0 g = 5,5 \left(\frac{76}{76 + 293} \right) 1,2045 \cdot 9,81 = 15,819 \text{ Pa}$$

Damit wird die Druckdifferenz an den RA-Öffnungen zu

$$\Delta p_{ab} = 15,819 - 0,6022 = 15,217 \text{ Pa}$$

Daraus errechnet sich die erforderliche RA-Fläche (aerodynamisch) zu

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{60,73}{\sqrt{2 \cdot 15,217 \cdot 1,2045 \cdot \frac{293}{293 + 76}}} = 11,26 \text{ m}^2$$

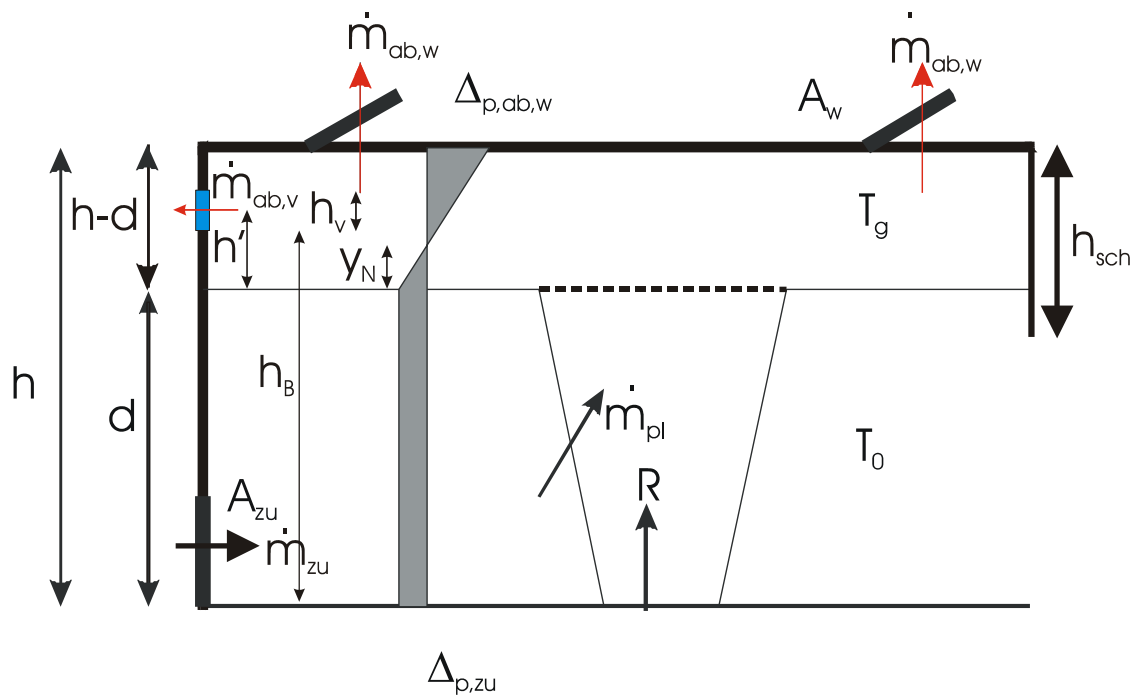
$$A_{zu}/A_{ab} = f_{zu/ab} = 50,419 / 11,26 = 4,48$$

Für eine vorgegebene Strömungsgeschwindigkeit an den Zuluftöffnungen ergibt sich damit eine Öffnungsfläche der Zuluftöffnungen, die fast 5mal so groß sind wie die erforderlichen RA-Öffnungen.

3.7 Grundlagen der Berechnung für RA in Außenwänden nach Zonenmodell

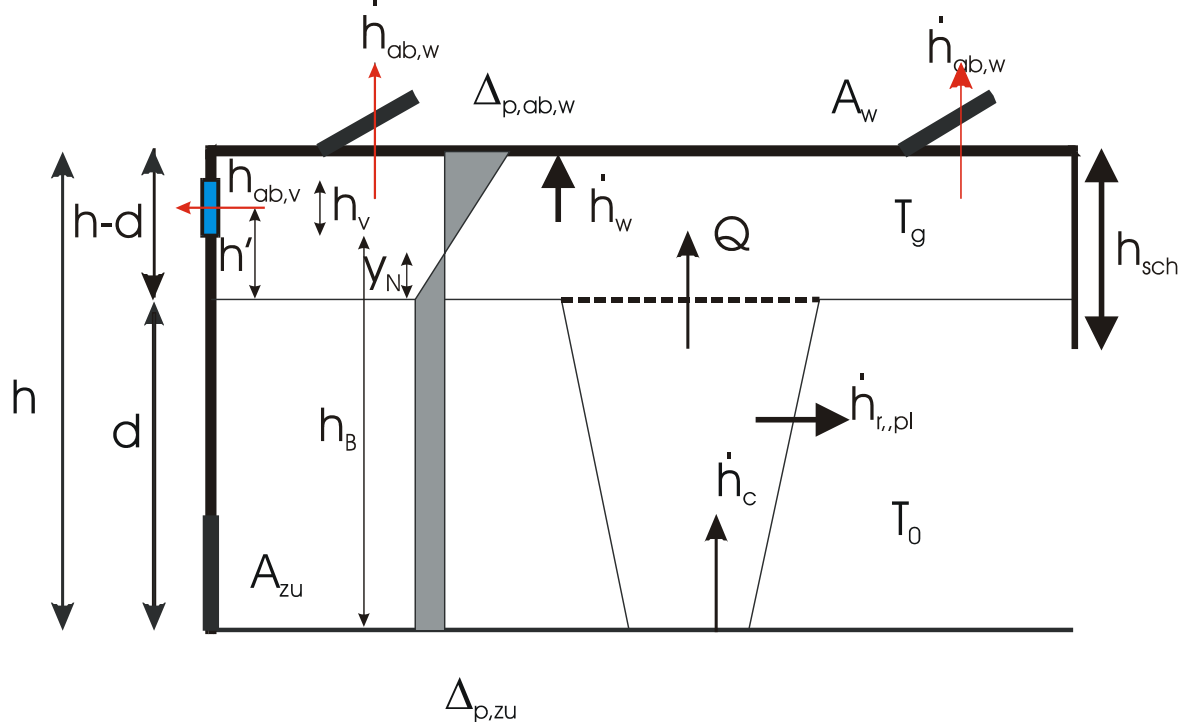
Nach dem oben erläuterten Zonenmodell können auch die notwendigen Öffnungen von NRA-Flächen in Außenwänden von Räumen berechnet werden, wenn bestimmte Voraussetzungen gemacht werden. Die Massenströme an den vertikalen Öffnungen sind in Bild 3-10 und die Energieströme in Bild 3-11 dargestellt. Danach ergeben sich für eine Lage der Öffnungen oberhalb der neutralen Ebene (wird in DIN 18232-2 und auch bei den folgenden Ausführungen immer vorausgesetzt) die folgenden zusätzlichen Größen:

- h_v = Höhe der vertikalen Öffnungen in m
- b_v = aerodynamisch wirksame Breite der vertikalen Öffnungen in m (nicht dargestellt)
- h' = Abstand der mittleren Höhe der NRA von der Schichtgrenze in m
- h_B = Brüstungshöhe der NRA, Abstand vom Fußboden in m
- y_N = Abstand der neutralen Ebene von der Schichtgrenze in m



Massenströme an einem Rauchabschnitt

Bild 3-10: Massenströme bei vertikalen Öffnungen in Wänden



Energieströme an einem Rauchabschnitt

Bild 3-11: Energieströme bei vertikalen Öffnungen in Wänden

Neben den genannten geometrischen Bezeichnungen gelten noch die folgenden Abkürzungen:

$\dot{m}_{ab,v}$ über NRA-Öffnungen in den Wänden abgeführter Rauchgasmassenstrom in kg/s

$\dot{h}_{ab,v}$ Wärmeabgabe über ausströmende Rauchgase aus Öffnungen in den Wänden in kW

Zwischen der Brüstungshöhe h_B und den weiteren genannten geometrischen Größen für die Festlegung der Höhenlage der NRA-Öffnungen in den Wänden gilt

$$h_B = d + h' - 0,5 \cdot h_v \quad \text{Gl.(3.7-1)}$$

Die aerodynamisch wirksame Breite der Öffnungen ergibt sich aus der aerodynamisch wirksamen Fläche A_v [m²] der Öffnungen und der Höhe der Öffnungen zu

$$b_v = A_v / h_v \quad \text{Gl.(3.7-2)}$$

Die Druckdifferenz ist bei den vertikalen Öffnungen im Gegensatz zu den Öffnungen im Dach nicht mehr über die gesamte Öffnungsfläche konstant. Die Druckdifferenz nimmt vielmehr über die Höhe hinweg zu. Oberhalb der Schichtgrenze ergibt sich die Druckdifferenz zwischen dem Raum und der Umgebung in der Höhe y über der Schichtgrenze zu

$$\Delta p_{(y)} = g \cdot (\rho_0 - \rho_g) \cdot y - \Delta p_{zu} = \rho_0 \cdot g \cdot y \cdot (1 - T_0/T_g) - \Delta p_{zu} \quad \text{Gl.(3.7-3)}$$

Dabei ist y die Höhe oberhalb der Schichtgrenze in m.

Die Höhe der neutralen Ebene y_N berechnet sich aus der Bedingung $\Delta p(y_N)=0$ zu:

$$y_N = \frac{\Delta p_{zu}}{g \rho_0 \frac{T_g - T_0}{T_g}}$$

Mit

$$\Delta p_{zu} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_{zu}} \right)^2}{2 \rho_0}$$

und

$$f_{zu/ab} = A_{zu} / A_{ab}$$

wird daraus

$$y_N = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{f_{zu/ab} \cdot A_{ab} \cdot \rho_0} \right)^2}{2g \frac{T_g - T_0}{T_g}} \quad \text{Gl.(3.7-4)}$$

Der Massenstrom aus der vertikalen Öffnung innerhalb der Rauchgasschicht ergibt sich aus

$$\dot{m}_{ab,v} = b \cdot \rho_g \cdot \int_{h_B - d - y_N}^{h_B + h_v - d - y_N} v_g \, dy \quad \text{Gl.(3.7-5)}$$

Mit Gl.(6) und Gl.(3.7-3) wird daraus

$$\dot{m}_{ab,v} = b \cdot \rho_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0}} \cdot \int_{h_B - d - y_N}^{h_B + h_v - d - y_N} \sqrt{y} \, dy \quad \text{Gl.(3.7-6)}$$

und weiter

$$\dot{m}_{ab,v} = \frac{2}{3} b \cdot \rho_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0}} \cdot \left[(h_B + h_v - d - y_N)^{1,5} - (h_B - d - y_N)^{1,5} \right] \quad \text{Gl.(3.7-7)}$$

