

Brandsimulation für Brandschutzkonzepte

Grundlagen der Ingenieurmethoden im
baulichen Brandschutz
Vollbrand- und Zonenmodelle

Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit (AGB), Bruchsal,
Verein zur Förderung von Ingenieurmethoden
im Brandschutz e.V. -VIB, Holzminden

AGB

VIB

Inhalt

- Einführung
- Grundlagen der Berechnung der Temperaturen in Räumen im Falle eines Brandes
- Berechnung des Gaswechsels in Räumen mit Dachentlüftung
- Grundlagen der Berechnung von Temperatur- und Rauchverteilungen in Gebäuden mit Mehrraum – Zonenmodellen
- Beispiele

AGB

VIB

Gliederung der Brandsimulationsmodelle

Grundsätzlich lassen sich folgende Gruppen von Brandsimulationsmodellen unterscheiden:

- Vollbrandmodelle
- Zonenmodelle
- Feldmodelle (CFD)
- Systemcodes

AGB

VIB

Feld- und Zonenmodelle

Grundsätzliche Eigenschaften von Feld- und Zonenmodellen sind:

Eigenschaft	Zonenmodell ¹⁾	Feldmodelle
Geometrieerfassung	angenähert	exakt
Lüftungserfassung	exakt	exakt
Heat source	angenähert	angenähert
Modellaufwand	gering	sehr hoch
Aussagen	global ²⁾	lokal
Verifizierung	aufwendig	sehr aufwendig
Plausibilitätskontrolle	einfach	aufwendig
Dimensionsabhängigkeit	nicht gegeben ³⁾	sehr hoch ⁴⁾
Genauigkeit der lokalen Aussagen	exakt (analytische Lösungen)	abhängig von Zellgröße
Kosten des Einsatzes	gering	sehr hoch

¹⁾ am Beispiel MRFC (Multi Room Fire Code, AGB) [2]

²⁾ für gewisse Bereiche (z.B. Plumbereich, Öffnungen) auch lokal möglich

³⁾ innerhalb der definierten Modellgrenzen

⁴⁾ Rechenaufwand steigt exponentiell zu der Zellenanzahl

AGB

VIB

Modellannahmen

In jeder Brandschutzbemessung müssen zur Berechnung der Brandwirkungen vorab bestimmte Modellannahmen getroffen werden.

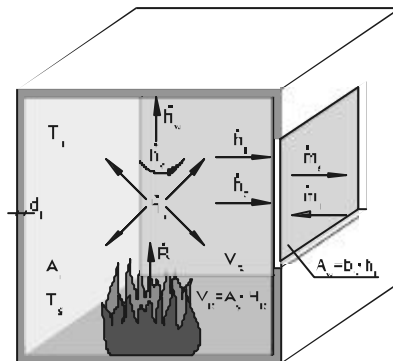
Dieses sind insbesondere Annahmen über:

- die Geometrie,
- die Lüftungsbedingungen,
- das Brandszenarium.

AGB

VIB

Grundlagen der Berechnung der Temperaturen in Räumen im Brandfall



Geometrie, Wärme- und Massenströme eines Wärmebilanzmodells für den Vollbrand

AGB

VIB

Energiebilanzgleichung

Energiebilanz:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_l + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0$$

Folgende Energieterme sind darin enthalten:

- \dot{h}_c die pro Zeiteinheit durch Verbrennung und Brandnebenserscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie
- \dot{h}_l die durch den Gaswechsel (Konvektion durch Öffnungen) pro Zeiteinheit abströmende Energie der Rauchgase (Konvektionsenergie)
- \dot{h}_b die durch die Fensterstrahlung pro Zeiteinheit entzogene Energie
- \dot{h}_w die durch die Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile pro Zeiteinheit abgegebene Energie
- \dot{h}_g die im Brandraum pro Zeiteinheit gespeicherte Energie der Rauchgase, welche die mittlere Brandraumtemperatur bestimmt
- \dot{h}_s sonstige pro Zeiteinheit verlorene Energieanteile (z. B. Speicherenergie von Einbauten)

AGB

VIB

Massenbilanzgleichung

Massenbilanz im Brandraum:

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + \dot{R}) = 0$$

Darin sind die zeitlichen Änderungen der folgenden Massenanteile enthalten:

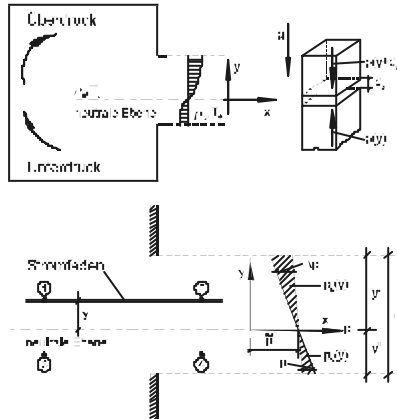
- \dot{m}_g die pro Zeiteinheit aus dem Brandraum strömenden Rauchgasmengen
- \dot{m}_l die pro Zeiteinheit in den Brandraum einströmenden Frischluftmengen
- \dot{R} die pro Zeiteinheit umgesetzte Brandlast, welche die Brandleistung bewirkt

AGB

VIB

Strömungsmodell der ein- bzw. ausströmenden Gase

Gaswechsel des Wärmebilanzmodells



AGB

VIB

Dynamische Gleichgewichtsbedingung nach der Bernoulligleichung

Für eine reibungsfreie Strömung entlang den Stromlinien in horizontaler Richtung gilt:

$$\left(\frac{v^2}{2} + U + P \right)_1 = \text{const.}$$

Für die horizontale Stromlinie $y = \text{const}$ ergibt sich $U = g \cdot y$, und man erhält:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho_1} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho_2}$$

Für $\rho_1 = \rho_g$ und $v_1^2/2 \ll p_1/\rho_1$ erhält man:

$$\frac{\bar{p} - \rho_g \cdot g \cdot y}{\rho_g} = \frac{\bar{p} - \rho_0 \cdot g \cdot y}{\rho_g} + \frac{v_2^2}{2}$$

AGB

VIB

Strömungsgeschwindigkeit

Geschwindigkeit des aus dem Brandraum ausströmenden Gases:

$$v_{gB} = \left(2 \cdot g \cdot y \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_g} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

Geschwindigkeit der in den Brandraum einströmenden Frischluft:

$$v_I = \left(2 \cdot g \cdot y \cdot \left(1 - \frac{\rho_g}{\rho_0} \right) \right)^{\frac{1}{2}}$$

AGB

VIB

Gasgesetz

Es gilt folgende Annahme:

Die beteiligten Gase sind in hinreichend guter Näherung durch das ideale Gasgesetz beschrieben und die Ortsabhängigkeit des Druckes kann vernachlässigt werden.

Für die Gasdichte folgt daraus: $\rho_g = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_g}$

Beispiel:

Brandraum mit 1000 K,

Abbrand von Holz : $r = 5.2$ kg Luft/kg Holz

($F = 1.0$), $T_0 = 293$ K, $\rho_0 = 1.205$ kg/m³, $c = 0.7$ ergibt:

$$\dot{m}_I = 0,474 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_D} \text{ [kg/s]}$$

AGB

VIB

Energieströme an Öffnungen

Energie, die von den ausströmenden Gasen mitgeführt wird:

$$\dot{h}_l = (\dot{m}_l + \dot{R}) \cdot c_{p_g} \cdot (T_g - T_0)$$

spezifische Wärmekapazität der heißen Rauchgase in J/kgK

Die Strahlung der heißen Gase aus dem Brandraum wird nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz berechnet:

$$\dot{h}_o = A_w \cdot s \cdot ((T_g)^4 - (T_o)^4)$$

s Strahlungskonstante des schwarzen Körpers:

$$s = 5.67 \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

A_w wirksame Öffnung in m^2

AGB

VIB

Wärmeübertragung an Umfassungsbauteil

Für die konvektiven Wärmeströme gilt das Newtonsche Gesetz der Wärmeübertragung:

$$\text{innen: } q_i = a_i \cdot A \cdot (T_g - T_w)$$

$$\text{außen: } q_a = a_a \cdot A \cdot (T_{wa} - T_0)$$

A wirksame (umströmte) Fläche in m^2

AGB

VIB

Wärmeübergang an Umfassungsbauteile I

Bei Wärmeübergang unter freier Konvektion gilt:

Für horizontale Flächen:

$$a_i = 1,52 \cdot (T_g - T_w)^{1/3} \text{ W/m}^2\text{K}$$

Für vertikale Flächen:

$$a_i = 1,30 \cdot (T_g - T_w)^{1/3} \text{ W/m}^2\text{K}$$

AGB

VIB

Wärmeübergang an Umfassungsbauteile II

Nach Eurocode 2 gilt für den Brandraum:

$$a_i = 25,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Für die Außenflächen gilt:

(Kein Strahlungsanteil enthalten.)

$$a_a = 5,0 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Empirische Beziehung für a_i nach den Brandversuchen von Metz aufgestellt:

$$a_i = (7,38 + 0,00224 \cdot (T_g - 273)) \cdot w^{0,5}$$

w Rauchgasgeschwindigkeit in m/s
T_g Rauchgastemperatur in K
a_i in W/m²K

AGB

VIB

Wärmestrom an Umfassungsbauteile

Bei realen Bränden liegen die Emissionszahlen der Gase zwischen 0,3 und 0,9. Aus Gründen der Zweckmäßigkeit wird ein von Eckert angegebenes Strahlungsmodell verwendet, welches für einen grau strahlenden Gaskörper, der von einer grau strahlenden Umschließung umgeben ist, entwickelt wurde.

Danach lässt sich der Wärmestrom bestimmen aus:

$$\dot{q}_i = e_w \cdot e_g \cdot s \cdot (T_g^4 - T_w^4) \cdot A$$

e_w	Emission der Bauteiloberfläche
e_g	Emission der Rauchgase
A	wirksame Oberfläche in m^2

AGB

VIB

Erwärmung der Bauteile

Für die resultierende Emission gilt:

$$e_{res} = e_w \cdot e_g$$

Für die absorbierte Energie gilt:

$$\dot{h}_w = A_j \cdot (a_j (T_g - T_{wj}) + e_{res} \cdot s (T_g^4 - T_{wj}^4))$$

Fouriergleichung f. eindimensionale Wärmeleitung:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{?_w}{?_w c_{pw}} \cdot \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2}$$

Anfangsbedingung:

$$\text{Zeit: } t = 0 \quad T_w(x) = 293 \text{ K,}$$

Randbedingungen während des Brandes:

Zeit: $t > 0$

$$\text{innen: } \dot{q}_i = \dot{h}_w \quad \text{und} \quad \dot{q}_i = -? \cdot \frac{dT_w}{dx}$$

$$\text{außen: } \dot{q}_a = \dot{h}_{wa} \quad \text{und} \quad \dot{q}_a = -? \cdot \frac{dT_{wa}}{dx}$$

AGB

VIB

Wärmespeicherenergie in den Gasen des Brandraumes

Neben der aus dem Brandraum entweichenden Energie wird Energie benötigt, um die im Raum befindlichen Gase zu erwärmen.

Die Aufheizung des Raumes erfordert pro Zeiteinheit die Energie:

$$\dot{h}_g = V_R \cdot \rho_g \cdot c_{pg} \cdot \frac{dT_g}{dt}$$

V_R Raumvolumen in m^3

Bei kleineren Räumen ist der Term \dot{h}_g vergleichsweise klein. Bei einer raschen Aufheizung des Brandraumes erreicht er die gleiche Größenordnung wie z. B. die Strahlung aus einer Fensterfläche, so dass \dot{h}_g nicht vernachlässigt werden kann.

