

# Ermittlung der RWA-Flächen nach DIN 18232-2 mit Beispielen

U. Max  
AGB

## Gliederung

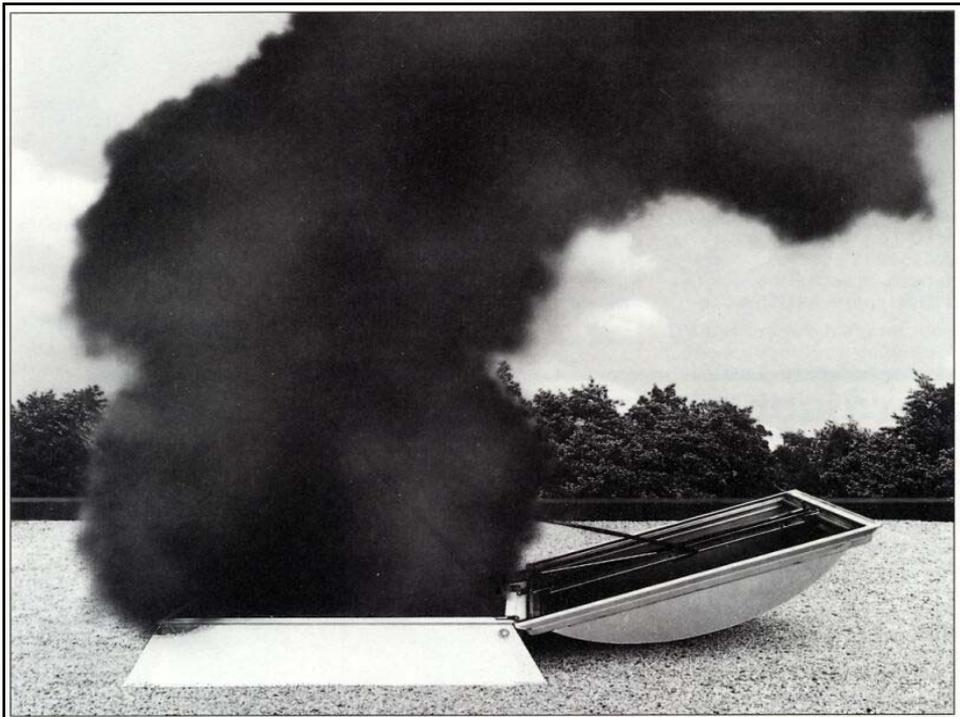
- Einführung
- Grundlagen der Berechnung
- Bemessungsbrände
- Zuluft
- Bemessungsregeln
- Beispiele
- NRA in Außenwänden

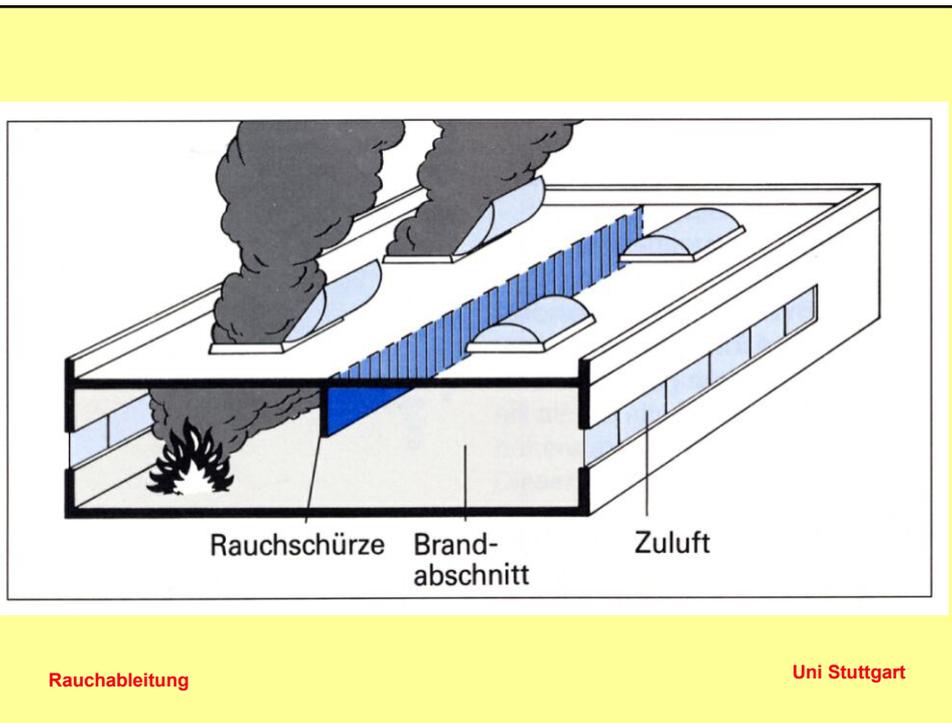
DIN 18232-2: 2003 natürliche Entrauchung