Wenn die Höhenlage der neutralen Ebene nicht bekannt ist, lassen sich alle Bemessungsaufgaben nur iterativ lösen. Wenn die Höhenlage bekannt ist, dann kann aus dieser Gleichung in Verbindung mit Gl.(3) die Breite und damit auch die aerodynamisch wirksame Fläche der Öffnung direkt berechnet werden. Es gilt dann:

$$b = \frac{3(\dot{m}_{pl} + \dot{R})}{2\rho_g \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0}} \cdot \left[(h_B + h_v - d - y_N)^{1,5} - (h_B - d - y_N)^{1,5} \right]} \quad \text{Gl.(3.7-8)}$$

Beispiel:

Im Entwurf der Norm wird ausgesagt, dass für eine Bemessung bei Windstille die erforderliche Öffnungsfläche der NRA-Öffnungen in den Wänden die gleiche sein soll wie die für die NRA-Bemessung im Dach erforderliche Fläche. Im veröffentlichten Entwurf war zusätzlich ein Korrekturfaktor angegeben, der wie folgt definiert war

$$A_v = A_w \cdot \left(\frac{h-d}{h'} \right)^{0,5} \quad \text{Gl.(3.7-9)}$$

Dieser Korrekturfaktor ist in der zur Diskussion stehenden Fassung nicht mehr enthalten. Die Gründe dafür sind nicht bekannt. Möglicherweise haben die Ergebnisse einer Strömungsuntersuchung dazu geführt, dass auf den Korrekturfaktor verzichtet werden kann. Im folgenden soll untersucht werden, wie die erforderliche Öffnungsfläche korrigiert werden muss, damit die Bemessung für die vertikalen Öffnungsflächen den Vorgaben der Bemessung entspricht.

Zur Überprüfung der Regelungen in der Norm ist daher für ein vorgegebenes Verhältnis der Zuluft- und NRA-Öffnungsflächen zunächst eine Bemessung der NRA-Flächen erforderlich, die im Dach anzuordnen sind. Daraus ermittelt sich die erforderliche Zuluftöffnungsfläche aus dem vorgegebenen Verhältnis. Mit dieser Zuluftöffnungsfläche liegt dann die Druckverteilung im Raum fest. Wenn die Zuluftöffnungsfläche oder die Strömungsgeschwindigkeit direkt gegeben sind, ist eine vorherige Bemessung der NRA im Dach nicht erforderlich. Der Massenstrom an einer horizontalen Öffnung im Dach ergibt sich aus der Höhenlage der neutralen Ebene (für die gleiche Druckverteilung) aus Gl.(3.7-3) und der Druckdifferenz an den NRA-Öffnungen im Dach mit

$$\Delta p_{ab} = \Delta p(y=h-d-y_N) = g \cdot (\rho_0 - \rho_g) \cdot (h-d-y_N) \quad \text{Gl.(3.7-10)}$$

zu

$$\dot{m}_{ab,w} = A_w \cdot \rho_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0} (h-d-y_N)}. \quad \text{Gl.(3.7-11)}$$

Damit die Massenströme aus den Öffnungen im Dach und aus den Öffnungen in den Wänden gleich groß werden, muss gelten

$$\frac{2}{3} b \cdot \left[(h_B + h_v - d - y_N)^{1,5} - (h_B - d - y_N)^{1,5} \right] = A_w \cdot \sqrt{(h-d-y_N)}. \quad \text{Gl.(3.7-12)}$$

bzw.

$$\frac{A_v}{A_w} = \frac{b \cdot h}{A_w} = \frac{1,5 h \sqrt{(h-d-y_N)}}{\left[(h_B + h_v - d - y_N)^{1,5} - (h_B - d - y_N)^{1,5} \right]} \quad \text{Gl.(3.7-13)}$$

Mit Gl.(3.7-11) ist das erforderliche Verhältnis der Öffnungsflächen in den Wänden zur erforderlichen Öffnungsfläche im Dach gefunden. In diesem Ausdruck ist neben den geometrischen Vorgaben bezüglich der Höhenlage der NRA-Öffnungen in den Wänden noch die Lage der neutralen Ebene unbekannt (nur, wenn das Verhältnis von Zuluft- zu NRA-Flächen im Dach vorgegeben wird). Die neutrale Ebene ist dann aus der NRA-Bemessung für die Öffnungen im Dach zu entnehmen.

Dass die Druckverteilung die gleiche sein muss, ist vorauszusetzen, weil an den Zuluftöffnungen keine Korrekturen vorgenommen wurden, d. h. die erforderliche Öffnungsfläche der vertikalen Öffnungen in den Wänden kann aus der aus der Bemessung der NRA-Öffnungen im Dach bekannten Zuluftöffnungsfläche (nur dann die gleiche, wenn auch die Druckdifferenz die gleiche ist) berechnet werden. Damit liegt die Druckverteilung im Raum fest.

Für Öffnungen in Wänden, die in der Nähe des Daches und somit der horizontalen NRA liegen sind die Abweichungen am geringsten. Mit zunehmender Entfernung vom Dach wird der Fehler größer. Der Fehler ist bei den kleinen Bemessungsgruppen ebenfalls grundsätzlich größer als bei den höheren Bemessungsgruppen. Der im informativen Anhang der Norm vorgeschlagene Korrekturfaktor gilt offenbar nur für Öffnungen in den Wänden, die eine Höhe von maximal 1 m haben und direkt in der Höhe des Daches bzw. der Decke liegen. Für vertikale Öffnungen, die weiter unten angeordnet sind, kann der Fehler mehr als 100 % betragen.