AGB

VIB

Brandleistung

Für die Brandleistung gilt im einfachsten Fall:

$$\dot{h}_c = \dot{R} \cdot H_u$$

H_u unterer Heizwert in kWh/kg

Eine Verbesserung bezüglich der Brandleistung ergibt sich durch:

$$\dot{h}_c = \dot{m}_l \cdot \left(\frac{H_u}{r} \right) \cdot ?$$

? die Verbrennungseffektivität (? = 1,0)

Bei hinreichender Luftzufuhr ($F < 1,0$) gilt für die Brandleistung:

$$\dot{h}_c = \dot{R} \cdot H_u \cdot ?$$

Grenzfall (stöchiometrische Verbrennung):

$$\frac{\dot{R} \cdot r}{\dot{m}_l} = F \quad \left\{ \begin{array}{l} < \text{brandlastgesteuert} \\ > \text{ventilationsgesteuert} \end{array} \right.$$

AGB

VIB

Stöchiometrischer Luftbedarf verschiedener Brennstoffe

Brennstoff	Heizwert kWh/kg	H _u /r kWh/kg Luft
Holz	4,8	0,93
Steinkohle	9,3	0,814
PVC - weich	5,0	0,828
Polyethylen	12,2	0,814
Polystyrol	11,1	0,836
Povurethan - hart	6,7	0,894
Benzin	11,9	0,884
Heizöl	11,7	0,890
Methan	13,9	0,808
Wasserstoff	33,6	0,977

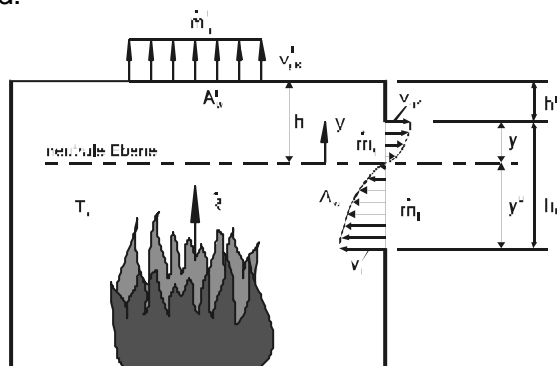
Folgerung: $H_u/r \sim \text{const.} \sim 0.9 \text{ kWh/kg L}$

AGB

VIB

Gaswechsel in Räumen mit Dachentlüftung

Gaswechsel in einem Gebäude mit Dachentlüftung beim
Vollbrand:



AGB

VIB

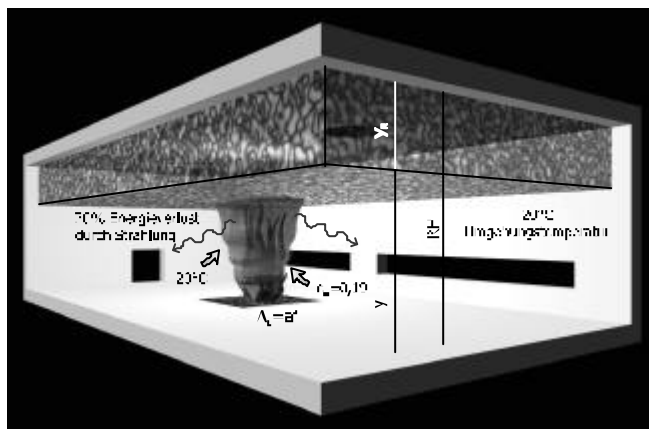
Mehrraum-Mehrzonen-Modell MRFC (Multi-Room-Fire-Code)

- Gas- und Bauteiltemperaturen
- Druckverteilungen (vor Öffnungen)
- Massen- und Energieströme werden für den Brandbereich (Fireplume) sowie für beide Schichten im Raum formuliert und im Programm iterativ berechnet.
- Im Brandraum können lokale Temperaturen nach analytischen Plume- und Ceiling Jet-Formeln berechnet werden.

AGB

VIB

Beispielhafte Darstellung eines Brandes durch ein Zonenmodell

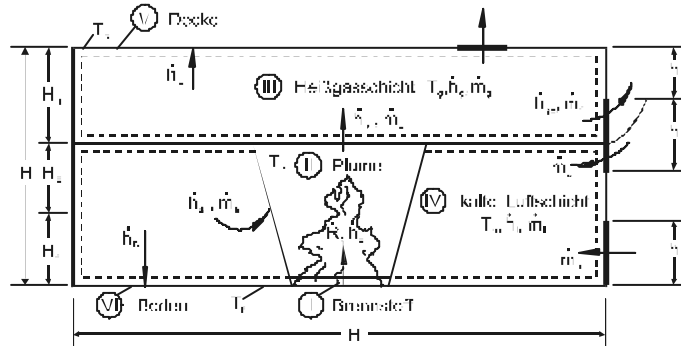


AGB

VIB

Modellierung des Brandraumes

Grundlagen der Berechnung von Temperatur- und Rauchverteilungen in Gebäuden mit dem Mehrraum – Zonenmodell MRFC, Version 2.6:



AGB

VIB

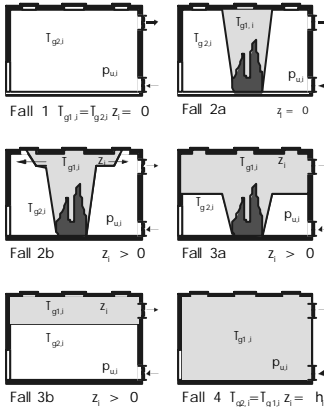
Anwendungsspektrum MRFC

- Temperaturentwicklung und Verrauchung
- Verrauchung von Rettungswegen
- Bauteilnachweise
- Dimensionierung von Entrauchungen
- Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten
- Forensik
- Forschung und Normungsbereich

AGB

VIB

Raummodellierungen bei einer Mehrraumbetrachtung



Typische Raumelemente bei einem Brand (Mehrraumbetrachtung) gemäß MRFC 2.6 mit unterschiedlicher Aufteilung des Brandherdes und Brandrauches bzw. der Raumtemperaturen je nach Brandverlauf.

AGB

VIB

Rechengrößen im Modell MRFC

Als unbekannte Größen gehen in das MRFC-Rechenmodell folgende physikalische Größen ein:

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

AGB

VIB

Raumgeometrien im Modell MRFC

Räume im Sinne des Rechenprogramms MRFC können sein:

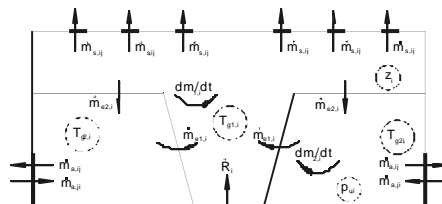
- Brandabschnitte,
- Brandbekämpfungsabschnitte,
- einzelne baulich ausgebildete Räume,
- Hallenbereiche oder Räume die durch
 - Einbauten,
 - Teilabtrennungen,
 - virtuelle Trennungen

in miteinander verbundene Raumbereiche unterteilbar sind.

AGB

VIB

Massenbilanzen und Massenströme im Modell MRFC



Berücksichtigte Massenströme:

- 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.

AGB

VIB

Massenströme zwischen den einzelnen Räumen und der Umgebung in MRFC

- Massenströme durch vertikale Öffnungen
- Massenströme durch horizontale Öffnungen
- Massenströme durch Schächte, Kanäle
- Zwangsmassenströme (Zu- und Abluft)
- Zwangsmassenstrom in Abhängigkeit von der stöchiometrischen Verbrennung

AGB

VIB

Modellierung der Massenbilanz im Brandraum

Die beiden Massenbilanzen, die gelöst werden, lauten für den Raum i bei zwei Zonen:

für die Brandrauchschiicht

$$dm_{1,i} / dt + \sum \dot{m}_{s,ij} + \dot{m}_{e2,i} - \sum \dot{m}_{s,ji} - \dot{m}_{e1,i} - \dot{R}_i = 0$$

für die untere Gasschiicht

$$dm_{2,i} / dt + \sum \dot{m}_{a,ij} + \dot{m}_{e1,i} - \sum \dot{m}_{a,ji} - \dot{m}_{e2,i} = 0$$

AGB

VIB

Eingangsgrößen im Massenbilanzmodell

Darin sind:

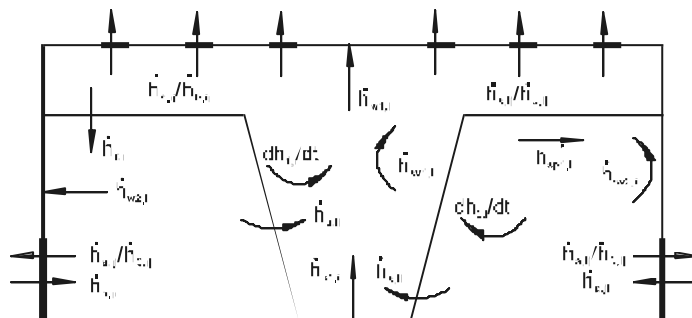
- $dm_{1,i}$ Massenstrom änderungen der Rauchgasschicht im Raum i
- $dm_{2,i}$ Massenstrom änderungen der unteren Gasschicht im Raum i
- $m_{a,ij}$ Massenströme an Öffnungen in der unteren Gasschicht von Raum i nach Raum j
- $m_{a,ji}$ Massenströme an Öffnungen in der unteren Gasschicht von Raum j nach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

AGB

VIB

Energiebilanz und Energieströme im Modell MRFC

Energiebilanzen und Energieströme für den Brandraum im Modell MRFC:



AGB

VIB

Modellierung der Energiebilanz im Brandraum I

Energiebilanz für die heiße Gasschicht des Raumes i:

$$dh_{1,i} / dt + \dot{h}_{ab1,i} - \dot{h}_{zu1,i} = 0$$

In der Energiebilanz sind folgende Terme enthalten:

Energieabflüsse:

$$\dot{h}_{ab1,i} = \sum \dot{h}_{s,ij} + \sum \dot{h}_{01,ij} + \sum \dot{h}_{wn,i} + \sum \dot{h}_{sv1,i} + \dot{h}_r$$

Energiezuflüsse:

$$\dot{h}_{zu1,i} = \dot{h}_{c,1i} + \sum \dot{h}_{s,ji} + \sum \dot{h}_{01,ji} + \dot{h}_{sp1,i}$$

AGB

VIB

Modellierung der Energiebilanz im Brandraum II

Für die untenliegende Gasschicht lautet die Energiebilanz:

$$dh_{2,i}/dt + \dot{h}_{ab2,i} - \dot{h}_{zu2,i} = 0$$

Energieabflüsse:

$$\dot{h}_{ab2,i} = \sum \dot{h}_{a,ij} + \sum \dot{h}_{02,ij} + \sum \dot{h}_{wn,i} + \sum \dot{h}_{sv2,i}$$

Energiezuflüsse:

$$\dot{h}_{zu2,i} = \dot{h}_{sp2,i} + \sum \dot{h}_{a,ji} + \sum \dot{h}_{02,ji}$$

AGB

VIB

Ausbildung von Flamme und Plume I

Die Ausbildung von Feuer und Rauch wird generell in drei Bereiche unterteilt:

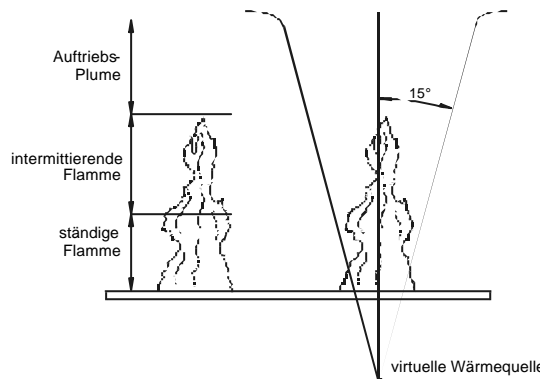
- die Flammenzone (Nahfeld des Brandes), sie besteht aus einer ständigen Flamme und einem beschleunigten Strom brennender Gase;
- die intermittierende Flammenzone, sie ist der Bereich vorübergehender Flammenbildung mit nahezu konstanter Strömungsgeschwindigkeit;
- der Feuerplume darüber, er ist ein Bereich mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur bei zunehmender Höhe.

AGB

VIB

Ausbildung von Flamme und Plume II

Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume:



AGB

VIB

Höhe der Flamme

Die Höhe des Flammenbereiches inklusive der intermittierenden Zone beträgt nach Zukoski et al. für $l/D < 6$ und $Q_c^{2/5}/D < 26$:

$$l = 0,23 \cdot Q_c^{2/5}$$

Darin sind:

- l Flammenhöhe in m
- Q_c Brandleistung in kW
- D Durchmesser des Brandherdes in m.

