

# Berechnungsgrundlagen mit Beispielen für die Auslegung von Anlagen zur Rauchableitung

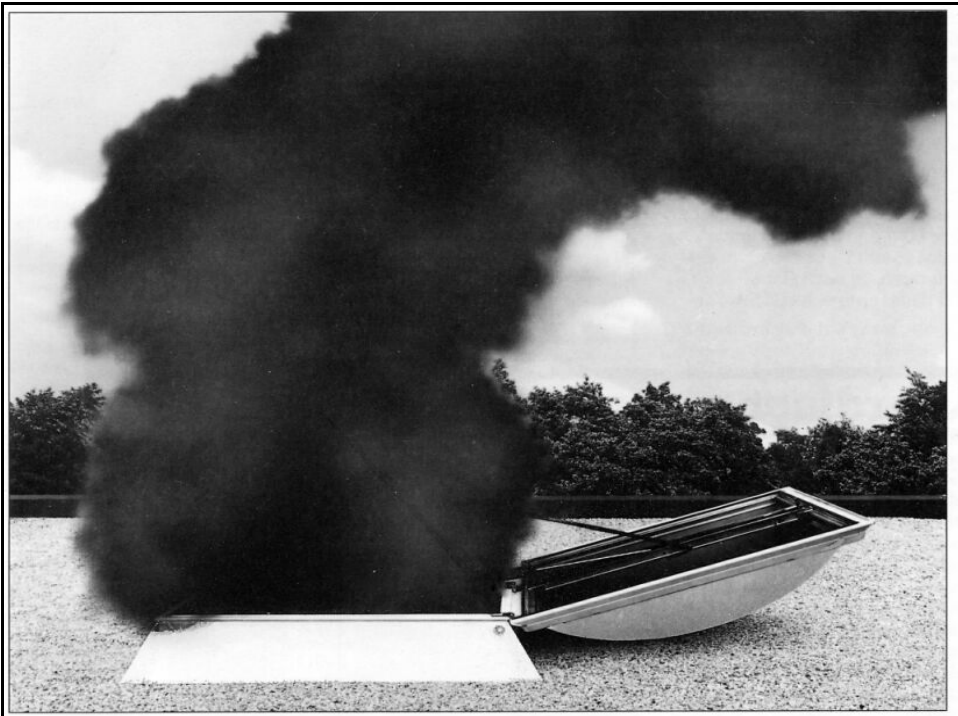
Ulrich Max  
Ingenieurbüro für Brandsicherheit  
AGB

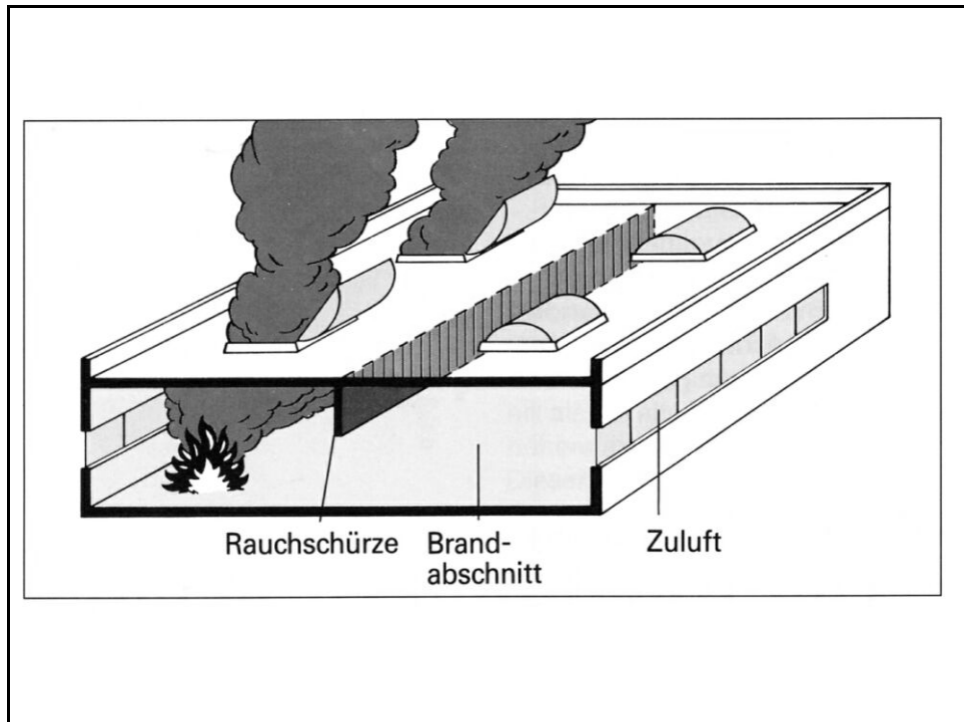
## Gliederung

- Einführung
- Physikalische Grundlagen der Berechnung
- Berechnung nach Zonenmodell
- Bemessungsbrände
- Bemessung nach Handrechnung
- Beispiele
- NRA in Außenwänden

# Einführung

- Komplexere (größere) Geometrien
- Bauordnungsrechtliche Anforderungen zur Rauchableitung (2,5 m „raucharme“ Schicht)
- Anlagentechnischer Brandschutz
- Nachweisbedarf
- Ingenieurmäßige Verfahren





## Ingenieurmäßige Verfahren

- Normen
- Handrechnungen
- Zonenmodelle
- CFD-Berechnungen
- Systemcodes
- Physikalische Modelle
- Rauchversuch

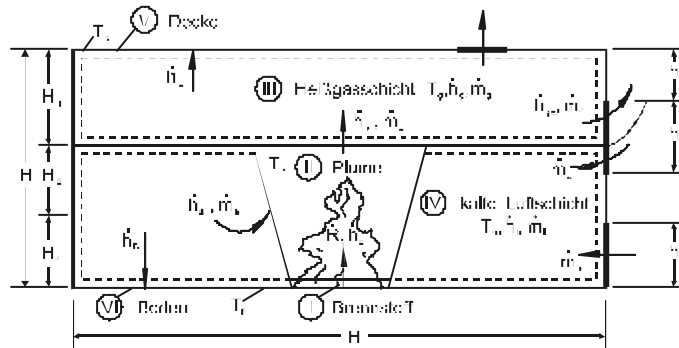
# Physikalische Grundlagen für Zonenmodelle

## Anwendungsspektrum

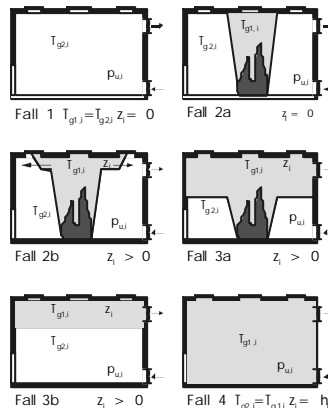
- Temperaturentwicklung und Verrauchung
- Verrauchung von Rettungswegen
- Bauteilnachweise
- Dimensionierung von Entrauchungen
- Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten
- Forschung und Normungsbereich

# Modellierung des Brandraumes

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



## Raummodellierungen bei einer Mehrraumbetrachtung



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

# Modellierung von Raumsystemen

Im Modell MRFC werden folgende Fälle unterschieden

**Fall 1:** Der Raum besteht aus einer einzigen kalten Schicht, die noch nicht verrauchte ist.

**Fall 2a:** Bei Brandbeginn bildet sich im Brandraum zunächst der Plume aus. Der Raum besteht aus einer heißen Plume sowie einer kalten Schicht über die gesamte Hallenhöhe, bis 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.

**Fall 3a:** Der Brandraum besteht aus einer heißen Plume (Flammenzone) und einer Brandrauchschicht (Brandrauchzone) mit einer homogenen Mischtemperatur.

**Fall 3b:** Es fehlt der durch den Brand bedingte Plume. Durch Zustrom von Brandrauch aus bereits verrauchten Räumen hat sich eine Brandrauchschicht der Höhe  $z$  gebildet.

**Fall 4:** Der Raum besteht nur aus einer verrauchten heißen Schicht.

# 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  $p_{u,i}$



## 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

## Modellierung der Massenbilanz im Brandraum

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

für die Rauchgasschicht

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

für die untere Gasschicht

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

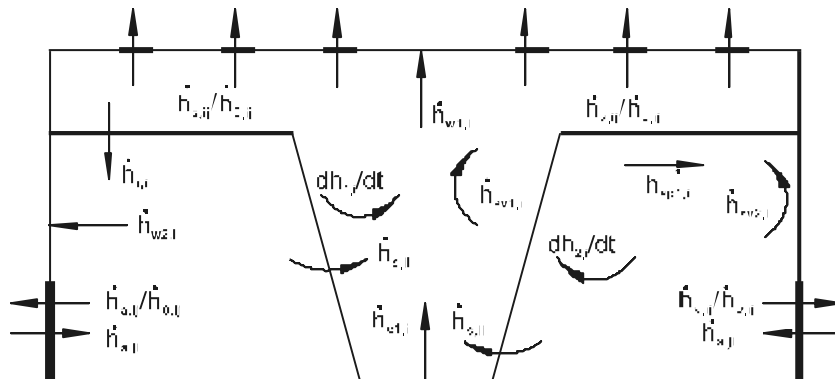


# Eingangsgrößen im Massenbilanzmodell

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

# Energiebilanz und Energieströme im Modell MRFC



## 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:

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

## 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:

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

# Eingangsgrößen im Energiebilanzmodell I

Darin sind:

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

# Eingangsgrößen im Energiebilanzmodell II

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

# Bestimmung der Abbrandrate bzw. Energiefreisetzung im Modell MRFC

Brandleistungsmodelle im Programm MRFC:

- zeitabhängiges Ausbreitungsmodell für flächenartige Brände,
- Vorgabe einer Abbrandfunktion über drei Zeitbereiche,
- Vorgabe der Brandleistung 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.

## Bemessungsbrände

# Sauerstoff- und Luftbedarf bei der Verbrennung

Sauerstoffbedarf zur Verbrennung fester und flüssiger Stoffe:

$$O_{\min} = 2,664 \cdot c + 7,937 \cdot k + 0,998 \cdot s - o$$

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.