Beispiel:

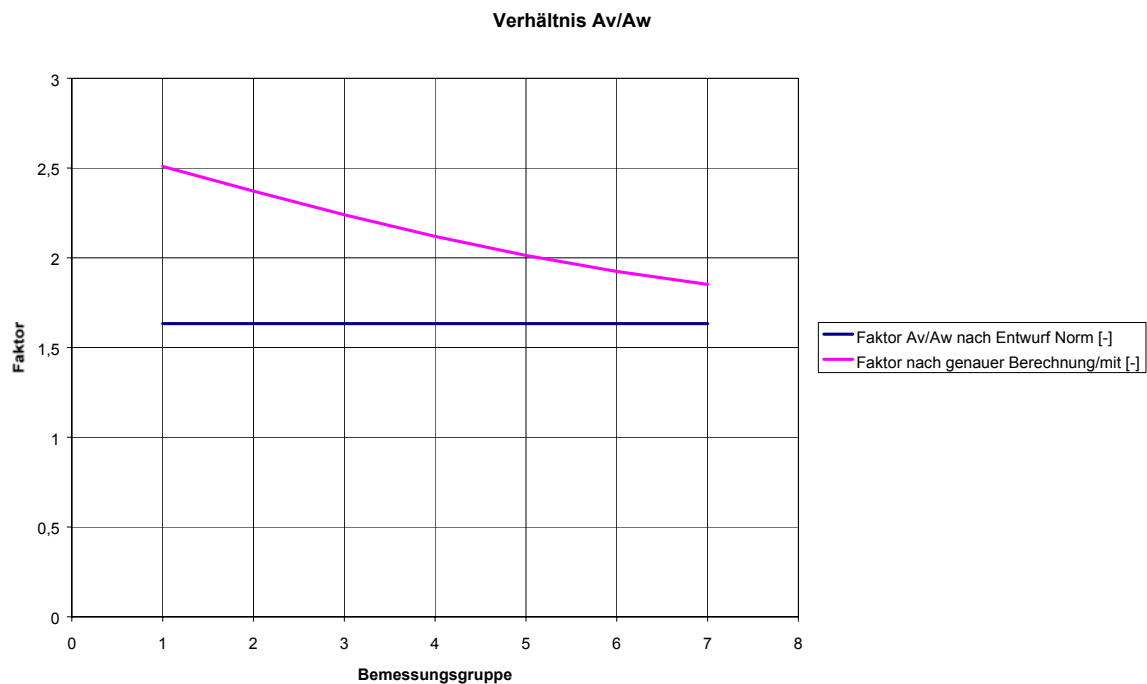


Bild 3-12: Vergleich zwischen vorgeschlagen Faktor im Normentwurf und dem ingenieurmäßig ermittelten Faktor bei