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>

Rauchableitung

Uni Stuttgart

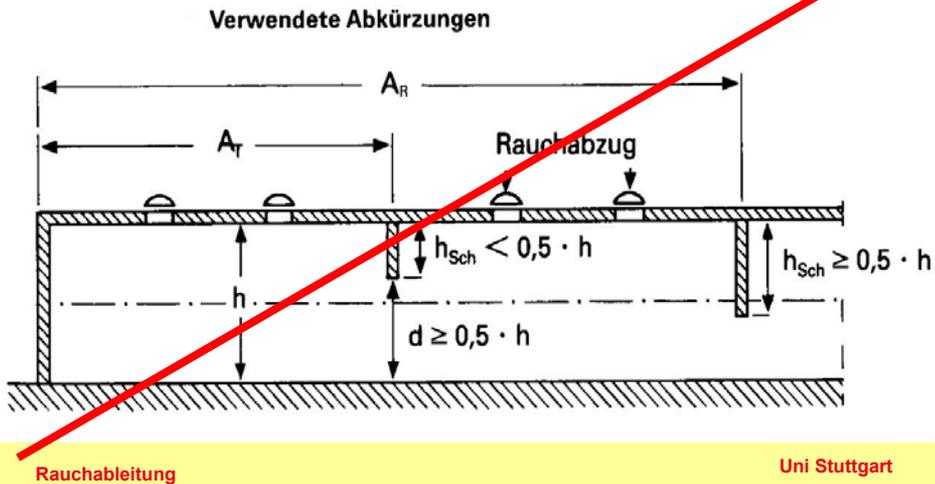




## DIN 18232-2 (11/89)

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

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



## Grundlagen des neuen Entwurfs

- Schichtdicke  $> 2,5$  m (M IndBauRL)
- $A_h$  [m<sup>2</sup>] nicht mehr  $a_h$  [%]
- Hallenhöhen von 4 bis 15 m
- Rauchschürzen bei  $A > 1600(2000)$  m<sup>2</sup>
- Plumeformeln nach Zukoski und Thomas/Hinkley mit Übergang
- Berechnungen mit MRFC kalibriert

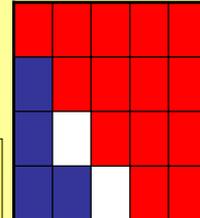
Wesentliche Änderungen von **Nov 1989** zu **Juni 03**

Rauchfreihaltung, raucharm

Berücksichtigung unterschiedliche **Plumemodelle**

Schnittstelle

zu den **Brandschutz-Ingenieurmethoden**



Projektierung der natürlichen Entrauchung aller Räume, außer von Treppenträumen

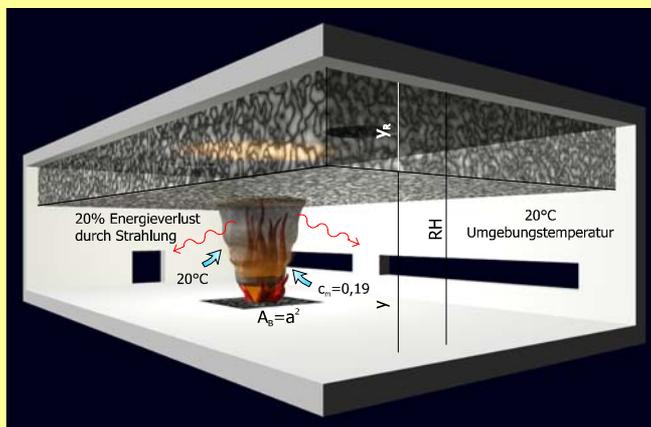
Nur sprachliche Anpassung keine Reduzierung der Qualität (Sichtweite, Schadstoffe)

Aufbauend auf der DIN 18232-2 können komplexere Raumkubaturen projiziert werden

Rauchableitung

gart

## Beispielhafte Darstellung eines Brandes durch ein Zonenmodell



Rauchableitung

Uni Stuttgart

# 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 Brandnebenscheinungen im Brandraum freigesetzte Energie
- $\dot{h}_l$  die durch den Gaswechsel (Konvektion durch Öffnungen) pro Zeiteinheit abströmende Energie der Rauchgase (Konvektionsenergie)
- $\dot{h}_o$  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)