Zugehöriger Luftbedarf an trockener Luft:

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,232}$$

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

# Kalorische Daten brennbarer 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

# Kalorische Daten fester Stoffe

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	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
Teppichfliz	6,0	6,7	≈ 0,9
Tonkassetten	6,0	6,7	≈ 0,9
Zucker	4,6	5,1	≈ 0,9

# Kalorische Daten 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

# Bemessungsbrände als Brandleistungskurven

## Bemessungsbrände beruhend auf Brandleistungskurven

Grundsätzlich lassen sich die folgenden Fälle unterscheiden:

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

## Notwendige Angaben

- Brandfläche
- Lage der Brandfläche
- Brandentwicklungsdauer
- Brandlast
  - Art des brennbaren Stoffes
  - Brandleistung
  - Heizwert
  - Zusammensetzung

## Konstante Brandleistungen

- Stationärer Fall (steady state)
  - (maximale) Brandleistung
  - Brandfläche
  - Brandentwicklung nicht berücksichtigt
  - Zeitunabhängig
- DIN 18232-2 und 18232-5
- TRVB S 125/97



## Bemessungsbrände nach DIN 18232 Teil 2 und Teil 5

Annahmen DIN 18232	Einheit	Bemessungsgruppe						
		1	2	3	4	5	6	7
Flächen	m <sup>2</sup>	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	---	---
konvektiver Anteil nach Teil 5	kW	2400	4800	9600	19200	38400	---	---

## Gemittelte Brandausbreitungs- geschwindigkeiten nach DIN 18232 Teil 2 und Teil 5

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

# 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
<u>Bei ungünstigen Verhältnissen</u>	<u>≤ 15 min</u>
Bei besonders ungünstigen Verhältnissen	≤ 20 min

## Bemessungsbrände nach DIN 18232-5

Szenarium	Bemessungs- gruppe BG	Brandfläche [m <sup>2</sup> ]	Brandleistung [kW]	Brandausbreitungs- geschwindigkeit [m/min]	Brandentwicklungs- dauer [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

# Brandszenarien nach CEN

Gebäude, Räume	Brandfläche [m <sup>2</sup> ]	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

# NRA nach TRVB

- Technische Richtlinien für den vorbeugenden Brandschutz des österreichischen Feuerwehrverbandes
  - Nutzungsabhängig TRVB A 126
    - Brandbelastung
    - Brandlastverteilung
    - Brandausbreitungsgeschwindigkeit
  - Rauch- und Wärmeabzugsanlagen TRVB S 125
    - Bemessungsbrandfläche ( $A_B$ )
    - zugehöriger Bemessungsbrandumfang ( $U_B$ )
    - durch den Brand freigesetzte spezifische Brandleistung ( $q_B$ )

## Bemessungsbrände nach TRVB S 125

BRE-Gruppe lt. TRVB A 126	Bemessungs brandumfang $U_B$ [m]	Bemessungs brandfläche $A_B$ [m <sup>2</sup> ]	Spezifische Brandleistung 1 $q_B$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Spezifische Brandleistung 2 $q_B$ [kW/m <sup>2</sup> ]
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

## Nutzungsabhängig TRVB A 126

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

## Zeitlich veränderlich

- Quadratisch anwachsende Brände
  - lineare Ausbreitungsgeschwindigkeit
  - Konstante spezifische Brandleistung
- Geometrische Abbrandmodell (MRFC)

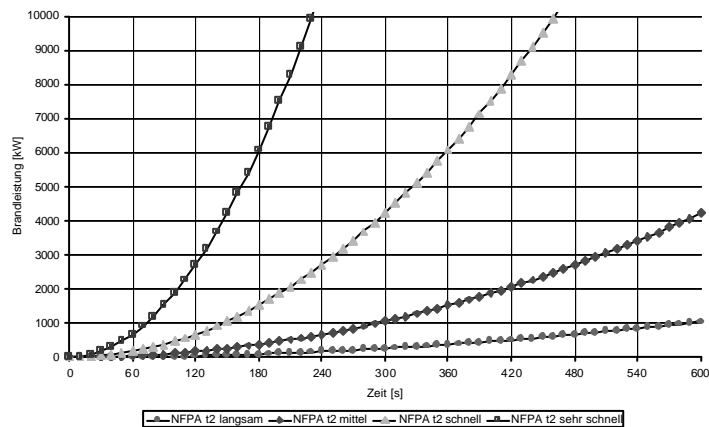
## $t^2$ - Modelle nach NFPA

$$Q_C = \alpha \cdot (t - t_i)^2$$

darin sind:

$Q_C$	Brandleistung in kW
$t_i$	Zeit bis zur Entzündung in s
$t$	Zeit in s
$\alpha$	Ausbreitungsfaktor in $\text{kJ/s}^3$

# Darstellung der $t^2$ -Modelle nach NFPA



## Flammenausbreitungsparameter für das $t^2$ -Modell nach NFPA

Stoffgruppen	Flammenausbreitung	a [ $\text{kJ/s}^3$ ]	Zeitdauer in [s] für $Q_c \approx 10^3$ 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 s schnell	0.1876	73

# Brandausbreitungsmodell nach MRFC I

Für eine von der Zeit abhängige quadratische Brandfläche  $A_f$  gilt bei konstanter Brandausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  in zwei Richtungen:

$$A_f = (v \cdot (t - t_i))^2$$

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 $s$

# Brandausbreitungsmodell nach MRFC II

Brandleistung auf einer Brandfläche bei vollständiger Verbrennung:

$$Q_C = \dot{r} \cdot H_U \cdot A_f$$

darin sind:

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

## Vergleich Brandausbreitungsmodell nach MRFC mit t<sup>2</sup>-Modell nach NFPA I

Ein Vergleich der Faktoren des t<sup>2</sup>-Modells nach NFPA und des Brandausbreitungsmodells nach MRFC zeigt, dass die folgende Beziehung gilt:

$$v = \left( \frac{a}{\dot{r} \cdot H_U} \right)^{1/2}$$

## Vergleich Brandausbreitungsmodell nach MRFC mit t<sup>2</sup>-Modell nach NFPA II

Mit den spezifischen mittleren Brandleistungen von 100 kWh/m<sup>2</sup>, 300 kWh/m<sup>2</sup> und 800 kWh/m<sup>2</sup> für die nach NFPA angegebenen Stoffgruppen errechnen sich Brandausbreitungsgeschwindigkeiten 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.



# Brandausbreitung bei festen Stoffen

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

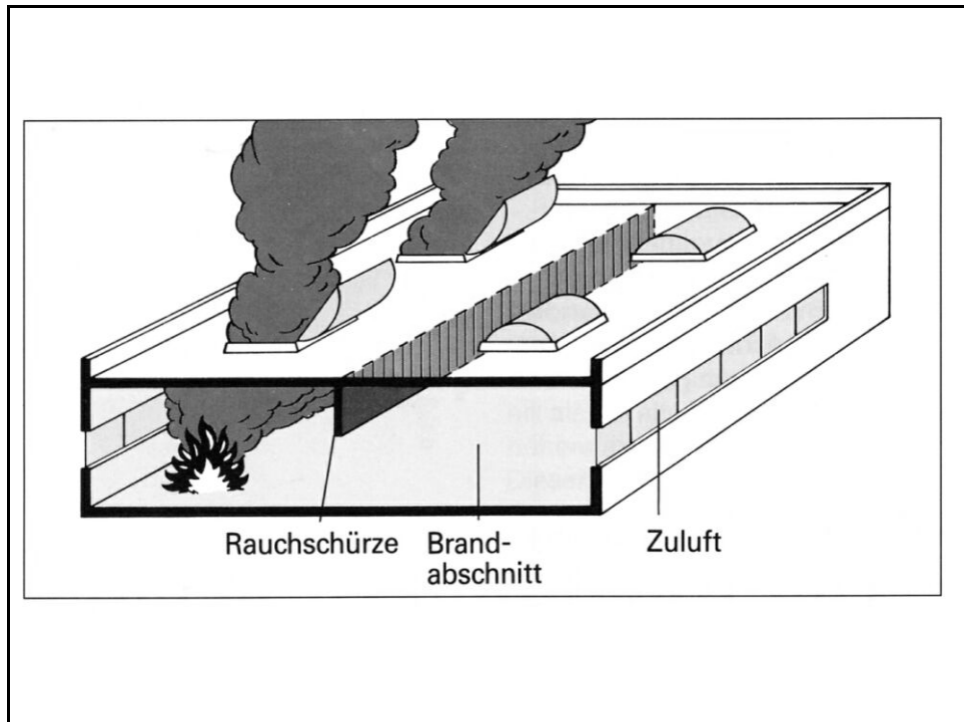
## Brandausbreitungsgeschwindigkeiten für geometrische Ausbreitungsmodelle

Brandausbreitung	Brandausbreitungsgeschwindigkeit in mm/s	
	nach Schneider	nach DIN 18232
Entstehungsphase	1-2	-
Langsam	5	2,5
Mittel	8	4,0
Schnell	12-20	7,5
sehr schnell	30-50	-
Flashover	80-120	-

# Handrechenformeln

## DIN 18232-2: 2003 natürliche Entrauchung

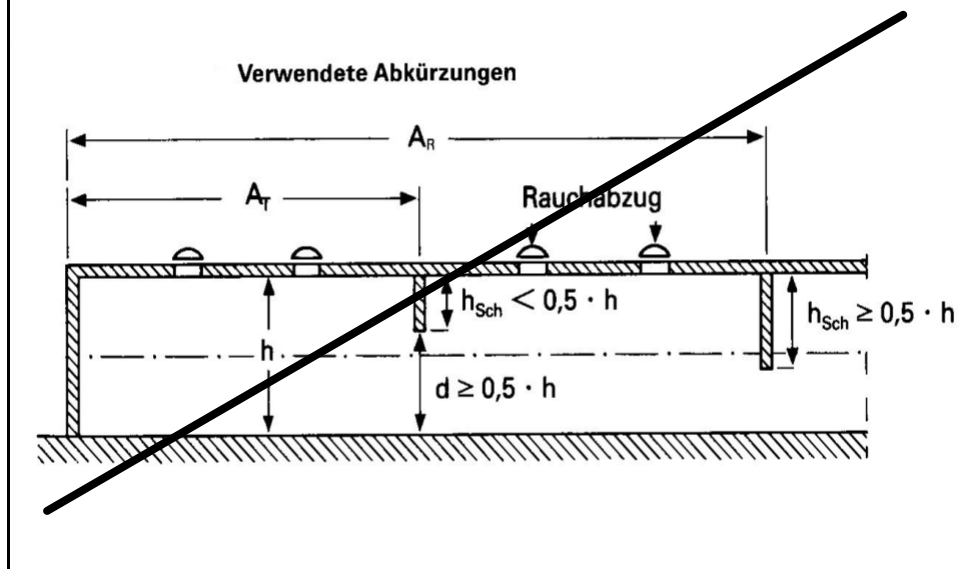
Baulicher Brandschutz im Industriebau <b>Rauch- und Wärmeabzugsanlagen</b> Rauchabzüge	<b>Sep 1984</b> <b>Nov 1989</b>
Baulicher Brandschutz im Industriebau <b>Rauch- und Wärmeabzugsanlagen</b> Teil 2: Rauchabzüge	<b>Entwurf</b> <b>März 1996</b>
<b>Rauch- und Wärmefreihaltung</b> Teil 2: Rauchabzüge Bemessung, Anforderungen und Einbau	<b>Entwurf</b> <b>Dez 2001</b>
<b>Rauch- und Wärmefreihaltung</b> Teil 2: Rauchabzüge Bemessung, Anforderungen und Einbau	<b>Juni 2003</b>



## DIN 18232-2 (11/89)

- Rauchableitung über horizontale Öffnungen
- Brandentwicklungsdauer, Brandfläche
- BMG1 bis BMG7
- $d_{\text{korr}}$
- $a_h$  [%]
- Zuluft