einer Hallenhöhe 10 m, vertikale Öffnungsfläche 50 cm hoch zwischen 6,0 und 6,5 m

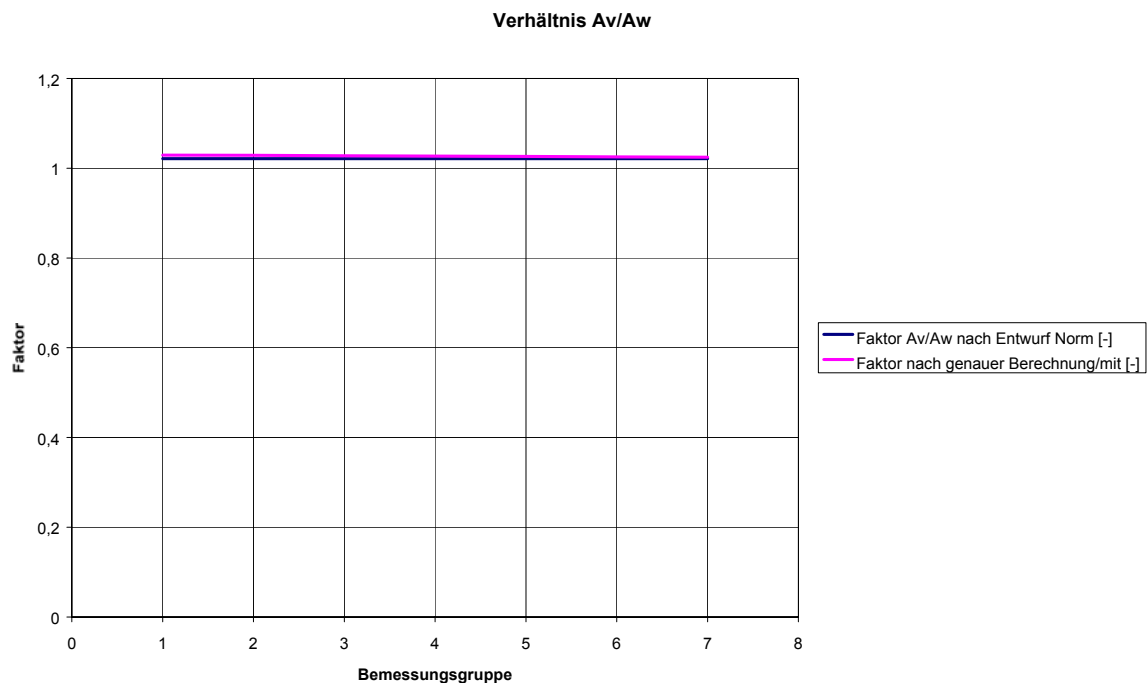
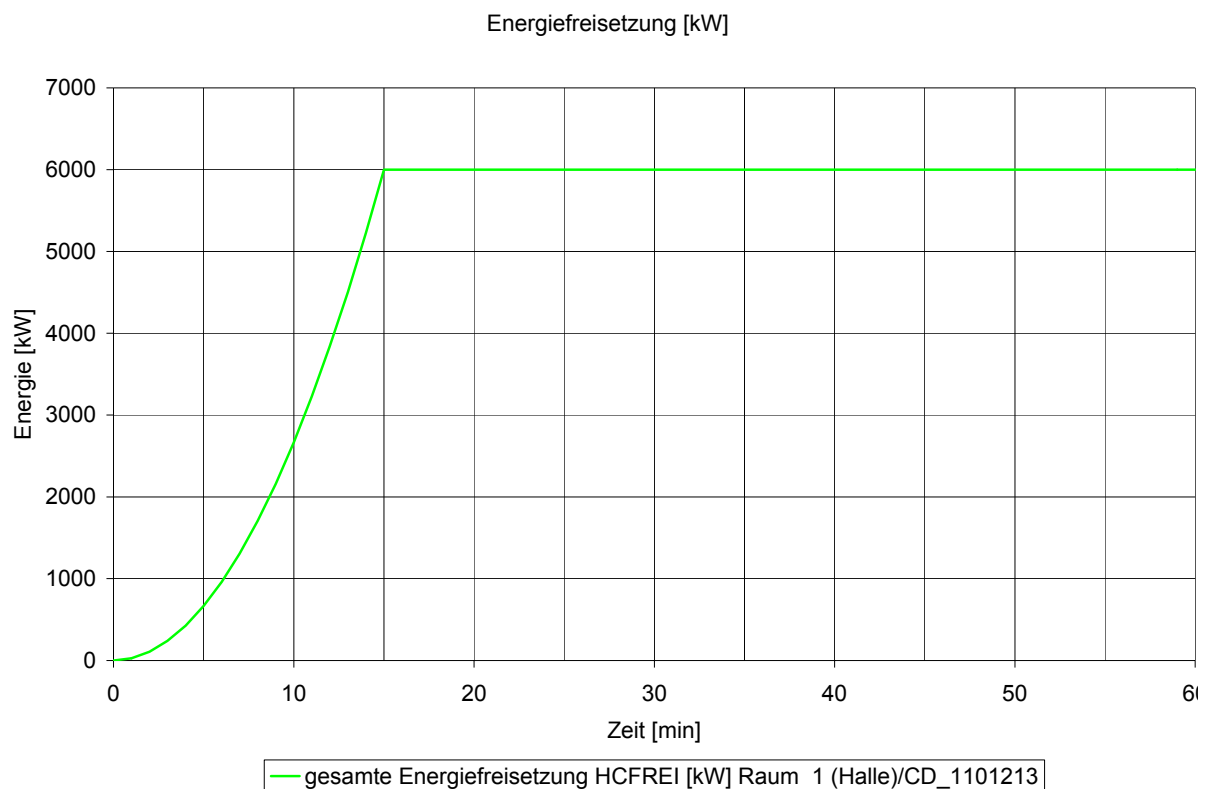