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# 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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Modellierung der Energiebilanz im Brandraum I

Energiebilanz für die heiße Gasschicht des Raumes i:

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

In der Energiebilanz sind folgende Terme enthalten:

Energieabflüsse:

$$\dot{h}_{ab 1,i} = \sum \dot{h}_{s,ij} + \sum \dot{h}_{01,ij} + \sum \dot{h}_{wn,i} + \sum \dot{h}_{sv1,i} + \dot{h}_r$$

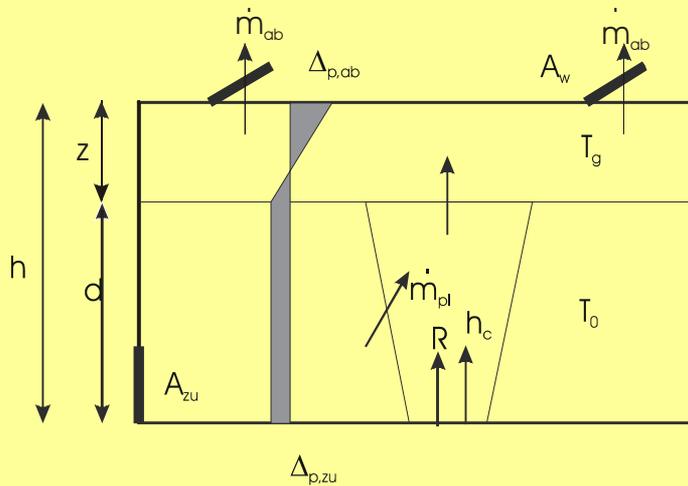
Energiezuflüsse:

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

## 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

# Druckverteilung



Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Grundlagen

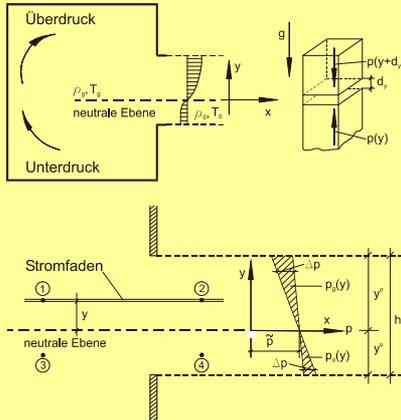
- Stationäre Verhältnisse, d. h. Schicht stabil, Temperaturen konstant, Wärmeabgabe an die Bauteile konstant
- Temperatur der unteren Schicht entspricht der Umgebungstemperatur
- Die Einmischung aus der unteren Schicht aus Plumberechnung

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Strömungsmodell der ein- bzw. ausströmenden Gase

Gaswechsel des Wärmebilanzmodells



Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Massenströme an 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:

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Massenströme

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Drücke

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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Energieströme

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Rauchgastemperatur

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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Plume

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Thomas und Hinkley

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

$$c_{TH} = 0,19 \text{ für große Räume und großen Abstand Decke Brandherd}$$

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

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

$$\dot{m}_{pl} = 0,188 \cdot d^{\frac{3}{2}} \cdot 2\sqrt{\pi A_{Br}}$$

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Zukoski

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# 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

Rauchableitung

Uni Stuttgart



# Berechnungen

- 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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# 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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# 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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# 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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Bemessungsgruppen

Zeiten nur Bemessungshilfsgrößen

**Brandmeldezeit**

0 Minuten bei BMA nach VDE 0833-2  
 5 Minuten bei Brandmelder DIN 54-7  
 und 1 Melder / 200 m<sup>2</sup>  
 10 Minuten Standard

**Von Meldung bis Beginn Brandbekämpfung**

5 Minuten Werksfeuerwehr  
 10 Minuten Standard  
 15 Minuten ungünstige Verhältnisse  
 20 Minuten außergewöhnl. ung. Verhältnisse