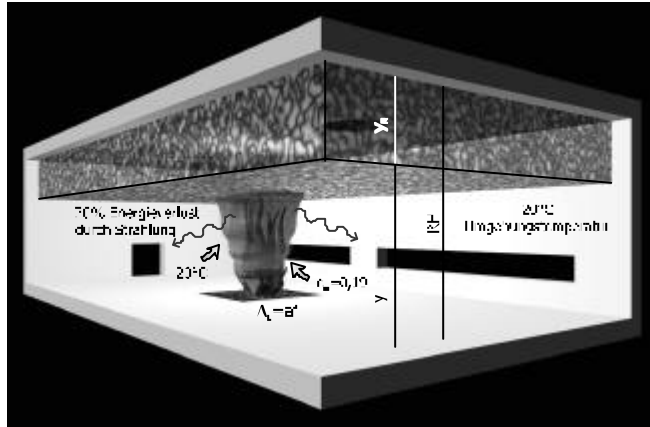
**alt: DIN 18232-2 : 1989-11**



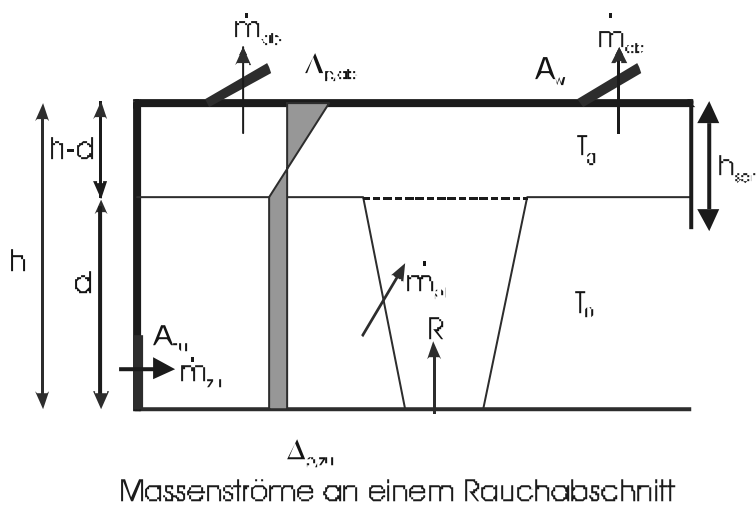
## Vereinfachtes Rechenverfahren

- stark vereinfachtes Zonenmodell
- Massenbilanz für die Rauchgasschicht erfüllt
- Energiebilanz nicht exakt berücksichtigt
  - Abgabe von Wärme an die Bauteile und die Strahlungsverluste am Plume mit einem pauschalen Faktor berücksichtigt

# Modellierung eines Brandes für einfaches Zonenmodell



# Druckverteilung und Massenströme



# Grundlagen

- Stationäre Verhältnisse, d. h. Schicht stabil, Temperaturen konstant, Wärmeabgabe an die Bauteile konstant
- Temperatur der unteren Schicht entspricht der Umgebungstemperatur
- Die Einmischung aus der unteren Schicht aus Plumberechnung

## Massenströme horizontale Öffnungen und Zuluft

- $\Delta p = \Delta p_{zu} + \Delta p_{ab} =$
- $(\rho_0 - \rho_g) \cdot (h-d) =$
- $\rho_0 \cdot g \cdot (h-d) \cdot (1 - T_0/T_g)$
- $\dot{m}_{zu} = \dot{m}_{ab} = \dot{m}_{pl}$  (Massenbilanz)

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

$$\dot{m}_{ab} = A_w \sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_g}}$$

# Drücke

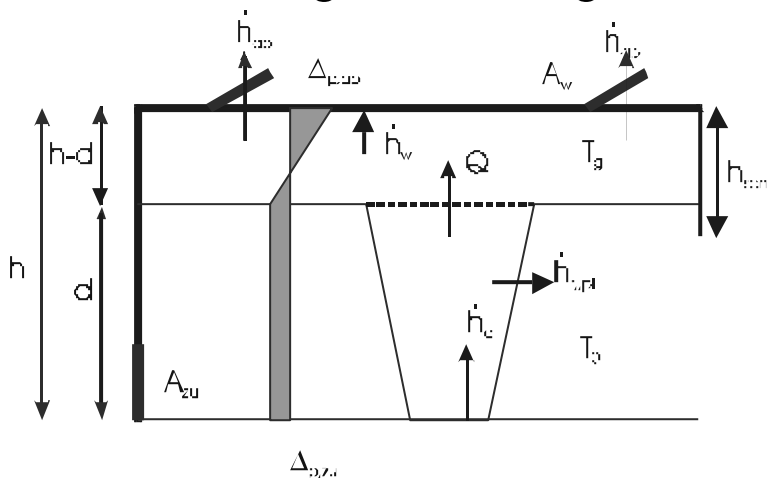
$$\Delta p_{ab} + \Delta p_{zu} = (h - d) \left( \frac{T_g - T_0}{T_g} \right) \rho_0 g$$

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

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

$$v_{zu} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{zu}}{\rho_0}} \text{ (Bernoulli)}$$

# Druckverteilung und Energieströme



Energieströme an einem Rauchabschnitt

# Energiebilanz

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

In dieser Energiebilanz sind folgende Terme enthalten:

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

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

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

# Energieströme

$$\dot{h}_g = (\dot{m}_{pl} + \dot{R})(T_g - T_0)c_{pg}$$

$$\dot{h}_{ab} = \dot{m}_{ab}(T_g - T_0)c_{pg}$$



# Rauchgastemperatur

$$Q = (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c$$
$$\dot{h}_{ab} + \dot{h}_w = (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c$$

$$\dot{h}_c = A_{Br} \dot{h}_c''$$

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

# Plume

- Verschiedene Modelle
  - Thomas und Hinkley
  - McCaffrey
  - Zukoski
  - Heskestad
  - Cetegen
  - Cox und Chitty
- Berechnung für Aufstiegshöhe d

# Ausbildung von Flamme und Plume I

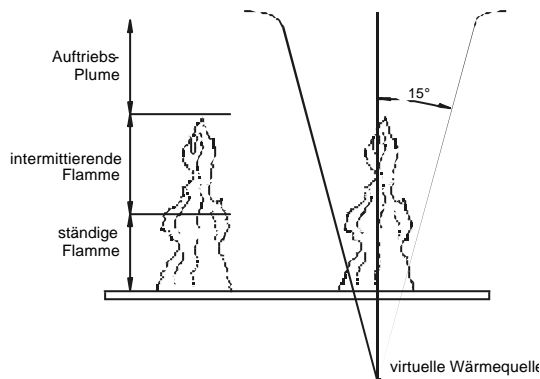
Die Ausbildung von Feuer und Rauch wird generell in drei Bereiche unterteilt:

- 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.

# Ausbildung von Flamme und Plume II

## II

Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume:



# 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.

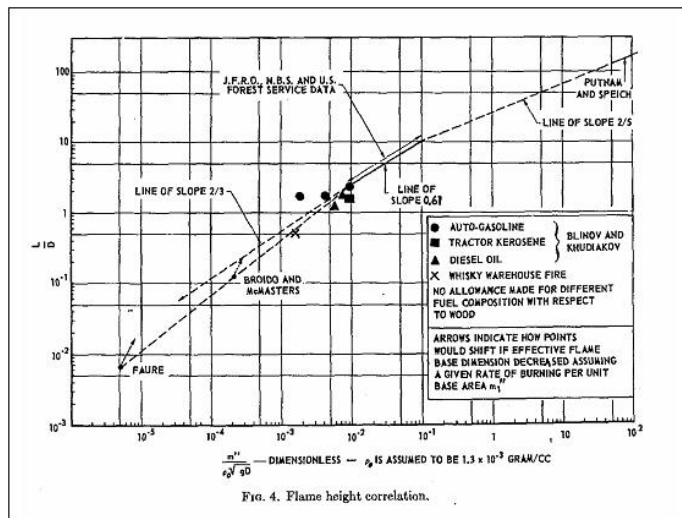
Für Holzkrippen gilt nach Thomas et al. im Bereich  $3 < l/D < 10$ :

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

Für den Bereich gilt nach Heskestad allgemein:

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

# Flammenhöhe (Thomas)



# Flammenhöhe (Thomas)

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

$$300 = \dot{h}_c''$$

$$A_{Br} = \frac{\rho D^2}{4}$$

$$\dot{h}_c = A_{Br} \dot{h}_c'' = \frac{\rho D^2}{4} \cdot \dot{h}_c''$$

$$\dot{Q} = (1 - f_{r,pl}) \dot{h}_c = (1 - f_{r,pl}) \frac{\rho D^2}{4} \cdot \dot{h}_c'' = 0,7854 \cdot (1 - f_{r,pl}) \cdot D^2 \cdot \dot{h}_c'' \quad \text{Gl.(27)}$$

Damit berechnet sich die Flammenhöhe zu:

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

# Rauchgasproduktion am Plumes

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

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

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.

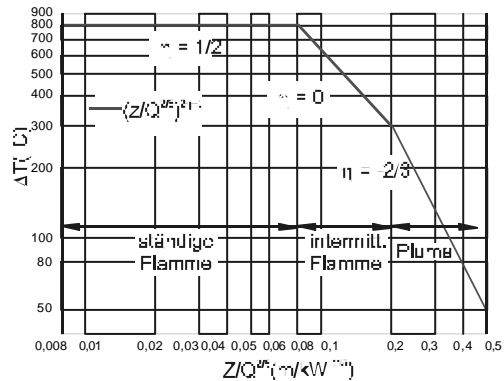
Obige Gleichung gilt für Plumehöhen von:

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

- $D_f$  Durchmesser oder Seitenlänge in m

# Temperaturerhöhung im Flammen- und Plumbereich

Temperaturerhöhung über der Zentralachse eines Feuerplumes:



## Massenströme nach Thomas/Hinkley

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:

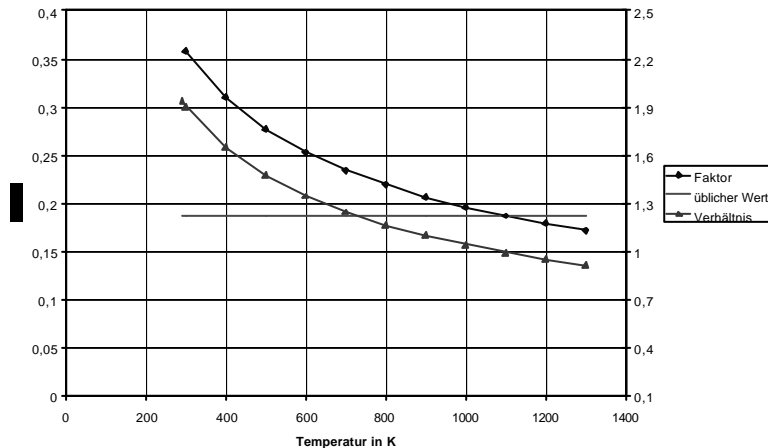
- $U$  Umfang des Brandes in m
- $\rho_0$  Dichte der Luft: 1,22 kg/m<sup>3</sup>
- $T_0$  Umgebungstemperatur: 293 K
- $T_f$  Flammentemperatur: z. B. 1100 K.

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  $200 < Q < 750 \text{ kW/m}^2$ .