Bild 3-13: Vergleich zwischen vorgeschlagen Faktor im Normentwurf und dem ingenieurmäßig ermittelten Faktor bei einer Hallenhöhe 10 m, vertikale Öffnungsfläche 50 cm hoch zwischen 9,5 und 10 m

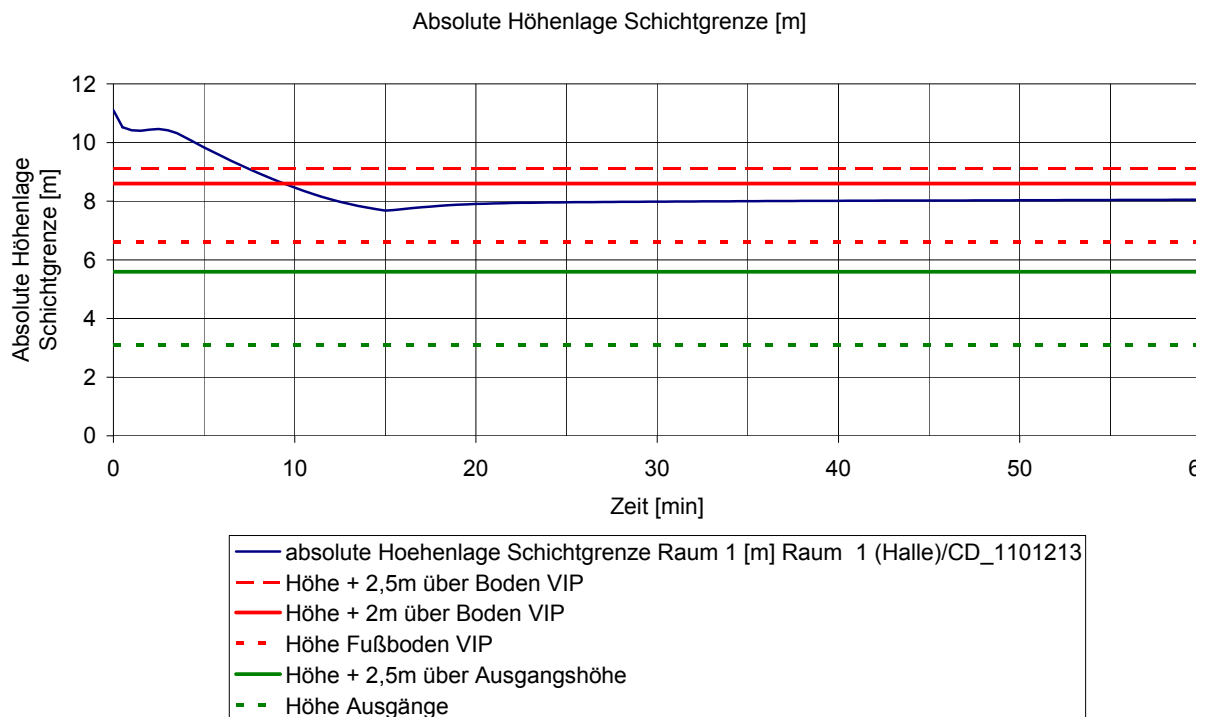
4 Ergebnisse

4.1 Vergleich Berechnung nach DIN 18232-2 und Zonenmodellberechnung MRFC

Bei der folgenden Bemessung einer 1 600 m² großen Sporthalle mit Tribünen wird von Bemessungsgruppe 3 nach DIN 18 232-2 ausgegangen. Dabei wird eine maximale Brandleistung von 6 MW erreicht. Mit der Simulation wird auch der zeitliche Verlauf der Brandleistung berücksichtigt. Mit einer geringen Brandausbreitungsgeschwindigkeit wird dabei die maximale Brandleistung nach 15 min erreicht. Es ist zu berücksichtigen, dass zu diesem Zeitpunkt die Evakuierung in den erhöht gelegenen Bereichen bereits abgeschlossen ist. Für eine Beurteilung der Verrauchung der höher gelegenen Bereiche im Zeitraum der Evakuierung kann daher keine Berechnung nach DIN 18 232-2 durchgeführt werden. Es müsste vielmehr für die verschiedenen Zeitpunkte die dann aktuellen Brandleistungen berücksichtigt werden. Eine zeitliche Beurteilung der Verrauchung ermöglicht die durchgeführte Brandsimulationsrechnung.



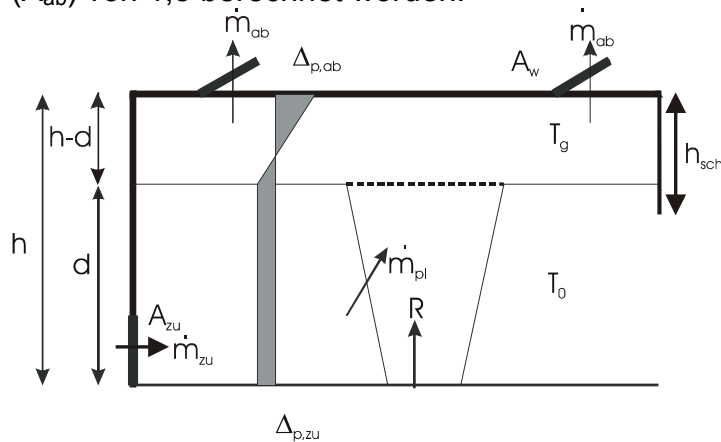
Die Berechnungen ergaben folgendes Ergebnis für die Dicke der raucharmen Schicht bzw. der Lage der Schichtgrenze bei einem Brand in Höhe des Spielfeldes:



Nach diesem Ergebnis wird nach etwa 10 min eine Lage der Schichtgrenze in einer Höhe von 2 m über dem Fußboden in Höhe der obersten Tribüne (VIP-Bereich) berechnet. Es ist zu berücksichtigen, dass dieser Bereich geschlossen ist und insofern nicht von einer Verrauchung betroffen ist. Die Evakuierung der Personen in diesem Bereich ist nach diesem Zeitraum ebenfalls abgeschlossen. Für die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr besteht keine Einschränkung, der Brand findet in diesem Fall in Höhe des Spielfeldes statt. An den Tribünen in einer Höhe von mehr als 3,5 m über dem EG und im VIP-Bereich wird in diesem Fall eine manuelle Brandbekämpfung nicht erforderlich. Die Ausgangshöhe im EG bleibt bei diesen Bränden immer mindestens 2,5 m unterhalb der Schichtgrenze, so dass die Zugänglichkeit für die Feuerwehr sowie die Rettung von Personen auf dem Spielfeld oder auf den niedriger gelegenen Tribünen ermöglicht sind.

Mit der Berechnung wurde für einen Zeitraum von 10 min eine Rauchableitung bis auf eine Höhe von 2 m über dem Fußboden des VIP-Raumes bzw. der in gleicher Höhe angeordneten Tribünenplätze (8,6 m über dem Spielfeld) nachgewiesen. Die Brandleistung zu diesem Zeitpunkt beträgt 2 667 kW. Dies entspricht etwa der Brandleistung der BMG 2 (3 000 kW). Für eine Höhe von 11,0 m und eine Aufstiegshöhe von 9,0 m ergibt sich nach Tabelle 3 der DIN 18 232-2 eine NRA-Fläche von 23,5 m². Die Zuluftfläche beträgt 35,25 m². Die Zuluftfläche kann auf ein Verhältnis von 1:1 der erforderlichen NRA-Fläche reduziert werden, wenn die NRA-Fläche um 25 % erhöht und die Zuluftfläche um 25 % reduziert werden. Dies liefert eine NRA- und Zuluftfläche von jeweils 29,4 m². Dieses Ergebnis ist u. a. auch deshalb ungünstig, weil bei der Anwendung der Tabelle 3 eine Interpolation nicht vorgesehen ist.