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

$$l = 0,20 \cdot Q_c^{0,61} / D^{0,5}$$

Für den Bereich gilt nach Heskestad allgemein:

$$l = 0,23 \cdot Q_c^{2/5} - 1,02 \cdot D$$

AGB

VIB

Rauchgasproduktion am Plumes

Zur Berechnung der Rauchgasmengen kommen verschiedene Plumeformeln zur Anwendung. Unter der Annahme einer kreisförmigen oder quadratischen Wärmequelle gilt:

$$\dot{m}_{pl} = 0,071 \cdot Q_p^{1/3} \cdot z^{5/3}$$

Darin sind:

- \dot{m}_{pl} Massenstrom des Plumes der Höhe z in kg/s
- Q_p konvektive Wärmeleistung in kW
- z Höhe des Plumes in m oberhalb der Brandherdgrundfläche.

Obige Gleichung gilt für Plumehöhen von:

$$z > \frac{0,035 \cdot Q_p^{2/3}}{(D_f \cdot 0,074 \cdot Q_p^{2/5})^{2/3}}$$

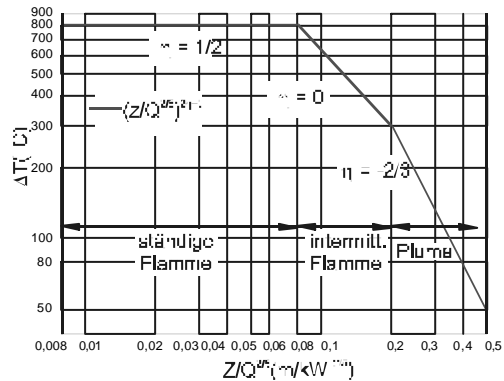
- D_f Durchmesser oder Seitenlänge in m

AGB

VIB

Temperaturerhöhung im Flammen- und Plumbereich

Temperaturerhöhung über der Zentralachse eines Feuerplumes:



AGB

VIB

Modellierung der Massenströme

Für einen Brand mit dem Umfang U gilt für Flammentemperaturen von ca. 1100 K:

$$\dot{m}_{PI} = 0,096 \cdot U \cdot \rho_0 \cdot z^{3/2} \cdot (g \cdot T_0 / T_f)^{1/2}$$

Darin sind:

- U Umfang des Brandes in m
- ρ_0 Dichte der Luft: 1,22 kg/m³
- T_0 Umgebungstemperatur: 293 K
- T_f Flammentemperatur: z.B. 1100 K.

Mit den o. g. Werten vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\dot{m}_{PI} = 0,188 \cdot U \cdot z^{3/2}$$

Nebenbedingungen: $z < 5U$ und $200 < Q < 750 \text{ kW/m}^2$.

AGB

VIB

Modellierung der Volumenströme

Unter der Annahme, dass die raucharme Schichtdicke $z = 2.5$ m ist, ergibt sich die theoretisch erforderliche Volumenrate für eine Entrauchung zu:

$$V_s = \frac{0,7431 \cdot U}{\rho_s}$$

Darin sind:

V_s Volumenrate in m^3/s

ρ_s Dichte der Rauchgase in kg/m^3
(z.B. $T_s = 500$ K, $\rho_s = 0,70$ kg/m^3).

AGB

VIB

Anwendungen von MRFC (Beispiele)

- Festlegungen der neuen w-Faktoren in DIN 18 230, Teil 1.
- Beiträge für die DIN 18 232, Teil 5.
- Zur Störfallanalyse im kerntechnischen Bereich im Rahmen von Genehmigungs- bzw. Aufsichtsverfahren.
- Für konventionelle Baugenehmigungsverfahren.
- Überprüfung des Brandschutzentwurfes (z.B. im Bereich Entrauchung).

AGB

VIB

Verifikation des Codes

Das Programm MRFC 2.7 wurde im Rahmen von Brandversuchen

- bei der Materialprüfanstalt Nordrhein-Westfalen, Erwitte
- im HDR-Containment des Kernforschungszentrums Karlsruhe

überprüft, kalibriert und verifiziert.

Die Version MRFC 2.7 nimmt zur Zeit erfolgreich an den Codevalidierungen des CIB W 14 Round Robin teil.

AGB

VIB

Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!



AGB

VIB