# Faktor Thomas/Hinkley



# Thomas und Hinkley

$$\dot{m}_{pl} = c_{TH} \cdot \pi D \cdot (d)^{1,5}$$

$$c_{TH} = 0,19$$

für große Räume und großen Abstand Decke Brandherd

$$\dot{m}_{pl} = 0,188 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot U$$

$$U = \sqrt{4A_{Br} p}$$

$$\dot{m}_{pl} = 0,188 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi A_{Br}} \quad \text{gilt wenn } d > 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$$

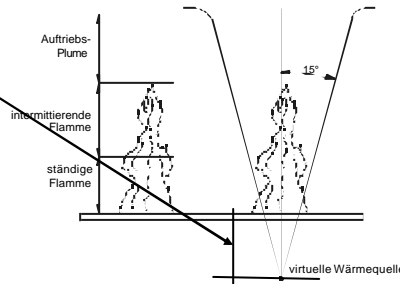
für große Räume und kleinen Abstand Decke Brandherd

$$\dot{m}_{pl} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2 \cdot \sqrt{p A_{Br}} \quad \text{gilt wenn } d < 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$$

# Zukoski

$$\dot{m}_{pl} = 0,076 \cdot Q \cdot \left( \frac{d - z_0}{Q^{0,4}} \right)^{1,667} = 0,076 \cdot (d - z_0)^{1,667} \cdot Q^{0,333}$$

$$z_0 = h_{fl} - 0,175 \cdot Q^{\frac{2}{5}}$$



# Plume in MRFC

Mit dem Rechenprogramm MRFC ist die gezielte Auswahl der o. g. 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:

$$D < 0,25 \cdot (h - z) \text{ und } h_n < 0,5 \cdot (h - z)$$

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

$$D > 0,5 \cdot (h - z) \text{ und } h_n > (h - z)$$

Mit folgenden Größen jeweils in [m]

D = äquivalenter Brandherddurchmesser

H = Raumhöhe

Z = Dicke der Rauchgasschicht

$h_n$  = Flammenhöhe

# Plume in DIN 18232

- Plumeformel nach Zukoski mit virtuellem Ursprung

$$\mathbf{d} = 2 \cdot \mathbf{h}_{fl}$$

- Lineare Interpolation zwischen Zukoski und Thomas und Hinkley

$$2 \cdot \mathbf{h}_{fl} > \mathbf{d} > \mathbf{h}_{fl}$$

- Plumeformel nach Thomas und Hinkley

$$\mathbf{h}_{fl} = \mathbf{d}$$

# Interpolation

$$\dot{m}_{pl} = f_{int} \cdot \dot{m}_{pl,Zuk} + (1 - f_{int}) \cdot \dot{m}_{pl,Tom/Hin}$$

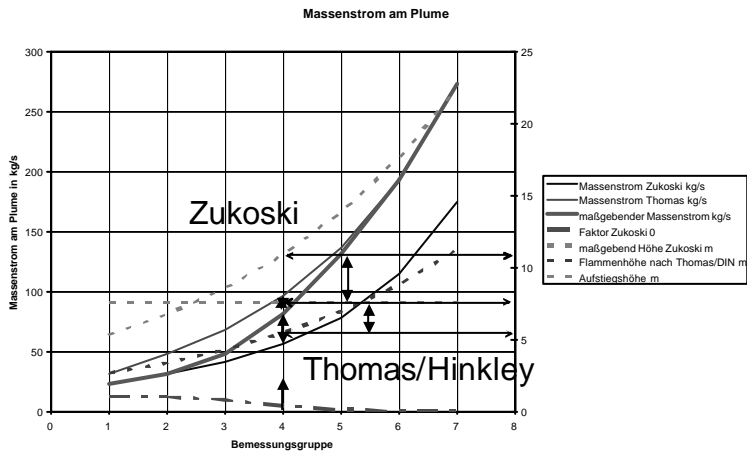
mit:

$$f_{int} = 1 \quad \text{für} \quad d > 2 \cdot h_{fl}$$
$$= 0 \quad \text{für} \quad d < h_{fl}$$

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



# Plumemassenstrom d=7,5 m



## Vergleichsrechnungen

- Mit MRFC Brandsimulationsrechnungen für 1600 m<sup>2</sup> große Rauchabschnitte
- Zuluft/Abluft einheitlich 1,5fach
- verschiedene Materialien für die Umfassungsbauteile
  - 10 cm Mineralwolle (Standardfall)
  - 10 cm Beton
  - 6 mm Stahlblech

# Bemessungsgruppen

Tabelle 1 — Bemessungsgruppen

Anzusetzende Brandentwicklungsdauer (siehe 5.6)  min	Bemessungsgruppe		
	Brandausbreitungsgeschwindigkeit		
	besonders gering	mittel <sup>1)</sup>	besonders groß
≤ 5	1	2	3
≤ 10	2	3	4
≤ 15	3	4	5
≤ 20 <sup>1)</sup>	4	5	6
> 20	5	6	7

<sup>1)</sup> Durchschnittswerte ohne besonderen Nachweis

## Brandleistung

- Brandfläche für Bemessungsgruppe 1 (BMG 1) 5 m<sup>2</sup>, verdoppelt sich jeweils für jede weitere Bemessungsgruppe;
- spezifischen Brandleistungen auf Brandfläche beträgt 300 kW/m<sup>2</sup>
- Strahlungsverlust  $f_{r,Pl}$  20 % der Brandleistung
- Verlust an Bauteile 40 % der Brandleistung
- Zuluft- zu Abluftflächen von 1,5 : 1

# Bemessungsbrände

**Tabelle B.1 — Bemessungsbrände für die Festlegungen der erforderlichen Öffnungsflächen**

Parameter	Einheit	Bemessungsgruppe (BMG)						
		1	2	3	4	5	6	7
Fläche	m <sup>2</sup>	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	kW	1500	3000	6000	12000	24000	48000	96000
Konvektiver Anteil	kW	1200	2400	4800	9600	19200	38400	76800

## Rechengang DIN Tabellen

Brandleistung

$$\dot{h}_c = A_{Br} \dot{h}_c''$$

Rauchgastemperatur

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

Druckdifferenz an  
NRA

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) r_{0,g} \quad (h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) r_{0,g}}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right) \quad \left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)}$$

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_g}}$$

# Zuluftberechnung

## Zuluftöffnungen:

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

$$\text{Druckdifferenz an Zuluftöffnungen} \quad \Delta p_{zu} = \left( \frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \Delta p_{ab}$$

$$\text{Strömungsgeschwindigkeit der Zuluft} \quad v_{zu} = \sqrt{\frac{2 \Delta p_{zu}}{\rho_0}}$$

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

## Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - A = 1500 m<sup>2</sup>
  - H = 5 m
  - d = 3,5 m
  - Brandszenarium
    - Brandausbreitung mittel
    - 10 min
    - Rauchmelder
- BMG 3 , 6 MW, 20 m<sup>2</sup> mit D = 5,046 m

# Berechnung

- Flammenhöhe  $h_{fl} = 4,619 \text{ m}$ 
  - $D = 5,046 \text{ m}$
  - Heizwert  $15\,000 \text{ kJ/kg}$
  - Dichte Luft  $1,2045 \text{ kg/m}^3$
  - $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
  - Strahlungsverlust =  $0,2$
  - spezifische Brandleistung  $300 \text{ kW/m}^2$

$$h_{fl} = 42 \cdot D \cdot \left( \frac{(1 - f_{r,pl}) \cdot \dot{h}_c''}{H_{ui,eff} \cdot r_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61}$$

# Plumemassenstrom

- Flammenhöhe > Aufstiegshöhe
  - Plume nach Thomas und Hinkley
- Plumemassenstrom  $\dot{m}_{pl} = 21,80 \text{ kg/s}$ 
  - $d = 3,5 \text{ m}$
  - $3 \cdot A_{Br}^{0,5} = 13,42$
  - $U = D \cdot p = 5,046 \cdot p = 15,85 \text{ m}$

$$\dot{m}_{pl} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2 \sqrt{p A_{Br}} \quad \text{weil } d < 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$$

## Rauchgastemperatur

- $T_g - T_0 = 105,86 \text{ K}$ 
  - $T_0 = 293 \text{ K}$
  - Strahlungsverlust 20 %
  - Verlust an Bauteile 40 %
  - $c_{p,g} = 1,04 \text{ kWs/kgK}$

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

## Druckdifferenz an RA

- $? p_{ab} = 3,546 \text{ Pa}$ 
  - $h = 5 \text{ m}$
  - $d = 3,5 \text{ m}$
  - $A_{zu}/A_{ab} = 1,5$

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

# Erforderliche RA- und Zuluftfläche

- $A_{ab} = 8,7 \text{ m}^2$
- $A_{zu} = 1,5 \cdot 8,7/0,7 = 18,65 \text{ m}^2$   
–  $c_v = 0,7$  für normale Öffnungen
- $v_{zu} = 1,387 \text{ m/s}$

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_0} \frac{T_0}{T_g}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_g}} \quad v_{zu} = \frac{A_{ab}}{A_{zu}} \cdot \sqrt{\frac{2T_0\Delta p_{ab}}{T_g\rho_0}}$$

## DIN 18232-2: 2003 natürliche Entrauchung

### Notwendige aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche $A_w$ in $\text{m}^2$ pro Rauchabschnitt

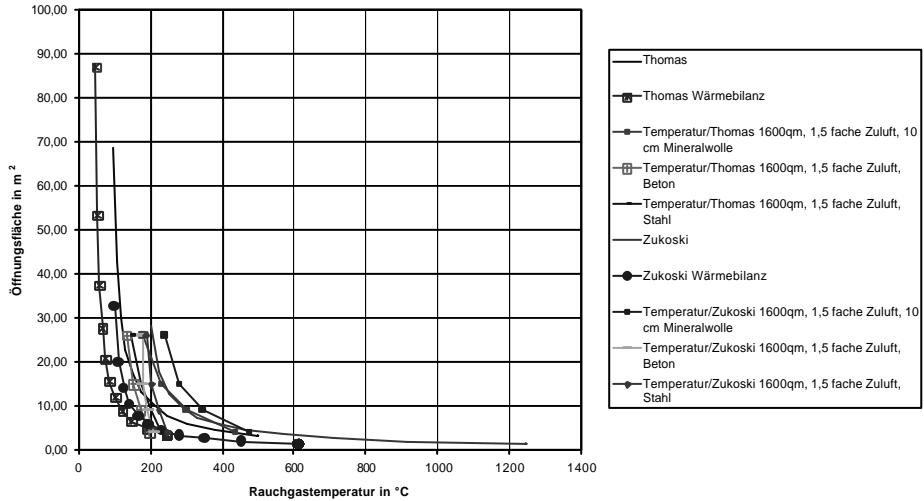
Raumhöhe in m	Höhe der Rauchschiicht in m	Höhe der raucharmen Schicht in m	1	2	3	4	5
3,00	0,50	2,50	4,8	6,2	8,2	11,0	15,4
3,50	1,00	2,50	3,4	4,4	5,8	7,8	10,6
4,00	1,50	2,50	2,8	3,6	4,7	6,4	8,9
	1,00	3,00	4,9	6,2	8,0	10,6	14,4
4,50	2,00	2,50	2,4	3,1	4,1	5,5	7,7
	1,50	3,00	4,0	5,0	6,5	8,7	11,8
	1,00	3,50	6,7	8,4	10,7	13,9	18,6
5,00	2,50	2,50	2,2	2,8	3,7	4,9	6,9
	2,00	3,00	3,4	4,4	5,7	7,5	10,2
	1,50	3,50	5,4	5,9	8,7	11,4	15,2
	1,00	4,00	8,5	10,9	13,8	17,7	23,4