Die Werte in der Tabelle 3 der DI 18 232-2 sind nach dem dargestellten Modell mit folgenden Formeln für ein vorgegebenes Verhältnis von Zuluftflächen (A_{zu}) zu Abluft- (A_{ab}) von 1,5 berechnet worden:



Massenströme an einem Rauchabschnitt

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} = \frac{(h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) \rho_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} \quad \text{mit} \quad (T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_{Br} \dot{h}_c''}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}}$$

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} \rho_g}}$$

Es werden folgende physikalischen Konstanten verwendet:

Spezifische Brandleistung

$$\dot{h}_c'' = 300 \text{ kW} / \text{m}^2$$

Spezifische Wärmekapazität Rauchgase

$$c_p = 1,04 \text{ kWs/kgK}$$

Dichte der Luft (bei 20 °C)

$$\rho_0 = 1,2045 \text{ kg/m}^3$$

Ausgangstemperatur Luft (20 °C)

$$T_0 = 293 \text{ K}$$

Erdbeschleunigung

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Verlust durch Strahlung am Plume (Anteil Brandleistung)

$$f_{r,pl} = 20 \%$$

Wärmeabgabe an Bauteile (Anteil Brandleistung)

$$f_w = 40 \%$$

Für die Berechnung nach 10 min ergeben sich folgende geometrischen Daten:

Hallenhöhe $h = 11,20 \text{ m}$

Aufstiegshöhe $d = 8,6 \text{ m}$

Brandfläche (hier BMG 2) $A_{Br} = 10 \text{ m}^2$

Der Massenstrom am Plume einschließlich der Abbrandrate $\dot{m}_{pl} + \dot{R}$ errechnet sich für die Aufstiegshöhe von 9,0 m in der 11,0 m hohen Halle zu 41,9 kg/s. Die Berechnung nach den o. g. Formeln ergibt eine erforderliche NRA-Fläche von 23,5 m². Dies entspricht genau dem Wert der Tabelle 3 in DIN 18 232-2.

Für die tatsächliche Aufstiegshöhe von 8,6 m errechnet sich der Massenstrom am Plume zu 38,94 kg/s. In der 11,2 m hohen Halle ergibt sich mit den o. g. Formeln für ein Verhältnis von Zuluft-/Abluftflächen von 1,5 eine erforderliche NRA-Fläche von 18,57 m². Dies bedingt eine Zuluftfläche von 27,85 m². Wenn ein Verhältnis für

Zuluft/Abluftflächen von 1:1 gewählt wird errechen sich Zuluft- und Abluftfläche zu 21,65 m².

Nach den vorliegenden Vergleichsrechnungen berechnen sich die Flächen zu jeweils weniger als nach der durchgeführten Brandsimulationsrechnung. Dies liegt zum einen auch daran, dass bei der Brandsimulationsrechnung im Gegensatz zur Berechnung nach DIN 18 232-2 ein Zuschlag von 10 % zum Plumemassenstrom nach der Literatur gemacht wird.

Am Ende der Brandentstehungsphase nach 15 min wird die maximale Brandleistung von 6 000 kW erreicht. Zu diesem Zeitpunkt wird bei der Brandsimulation eine Dicke der raucharmen Schicht von 8,0 m berechnet. Diese liegt deutlich oberhalb der als Schutzziel definierten Höhe von 2,5 m bzw. 5,6 m über dem Spielfeld. Für eine Dicke der raucharmen Schicht von 8,0 m ergibt sich für die BMG 3 nach Tabelle 3 der DI 18 232-2 eine erforderliche Öffnungsfläche im Dach von 20,6 m² und eine Zuluftfläche von 30,9 m². Bei einem Verhältnis von 1:1 ergeben sich nach dem Näherungsverfahren in der DIN 18 232-2 Zuluft- und Abluftflächen von jeweils 25,75 m².

Der Massenstrom am Plume einschließlich der Abbrandrate $\dot{m}_{pl} + \dot{R}$ errechnet sich in der BMG 3 für die Aufstiegshöhe von 8,0 m zu 53,91 kg/s. Die Berechnung nach den o. g. Formeln ergibt in der 11,0 m hohen Halle eine erforderliche NRA-Fläche von 20,6 m². Dies entspricht genau dem Wert der Tabelle 3 in DIN 18 232-2.

In der 11,2 m hohen Halle ergibt sich mit den o. g. Formeln für ein Verhältnis von Zuluft-/Abluftflächen von 1,5 eine erforderliche NRA-Fläche von 19,95 m². Dies bedingt eine Zuluftfläche von 29,93 m². Wenn ein Verhältnis für Zuluft/Abluftflächen von 1:1 gewählt wird errechen sich Zuluft- und Abluftfläche zu 23,17 m².

In der Zusammenstellung ergeben sich nach den Vergleichsrechnungen der DIN 18 232-2 folgende unterschiedlichen erforderlichen Öffnungsflächen:

		A_{zu}/A_{ab}	NRA- Öffnung m ²	Zuluft- fläche m ²
Brandsimulation			25,00	25,00
Raucharme Schicht nach 10 min bei d = 8,6 m, Brand- leistung 3 000 kW	DIN, Tab. 3, h=11,0 m, d = 9,0 m	1,5	23,50	35,25
	Näherungsverfahren DIN	1,0	29,40	29,40
	Handrechnung, h = 11,2 m	1,5	18,57	27,85
	Handrechnung, h = 11,2 m	1,0	21,65	21,65
Raucharme Schicht nach 15 min bei d = 8,0 m, Brand- leistung 6 000 kW	DIN, Tab. 3, h=11,0 m	1,5	20,6	30,9
	Näherungsverfahren DIN	1,0	23,17	23,17
	Handrechnung, h = 11,2 m	1,5	19,95	29,93
	Handrechnung, h = 11,2 m	1,0	23,17	23,17

Die Aufstellung ergibt, dass bei den Vergleichsrechnungen geringere Öffnungsflächen berechnet werden als nach der Brandsimulationsrechnung. Die Öffnungsflächen im Dach nach der Brandsimulationsrechnung sind um ca. 10 % als nach der Handrechnung.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die ingenieurmäßigen Grundlagen der Bemessung von natürlichen Rauchabzügen, wie sie für die Überarbeitung der DIN 18232-2 verwendet wurden. Mit dem vorgestellten Verfahren können mit den gleichen Vereinfachungen auch abweichende Verhältnisse (z. B. abweichende Brandleistungen) näherungsweise berücksichtigt werden.