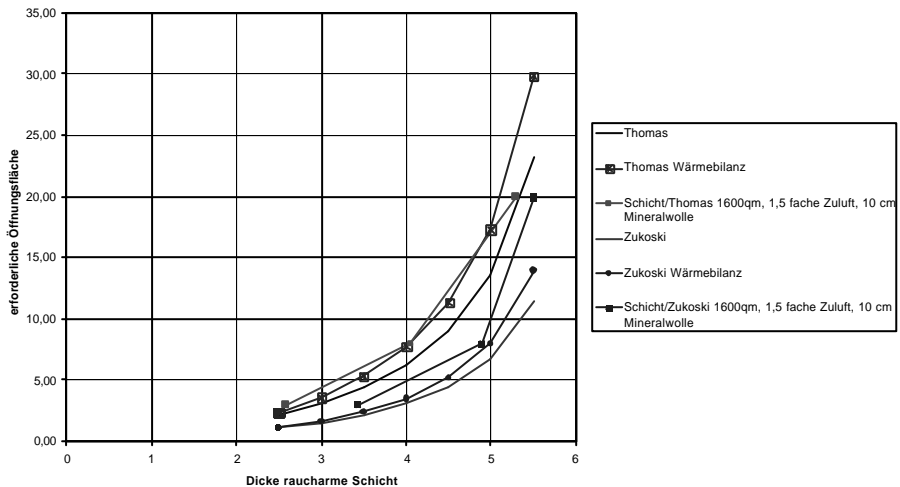
# Temperaturen, 8m Halle, BMG4

BMG 4



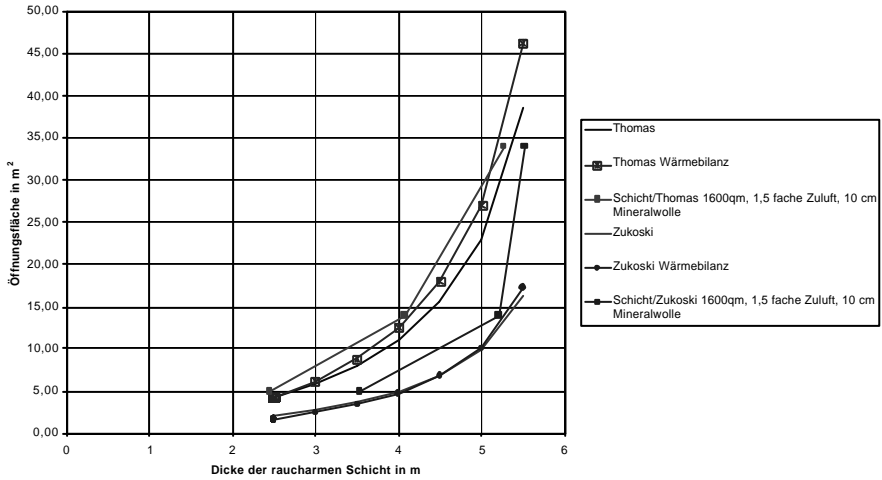
# Schichtdicken, 6 m Halle, BMG 2

BMG 2

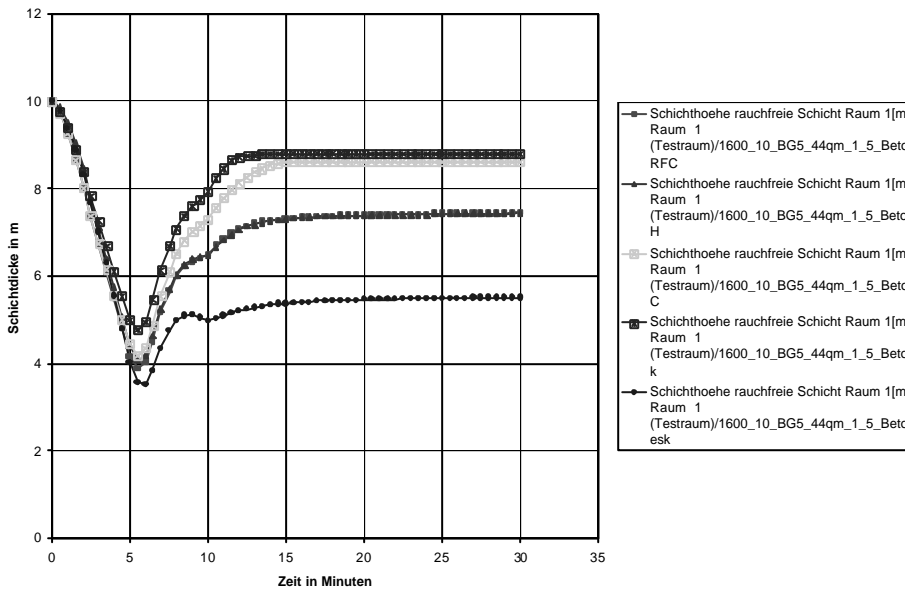


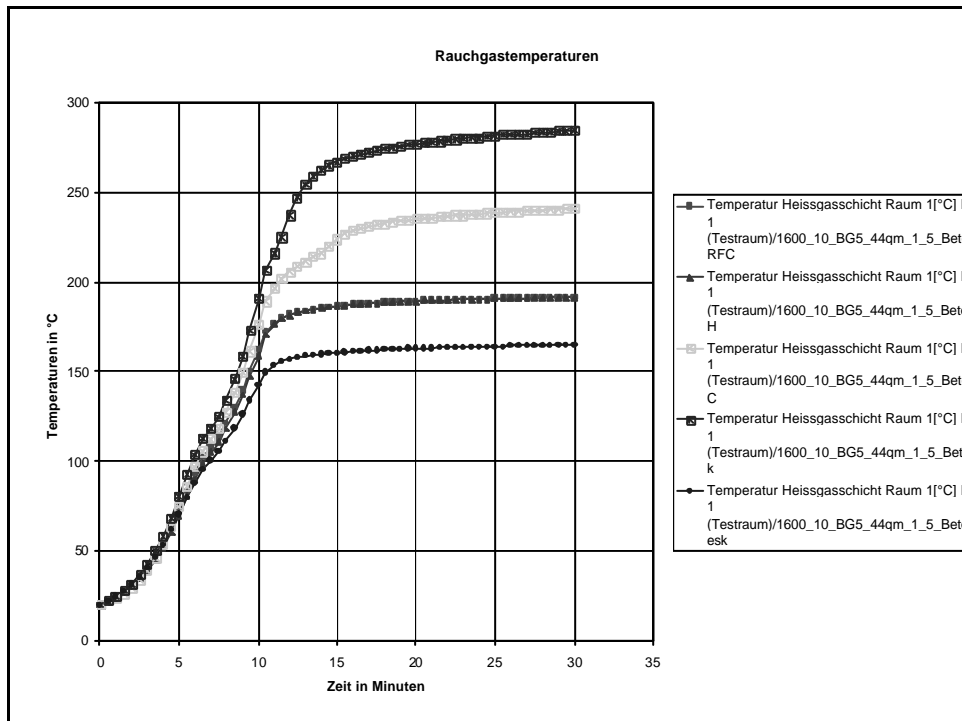
# Schichtdicken, 6 m Halle, BMG 4

BMG 4



Dicke der raucharmen Schichten





## 1.Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - $A = 1500 \text{ m}^2$
  - $H = 13 \text{ m}$
  - $d = 2,5 \text{ m}$
  - Brandszenarium
    - Brandausbreitung mittel
    - 10 min
    - rauchmeldergesteuert
- BMG 4 , 12 MW,  $40 \text{ m}^2$  mit  $D = 7,14 \text{ m}$

# Berechnung

- Flammenhöhe  $h_{fl} = 5,877 \text{ m}$ 
  - $D = 7,137 \text{ m}$
  - Heizwert  $15\,000 \text{ kJ/kg}$
  - Dichte Luft  $1,2045 \text{ kg/m}^3$
  - $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
  - Strahlungsverlust =  $0,2$
  - spezifische Brandleistung  $300 \text{ kW/m}^2$

$$h_{fl} = 42 \cdot D \cdot \left( \frac{(1 - f_{r,pl}) \cdot \dot{h}_c''}{H_{ui,eff} \cdot r_0 (gD)^{1/2}} \right)^{0,61}$$

# Plumemassenstrom

- Flammenhöhe > Aufstiegshöhe
  - Plume nach Thomas und Hinkley
- Plumemassenstrom  $\dot{m}_{pl} = 18,61 \text{ kg/s}$ 
  - $d = 2,5 \text{ m}$
  - $3 \cdot A_{Br}^{0,5} = 18,97$
  - $U = D \cdot p = 7,14 \cdot p = 22,42 \text{ m}$

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,188 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot U$$

weil  $d < 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$

## Rauchgastemperatur

- $T_g - T_0 = 248,00 \text{ K}$ 
  - $T_0 = 293 \text{ K}$
  - Strahlungsverlust 20 %
  - Verlust an Bauteile 40 %
  - $c_{p,g} = 1,04 \text{ kWs/kgK}$

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

## Druckdifferenz an RA

- $? p_{ab} = 45,84 \text{ Pa}$ 
  - $h = 13 \text{ m}$
  - $d = 2,5 \text{ m}$
  - $A_{zu}/A_{ab} = 1,5$

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) r_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} = \frac{(h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) r_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)}$$

## Erforderliche RA- und Zuluftfläche

- $A_{ab} = 2,41 \text{ m}^2$
- $A_{zu} = 1,5 \cdot 2,41/0,7 = 5,16 \text{ m}^2$ 
  - $c_v = 0,7$  für normale Öffnungen
- $v_{zu} = 4,280 \text{ m/s}$

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_0} \frac{T_0}{T_g}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_g}} \quad v_{zu} = \frac{A_{ab}}{A_{zu}} \cdot \sqrt{\frac{2T_0\Delta p_{ab}}{T_g\rho_0}}$$

## 2. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - $A = 1500 \text{ m}^2$
  - $H = 13 \text{ m}$
  - $d = 7,5 \text{ m}$
  - Brandszenarium
    - Brandausbreitung mittel
    - 10 min
    - rauchmeldergesteuert
- BMG 4 , 12 MW, 40 m<sup>2</sup> mit  $D = 7,14 \text{ m}$

# Plumemassenstrom

- Flammenhöhe  $h_{fl} = 5,877$  m (wie 1. Beispiel)
- $2 \cdot h_{fl} > 7,5 > h_{fl}$ 
  - $f_{int} = (7,5 - 5,877) / 5,877 = 0,276$
- Plume interpoliert
- $m_{pl,T} = 96,70$  kg/s (Thomas/Hinkley) ( $d = 7,5$  m)
- $m_{pl,Z} = 56,92$  kg/s (Zukoski)
  - $Q = (1 - 0,20) \cdot 12000 = 9600$  kW
- $m_{pl} = 0,276 \cdot 56,92 + (1 - 0,276) \cdot 96,70 = 85,72$  kg/s

$$\dot{m}_{pl} = 0,076 \cdot Q \cdot \left( \frac{d - z_0}{Q^{0,4}} \right)^{1,667} = 0,076 \cdot (d - z_0)^{1,667} \cdot Q^{0,333}$$
$$z_0 = h_{fl} - 0,175 \cdot Q^{\frac{2}{5}}$$

# Rauchgastemperatur

- $T_g - T_0 = 53,84$  K (248,00 K)
  - $T_0 = 293$  K
  - Strahlungsverlust 20 %
  - Verlust an Bauteile 40 %
  - $c_{p,g} = 1,04$  kW/kgK