Es kann gezeigt werden dass durch Erweiterung des Bemessungsganges für horizontal liegende Rauchabzugsflächen auch vertikale Entrauchungen bemessen werden können. Die Bemessungen von in Wänden liegenden Rauchabzügen erfolgt analog der Bemessung von Abzügen im Dach unter Berücksichtigung eines Vergrößerungsfaktors der die Druckdifferenz zwischen der vertikalen Öffnungen in der Wand und der einer am Dach befindlichen Öffnung berücksichtigt. Grundsätzlich gilt, dass der Faktor zwischen 1 und 5 liegt, abhängig von der Lage der vertikalen Öffnung in Bezug auf die neutrale Ebene im System.

In vorliegenden Berechnungsgang wird allerdings kein Windeinfluss auf die vertikalen Öffnungen unterstellt. In der Realität sind jedoch solche Einflüsse zu erwarten, darum sind bei der Positionierung von vertikalen Rauchabzügen gegebenenfalls weitere Überlegungen anzustellen.

Mit dem vorgestellten Verfahren kann grundsätzlich auch die erforderliche Leistung von mechanischen Rauchabzugsanlagen (MRA), die in DIN 18232-5 geregelt sind, berechnet werden. Im Gegensatz zu den NRA (ungünstigste Verhältnisse bei geringen Rauchgastemperaturen) liegen für MRA die ungünstigsten Verhältnisse dann vor, wenn maximale Temperaturen auftreten; dann ist die effektive Absaugleistung der Geräte minimal. Für eine derartige Bemessung könnte beispielsweise die Wärmeabgabe an Bauteile vollständig vernachlässigt werden (Faktor $f_w = 0$ in Gl. 20). Eine Differenzierung nach erhöhten Brandleistungen für die Brandszenarien (600 kW/m^2 anstelle von 300 kW/m^2 für die gleiche Bemessungsgruppe) wären in diesem Fall nicht erforderlich und auch nicht gerechtfertigt.

Eine Berechnung mit einem instationären Modell (z. B. mit MRFC nach [4]) ist immer dann erforderlich, wenn durch eine Auslegung NRA-Anlagen dimensioniert werden sollen, die gemäß Brandschutzkonzept auch für die Evakuierung der Personen im Gebäude benötigt werden. Dies ist insbesondere dann unerlässlich, wenn die Öffnungsflächen nicht sofort für die Rauchabfuhr zur Verfügung stehen. Solche Berechnungen sind auch dann erforderlich, wenn bei einer Auslegung für NRA-Anlagen von konstruktiven Vorgaben in der Norm abgewichen werden soll, wenn

z. B. keine Rauchschrzen vorgesehen werden sollen oder zulässige Rauchabschnittsgrößen nach DIN 18232-2 überschritten werden sollen.

6 Literatur

- [1] Brein D.:
Anwendungsbereiche und –grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchableitung in Gebäuden.
- [2] Thomas, P.H. et al.:
Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No. 7, London, HMSO 1963.
- [3] Zukoski, E.E.:
Entrainment in the near field of a fire plume. Report NBS-GCR-81-346, CFR NIST, August 1981.
- [4] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB:
Referenzhandbuch für MRFC (Multi Room Fire Code), Version 2.8, Bruchsal/Wien, Sept. 2004.
- [5] Heskestad, G.:
Engineering relation for fire plumes. Technology Report 82-8. Society of Fire Protection Engineers, Boston, 1982.
- [6] McCaffrey, B.:
Momentum Implications for Diffusion Flames. Combustion and Flame 39: 191-209, 1980.
- [7] Thomas, P.H.:
The size of flames from natural fires. 9th symposium on combustion (1961), S.844-859.
- [8] Max, U.:
Zur Berechnung der Ausbreitung von Feuer und Rauch, Dissertation Universität/Gesamthochschule Kassel, 1990.
- [9] Butcher, E.G.;
Chitty, T.B.; Ashton, L.A.: The temperature attained by steel in building fires. Fire Research Techn. Paper No. 15. HMSO, London, 1966.
- [10] Technische Richtlinien für den Brandschutz :
TRVB A 126, Brandschutztechnische Kennzahlen verschiedener Nutzungen, Lagerungen, Lagergüter; Ausgabe 1987, Österreichischer Berufsfeuerwehrverband und die österreichischen Brandverhütungsstellen.

- [11] Schneider U, Lebeda C., Max, U.:
DIN 18232 - Stand der Erkenntnisse und neue Forschungsergebnisse für die Bemessung von Rauchabzügen, Beitrag zu den Braunschweiger Brandschutztagen 1997.
- [12] Schneider U, Lebeda C.:
Rauchabzug nach dem Entwurf DIN 18232-5, vfdb Zeitschrift, Heft 1, 48. Jahrgang, Januar 1999.
- [13] DIN:
DIN 18230-3, Baulicher Brandschutz im Industriebau. Beiblatt 1, Stand November 1989.
- [14] Technische Richtlinien für den Brandschutz :
TRVB S 126, Rauch- und Wärmeabzugsanlagen; Ausgabe 1977, Österreichischer Berufsfeuerwehrverband und die österreichischen Brandverhütungsstellen.
- [15] Schneider, U.; Lebeda, C.:
Bewertung des Abbrandverhaltens von Stoffen und Waren. Beitrag in Ingenieurmäßige Verfahren im Brandschutz (5). VdS Schadenverhütung, Köln, 1998.
- [16] National Institute of Standards and Technology (NIST):
Building and Fire Research Laboratory,
<http://fire.nist.gov/fire/fires/fires.html>, 2000.