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

## Druckdifferenz an RA

- ?  $p_{ab} = 7,335 \text{ Pa}$  (45,84 Pa)
  - $h = 13 \text{ m}$
  - $d = 7,5 \text{ m}$
  - $A_{zu}/A_{ab} = 1,5$

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) r_{0,g} - (h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) r_{0,g}}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right) - \left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)}$$

## Erforderliche RA- und Zuluftfläche

- $A_{ab} = 22,19 \text{ m}^2$  (2,41 m<sup>2</sup>)
- $A_{zu} = 1,5 \cdot 22,19 / 0,7 = 47,54 \text{ m}^2$  (5,16 m<sup>2</sup>)
  - $c_v = 0,7$  für normale Öffnungen
- $v_{zu} = 2,138 \text{ m/s}$  (4,07 m/s)

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_{0,g} \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_g}} \quad v_{zu} = \frac{A_{ab}}{A_{zu}} \cdot \sqrt{\frac{2T_0 \Delta p_{ab}}{T_g \rho_0}}$$



## 3. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - $A = 1500 \text{ m}^2$
  - $H = 13 \text{ m}$
  - $d = 12 \text{ m}$
  - Brandszenarium
    - Brandausbreitung mittel
    - 10 min
    - rauchmeldergesteuert
- BMG 4 , 12 MW, 40 m<sup>2</sup> mit  $D = 7,14 \text{ m}$

## Plumemassenstrom

- Flammenhöhe  $h_{fl} = 5,877 \text{ m}$  (1./2. Beispiel)
- $2 \cdot h_{fl} < 12$ 
  - $f_{int} = 1,0$
- $\dot{m}_{pl} = 115,75 \text{ kg/s}$  (Zukoski) (85,72 kg/s)
  - $Q = (1-0,20) \cdot 12000 = 9600 \text{ kW}$

$$\dot{m}_{Pl} = 0,076 \cdot Q \cdot \left( \frac{d - z_0}{Q^{0,4}} \right)^{1,667} = 0,076 \cdot (d - z_0)^{1,667} \cdot Q^{0,333}$$

$$z_0 = h_{fl} - 0,175 \cdot Q^{\frac{2}{5}}$$

## Rauchgastemperatur

- $T_g - T_0 = 39,87 \text{ K}$  (53,84 K)
  - $T_0 = 293 \text{ K}$
  - Strahlungsverlust 20 %
  - Verlust an Bauteile 40 %
  - $c_{p,g} = 1,04 \text{ kWs/kgK}$

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

## Druckdifferenz an RA

- $? p_{ab} = 1,017 \text{ Pa}$  (7,335 Pa)
  - $h = 13 \text{ m}$
  - $d = 12 \text{ m}$
  - $A_{zu}/A_{ab} = 1,5$

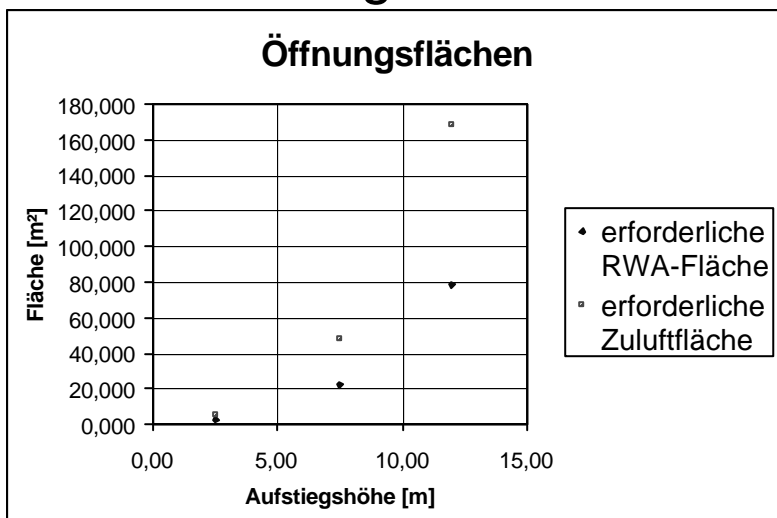
$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) r_{0g}}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} = \frac{(h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) r_{0g}}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)}$$

## Erforderliche RA- und Zuluftfläche

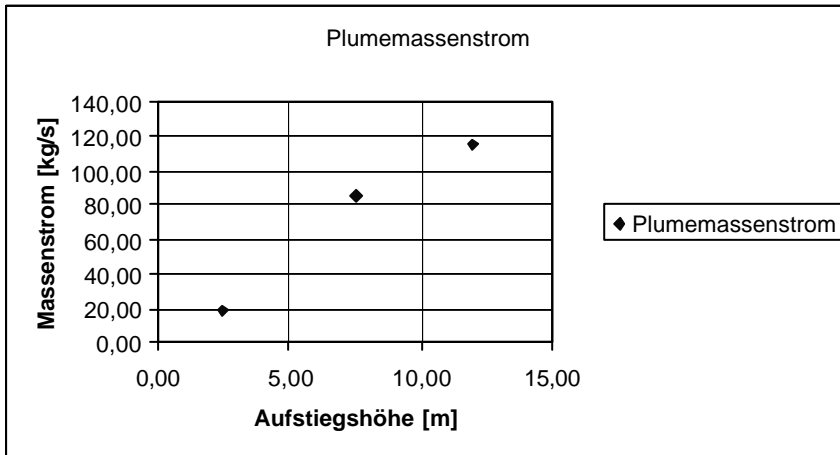
- $A_{ab} = 78,80 \text{ m}^2$  (22,19 m<sup>2</sup>)
- $A_{zu} = 1,5 \cdot 78,80 / 0,7 = 168,86 \text{ m}^2$  (47,54 m<sup>2</sup>)  
–  $c_v = 0,7$  für normale Öffnungen
- $v_{zu} = 0,813 \text{ m/s}$  (2,14 m/s)

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_0} \frac{T_0}{T_g}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} r_g}} \quad v_{zu} = \frac{A_{ab}}{A_{zu}} \cdot \sqrt{\frac{2T_0\Delta p_{ab}}{T_g\rho_0}}$$

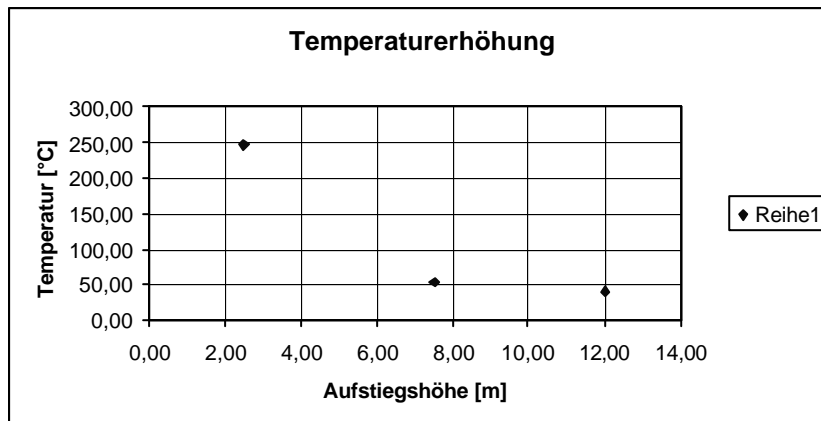
## Öffnungsflächen



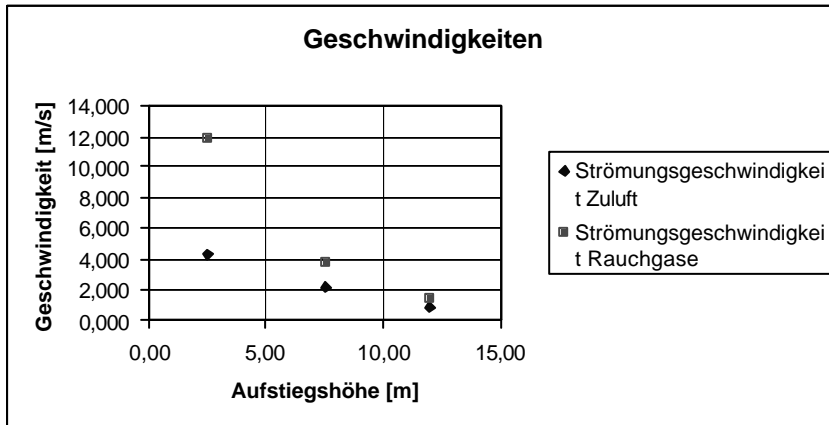
# Plumemassenstrom



# Temperaturerhöhung



# Geschwindigkeiten



## Beispiel Erleichterung A

- Raum 9 m hoch
- $A = 2600 \text{ m}^2$
- Aufstiegshöhen 2,5 , 4 und 8 m
- BMG 3 , 6 MW,  $20 \text{ m}^2$  mit  $D = 5,05 \text{ m}$
- Voraussetzungen
  - $H=9 \text{ m}$
  - Rauchschürzen mind. 1 m alle  $1600 \text{ m}^2$

# Berechnung

## Normalbemessung

geplante Dicke der raucharmer Schicht [m]	Höhe der Rauchschrüzen [m]	RA-Flächen gesamt aerodynamisch [m <sup>2</sup> ]	Zuluftflächen [m <sup>2</sup> ]
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

## Flächenerhöhung

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

Fläche der RA entspricht der Standardlösung, mit einer Rauchschrüze mit mindestens 1 m Höhe

## Beispiel Erleichterungen A und B

- Halle 9 m hoch
- Aufstiegshöhen 2,5 , 4 und 8 m
- BMG 3 , 6 MW, 20 m<sup>2</sup> mit D = 5,02 m
- A = 6500 m<sup>2</sup>
- Voraussetzungen
  - H>9 m
  - Rauchschrüzen mind. 1 m alle 1600 m<sup>2</sup>

# Erleichterung A

Aufstiegshöhe [m]	Anzahl / Fläche der Rauchabschnitte	RA-Flächen aerodynamisch [m <sup>2</sup> ]	Zuluftflächen [m <sup>2</sup> ]
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	<b>9,94</b>	9,94
4	4/1625	<b>27,12</b>	27,12
8	4/1625	<b>157,03</b>	157,03
2,5	5/1300	11,30	9,94
4	5/1300	30,82	27,12
8	5/1300	178,44	157,03

## Erleichterung B

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

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

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

# Zuluft bei gegebener RA-Fläche

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

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

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

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

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

## 4. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - $A = 1500 \text{ m}^2$
  - $H = 12 \text{ m}$
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $A_w = 15 \text{ m}^2$  (1 % der Grundfläche)
  - BMG 4 , 12 MW, 40 m<sup>2</sup> mit  $D = 7,14 \text{ m}$

## Plumemassenstrom

- Flammenhöhe (5,9 m) > Aufstiegshöhe
  - Plume nach Thomas und Hinkley
- Plumemassenstrom  $\dot{m}_{pl} = 60,73 \text{ kg/s}$ 
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $3 \cdot A_{Br}^{0,5} = 18,97$
  - $U = D \cdot p = 7,14 \cdot p = 22,42 \text{ m}$

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot U \quad \text{weil } d < 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$$



## Rauchgastemperatur

- $T_g - T_0 = 76 \text{ K}$
- $T_0 = 293 \text{ K}$ 
  - Strahlungsverlust 20 %
  - Verlust an Bauteile 40 %
  - $c_{p,g} = 1,04 \text{ kWs/kgK}$

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

## Druckdifferenz an RA

- $? p_{ab} = 8,569 \text{ Pa}$ 
  - $h = 12 \text{ m}$
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $A_w = 15 \text{ m}^2$

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

# Zuluftfläche

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

$$\Delta p_{\text{ab}} = 8,569 \text{ Pa} \leq 15,819 \text{ Pa}$$

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

$$A_{\text{zu}} = \frac{\dot{m}_{\text{pl}} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{\text{zu}} \rho_0}} = \frac{60,63}{\sqrt{2 \cdot 7,250 \cdot 1,2045}} = 14,36 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{zu}}/A_{\text{ab}} = f_{\text{zu/ab}} = 14,36/15 = 0,957$$

$$v_{\text{zu}} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{\text{zu}}}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7,25}{1,2045}} = 3,161 \text{ m/s}$$

# RA-Fläche bei Zuluftfläche

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

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

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

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

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

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

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

## 5. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - $A = 1500 \text{ m}^2$
  - $H = 12 \text{ m}$
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $A_{zu} = 21,5 \text{ m}^2$  geometrisch,  $15 \text{ m}^2$  wirksam (Tore)
  - Torhöhe  $4 \text{ m}$
  - BMG 4 , 12 MW,  $40 \text{ m}^2$  mit  $D = 7,14 \text{ m}$

## Plumemassenstrom

- Flammenhöhe ( $5,9 \text{ m}$ ) > Aufstiegshöhe
  - Plume nach Thomas und Hinkley
- Plumemassenstrom  $\dot{m}_{pl} = 60,73 \text{ kg/s}$ 
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $3 \cdot A_{Br}^{0,5} = 18,97$
  - $U = D \cdot p = 7,14 \cdot p = 22,42 \text{ m}$

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot U \quad \text{weil } d < 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$$

## Rauchgastemperatur

- $T_g - T_0 = 76 \text{ K}$
- $T_0 = 293 \text{ K}$ 
  - Strahlungsverlust 20 %
  - Verlust an Bauteile 40 %
  - $c_{p,g} = 1,04 \text{ kW/s/kgK}$

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

## Druckdifferenz an Toren

- $? p_{zu} = 6,804 \text{ Pa}$ 
  - $h = 12 \text{ m}$
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $A_{zu} = 15 \text{ m}^2$

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

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

# RA-Fläche

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

$$\Delta p_{\text{zu}} = 6,804 \text{ Pa} \leq 15,819 \text{ Pa}$$

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

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

$$A_{\text{zu}}/A_{\text{ab}} = f_{\text{zu/ab}} = 15/14,36 = 1,027$$

# RA bei Zuluftgeschwindigkeit

$$A_{\text{zu}} = \frac{\dot{m}_{\text{pl}} + \dot{R}}{2v_{\text{zu}} r_0} \quad \Delta p_{\text{zu}} = \frac{\left( \frac{\dot{m}_{\text{pl}} + \dot{R}}{A_{\text{zu}}} \right)^2}{2r_0}$$

$$\dot{m}_{\text{pl}} + \dot{R} = A_{\text{zu}} \sqrt{2\Delta p_{\text{zu}} r_0}$$

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

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

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

## 6. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - $A = 1500 \text{ m}^2$
  - $H = 12 \text{ m}$
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $v_{zu} = 1 \text{ m/s}$  (Tore)
  - Torhöhe  $4 \text{ m}$
  - BMG 4 , 12 MW,  $40 \text{ m}^2$  mit  $D = 7,14 \text{ m}$

## Plumemassenstrom

- Flammenhöhe ( $5,9 \text{ m}$ ) > Aufstiegshöhe
  - Plume nach Thomas und Hinkley
- Plumemassenstrom  $\dot{m}_{pl} = 60,73 \text{ kg/s}$ 
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $3 \cdot A_{Br}^{0,5} = 18,97$
  - $U = D \cdot p = 7,14 \cdot p = 22,42 \text{ m}$

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = 0,21 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot U \quad \text{weil } d < 3 \cdot A_{Br}^{0,5}$$

# Rauchgastemperatur

- $T_g - T_0 = 76 \text{ K}$
- $T_0 = 293 \text{ K}$ 
  - Strahlungsverlust 20 %
  - Verlust an Bauteile 40 %
  - $c_{p,g} = 1,04 \text{ kWs/kgK}$

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

# Druckdifferenz an Toren

- $? p_{zu} = 0,6022 \text{ Pa}$ 
  - $h = 12 \text{ m}$
  - $d = 5,5 \text{ m}$
  - $v_{zu} = 1 \text{ m/s}$

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

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

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

## RA-Fläche

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

$$\Delta p_{\text{zu}} = 0,6022 \text{ Pa} \leq 15,819 \text{ Pa}$$

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

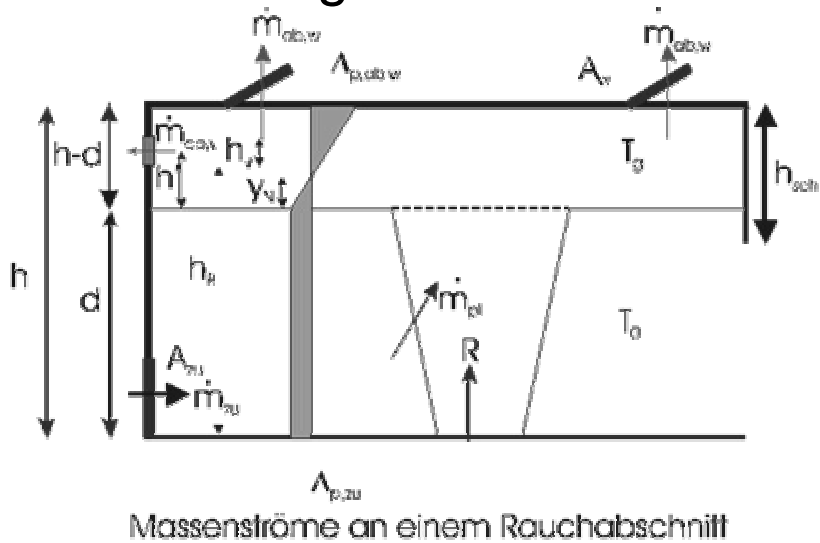
$$A_{\text{ab}} = \frac{\dot{m}_{\text{pl}} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{\text{ab}} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{60,63}{\sqrt{2 \cdot 15,217 \cdot 1,2045 \cdot \frac{293}{293 + 76}}} = 11,24 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{zu}} / A_{\text{ab}} = f_{\text{zu/ab}} = 50,419 / 11,24 = 4,49$$

## NRA in Außenwänden

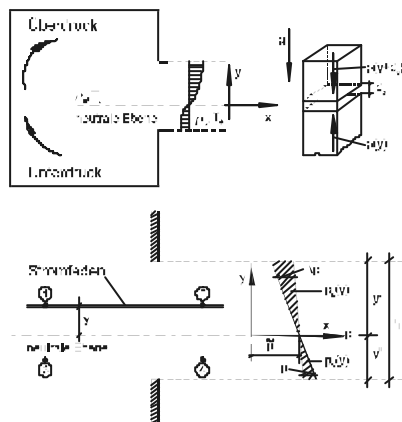


# Berechnung in Außenwänden



# Strömungsmodell der ein- bzw. ausströmenden Gase

Gaswechsel des Wärmebilanzmodells



# Massenströme an vertikalen Öffnungen

Für die austretende Gasmenge erhält man für eine Öffnung der Breite  $b_D$  und der Höhe  $h_D$ :

$$\dot{m}_g = c \cdot b_D \cdot \rho_g \int_0^{y^0} v_{gB} \cdot dy$$

Rauchgasabfuhr:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot c \cdot b_D \cdot \rho_g \left( 2 \cdot g \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho_g} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot y^0 \frac{3}{2}$$

Luftzufuhr:

$$\dot{m}_l = \frac{2}{3} \cdot c \cdot b_D \cdot \rho_0 \left( 2 \cdot g \cdot \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_0} \right) \right)^{\frac{1}{2}} \cdot y^0 \frac{3}{2}$$

## Berechnung

- Voraussetzungen
  - $h_B = d + h' - 0,5 \cdot h_v$
  - $A_{zu}$  ist bekannt
  - $b_v = A_v / h_v$  (Höhenlage liegt fest)
  - $\Delta p(y) = g \cdot (\rho_0 - \rho_g) \cdot y - \Delta p_{zu} = \rho_0 \cdot g \cdot y \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_g} \right) - \Delta p_{zu}$

# Berechnung

$$y_N = \frac{\Delta p_{zu}}{g \mathbf{r}_0 \frac{T_g - T_0}{T_g}} \quad \Delta p_{zu} = \frac{\left( \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_{zu}} \right)^2}{2 \mathbf{r}_0}$$

$$\dot{m}_{ab,v} = b \cdot \mathbf{r}_g \cdot \int_{h_B - d - y_N}^{h_B + h_v - d - y_N} v_g \, dy$$

$$\dot{m}_{ab,v} = b \cdot \mathbf{r}_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0}} \cdot \int_{h_B - d - y_N}^{h_B + h_v - d - y_N} \sqrt{y} \, dy$$

$$\dot{m}_{ab,v} = \frac{2}{3} b \cdot \mathbf{r}_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0}} \cdot \left[ (h_B + h_v - d - y_N)^{1.5} - (h_B - d - y_N)^{1.5} \right]$$

# Erforderliche Breite

$$b = \frac{3(\dot{m}_{pl} + \dot{R})}{2 \mathbf{r}_g \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0}} \cdot \left[ (h_B + h_v - d - y_N)^{1.5} - (h_B - d - y_N)^{1.5} \right]}$$

# Vergleich mit Normvorschlag

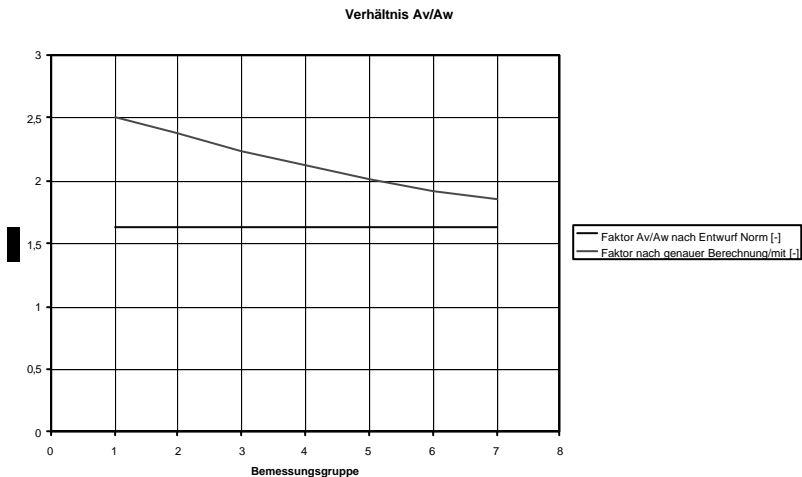
$$A_v = A_w \cdot \left( \frac{h-d}{h'} \right)^{0,5}$$

$$\dot{m}_{ab,w} = A_w \cdot r_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0} (h-d-y_N)}$$

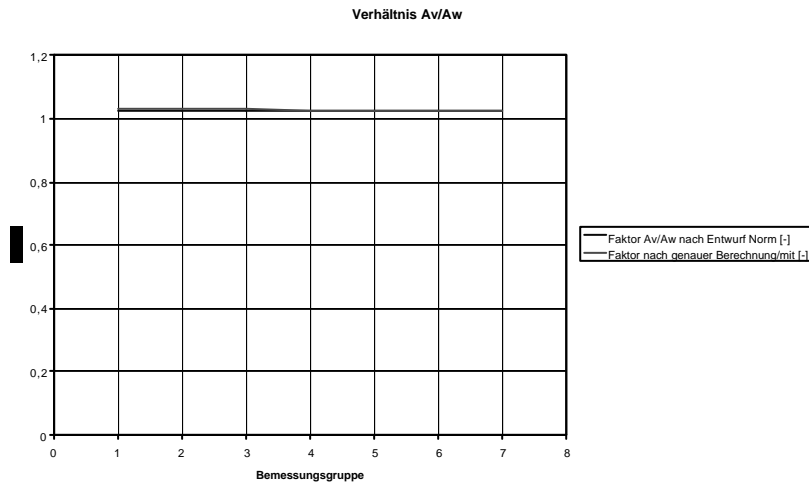
$$\frac{2}{3} b \cdot [(h_B + h_v - d - y_N)^{1,5} - (h_B - d - y_N)^{1,5}] = A_w \cdot \sqrt{(h-d-y_N)}$$

$$\frac{A_v}{A_w} = \frac{b \cdot h}{A_w} \cdot \frac{1,5 h \sqrt{(h-d-y_N)}}{[(h_B + h_v - d - y_N)^{1,5} - (h_B - d - y_N)^{1,5}]}$$

10 m Halle, 50 cm von 6,0 bis 6,5



## 10 m Halle, 50 cm von 9,5 bis 10 m

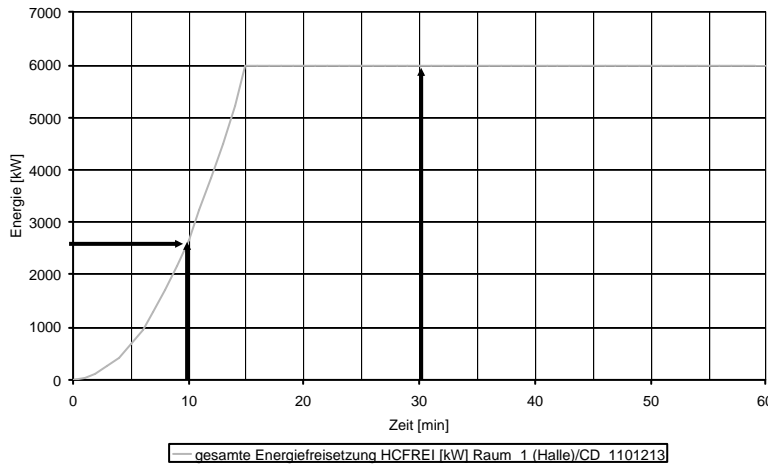


## Berechnungen nach Zonenmodell und Handrechnung

- Sporthalle
  - 43 m lang
  - 35 m breit
  - 11,10 m hoch
- Nach 10 min auf +9,10 m raucharm
- Bis 30 min auf +5,60 m raucharm

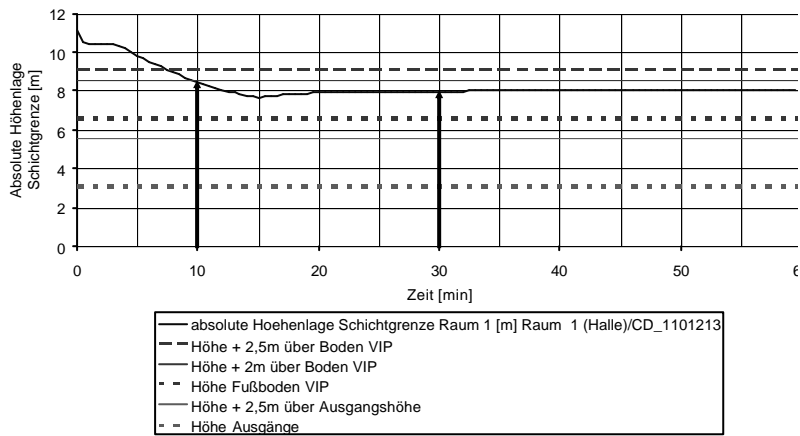
# Brandszenarium

Energiefreisetzung [kW]



# Simulationsergebnis

Absolute Höhenlage Schichtgrenze [m]



## Überprüfung durch Handrechnung

- Nach 10 min Schicht bei 8,6 m, dabei wird Brandleistung von ca. 3 MW (BMG 2) erreicht
- Nach 30 min Schicht bei 8,0 m, Brandleistung 6 MW

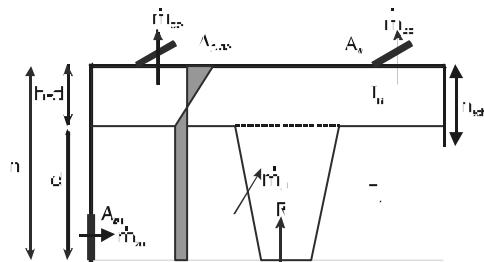
## Nach Tabelle DIN 18232-2

- BMG 2 (nach 10 min)
  - Höhe 11,0 m und  $d = 9,0$  m nach Tabelle 3 der DIN 18 232-2 eine NRA-Fläche von  $23,5 \text{ m}^2$ .
  - Die Zulufffläche beträgt  $35,25 \text{ m}^2$  (Faktor 1,5).
  - Zulufffläche auf Verhältnis von 1:1 der erforderlichen NRA-Fläche reduziert, NRA-Fläche um 25 % erhöht und die Zulufffläche um 25 % reduziert werden.
  - NRA- und Zulufffläche von jeweils  $29,4 \text{ m}^2$ .
  - Keine Interpolation zulässig

# Nach Tabelle DIN 18232-2

- BMG 3 (nach 30 min)
  - Höhe 11,0 m und d = 8,0 m nach Tabelle 3 der DIN 18 232-2 eine NRA-Fläche von 20,6 m<sup>2</sup>.
  - Die Zulufffläche beträgt 30,9 m<sup>2</sup> (Faktor 1,5).
  - Zulufffläche auf Verhältnis von 1:1 der erforderlichen NRA-Fläche reduziert, NRA-Fläche um 25 % erhöht und die Zulufffläche um 25 % reduziert werden.
  - NRA- und Zulufffläche von jeweils 23,17 m<sup>2</sup>.
  - Keine Interpolation zulässig

## Grundlagen Handrechnung



Wasserröhre an einem Laubschicht

$$\Delta p_{ab} = \frac{(h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) r_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{su}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} = \frac{(h-d) \left(\frac{T_g - T_0}{T_g}\right) r_0 g}{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{su}}\right)^2 \frac{T_0}{T_g}\right)} \quad \text{mit} \quad (T_g - T_0) = \frac{(1 - f_{r,pl} - f_w) A_B h_c'}{(\dot{m}_{pl} + \dot{R}) c_{pg}}$$

$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} r_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2 \Delta p_{ab} r_g}}$$



# Grundlagen für Handrechnung

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)	$A_{Br} = 10 \text{ m}^2$

## Vergleich Tabelle DIN mit Handrechnung

- für die Aufstiegshöhe von 9,0 m in der 11,0 m hohen Halle
- Plumemassenstrom 41,9 kg/s.
- ergibt eine erforderliche NRA-Fläche von 23,5 m<sup>2</sup>.
- genau der Wert der Tabelle 3 in DIN 18 232-2.

## Handrechnung kleinere Höhe

- Für tatsächliche Aufstiegshöhe von 8,6 m und BMG 2
- Massenstrom am Plume = 38,94 kg/s.
- für ein Verhältnis von Zuluft-/Abluftflächen von 1,5
- erforderliche NRA-Fläche von 18,57 m<sup>2</sup>.
- Zuluftfläche von 27,85 m<sup>2</sup>
- Für Verhältnis von Zuluft/Abluftflächen von 1:1
- Zuluft- und Abluftfläche jeweils 21,65 m<sup>2</sup>.

## Handrechnung BMG 2

- nach 15 min maximale Brandleistung von 6 000 kW
- bei Brandsimulation Dicke der raucharmen Schicht von 8,0 m
- 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
- erforderliche Öffnungsfläche im Dach von 20,6 m<sup>2</sup>
- Zuluftfläche von 30,9 m<sup>2</sup>.
- Für Verhältnis von 1:1 ergeben sich nach dem Näherungsverfahren in der DIN 18 232-2 Zuluft- und Abluftflächen von jeweils 25,75 m<sup>2</sup>.

# Handrechnung BMG 3

- Nach 15 min maximale Brandleistung 6MW (BMG 3)
- Massenstrom am Plume (einschließlich der Abbrandrate) für die Aufstiegshöhe von 8,0 m 53,91 kg/s.
- Berechnung nach den Handrechenformeln ergibt in der 11,0 m hohen Halle eine
- erforderliche NRA-Fläche von 20,6 m<sup>2</sup>. (genau der Wert der Tabelle 3 in DIN 18 232-2)
- In der 11,2 m hohen Halle für ein Verhältnis von Zuluft-/Abluftflächen von 1,5
- erforderliche NRA-Fläche von 19,95 m<sup>2</sup>.
- Zuluftfläche von 29,93 m<sup>2</sup>.
- Wenn ein Verhältnis für Zuluft/Abluftflächen von 1:1 gewählt wird errechnen sich Zuluft- und Abluftfläche zu 23,17 m<sup>2</sup>.

## Übersicht

		$A_{zu}/A_{ab}$	NRA- Öffnung m <sup>2</sup>	Zuluft- fläche m <sup>2</sup>
Brandsimulation			<b>25,00</b>	<b>25,00</b>
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
Raucharme Schicht nach 15 min bei d = 8,0 m, Brand- leistung 6 000 kW	Handrechnung, h = 11,2 m	1,0	<b>21,65</b>	<b>21,65</b>
	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	<b>23,17</b>	<b>23,17</b>

# Zusammenfassung

- Näherungsformel durch Wärmebilanz kalibriert
- Erleichterungen führen zu großen Flächen
- Niedrige Rauchschrägen liefern große Flächen und große Dicken der raucharmen Schichten
- Verfahren für Wandentrauchung für Windstille im Näherungsverfahren möglich, Berechnung wurde gezeigt
- Andere Lösungen sind möglich, wenn Wärmebilanzrechnungen durchgeführt werden

## Bemessungsgruppen nach DIN 18232 Teil 5

Bemessungs-Gruppe (BG)	BG 1	BG 2	BG 3	BG 4	BG 5
max. Brandfläche [m <sup>2</sup> ]	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

# Luftbedarf und Rauchgasmengen bei der Verbrennung

Praktische Menge trockener Verbrennungsluft:

$$L = \lambda \cdot L_{\min}$$

Darin sind:

- L tatsächlicher Luftbedarf in kg Luft/ kg Brennstoff  
 $\lambda$  Luftüberschusszahl.

Gesamte Rauchgasmenge:

$$G = \lambda \cdot L_{\min} \cdot (1 + x_D) + (1 - a)$$

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.