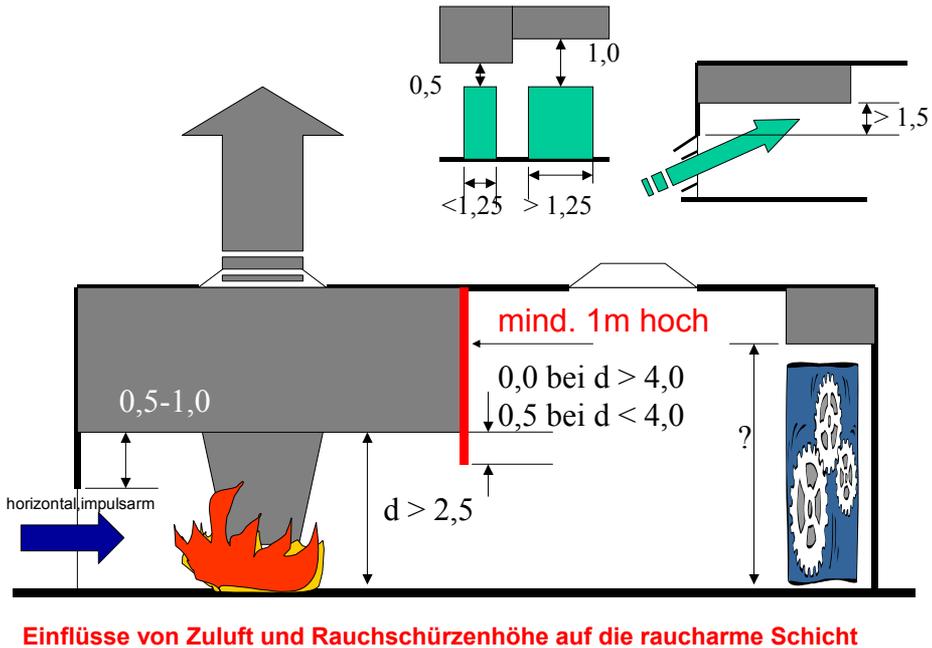
Sprinkler wird in  
 BMG 3 eingestuft

Anzusetzende Brandentwicklungs-dauer	Bemessungsgruppe		
	Brandausbreitungsgeschwindigkeit		
min	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	5 <sup>2)</sup>
> 20	5	5 <sup>2)</sup>	5 <sup>2)</sup>

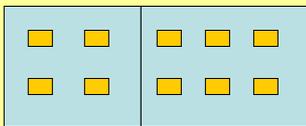
1) Durchschnittswerte ohne besonderen Nachweis  
 2) Neben NRA noch weitere Maßnahmen erforderlich (z.B. Sprinkler)

## Notwendige aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche $A_w$ in m<sup>2</sup> 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



## Zuluft neue Regel



Gruppe 1 Gruppe 2

### Zuluftfaktoren

- Türe, Tor, Maschengitter: 0,70
- Jalousie 90°: 0,65
- DK-Flügel 90°: 0,65
- DK-Flügel >60°: 0,50
- DK-Flügel >45°: 0,40
- DK-Flügel >30°: 0,30

Bezogen auf Rohbauöffnung

Beispiel

$$6 \times 1,50 \text{ m}^2 A_w = 9,00 \text{ m}^2 A_w$$

$$A_{\text{zu notw}} = 9,00 \text{ m}^2 \times 1,5 = 13,50 \text{ m}^2$$

Zuluft durch Tore, Türen: Faktor 0,7

$$A_{\text{zu Wand}} = 13,50 \text{ m}^2 / 0,7 = \mathbf{19,29 \text{ m}^2}$$

Zuluft durch DK-Fenster 30°: Faktor 0,3

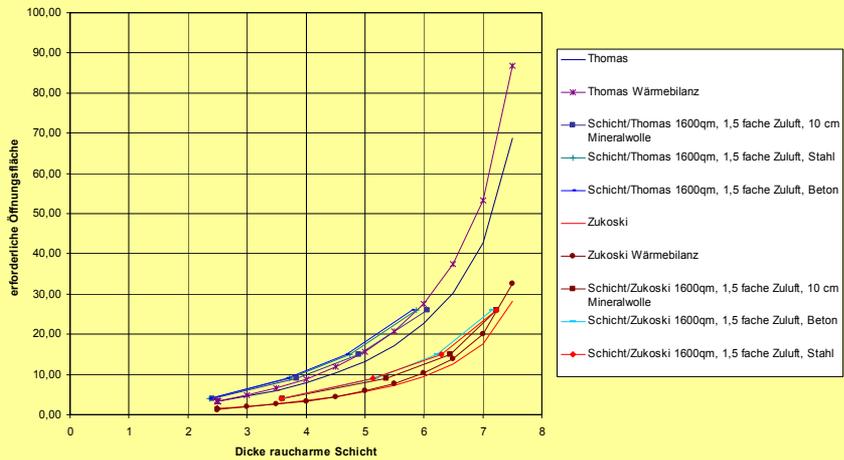
$$A_{\text{zu Wand}} = 13,50 \text{ m}^2 / 0,3 = \mathbf{45,00 \text{ m}^2}$$

Rauchableitung

Uni Stuttgart

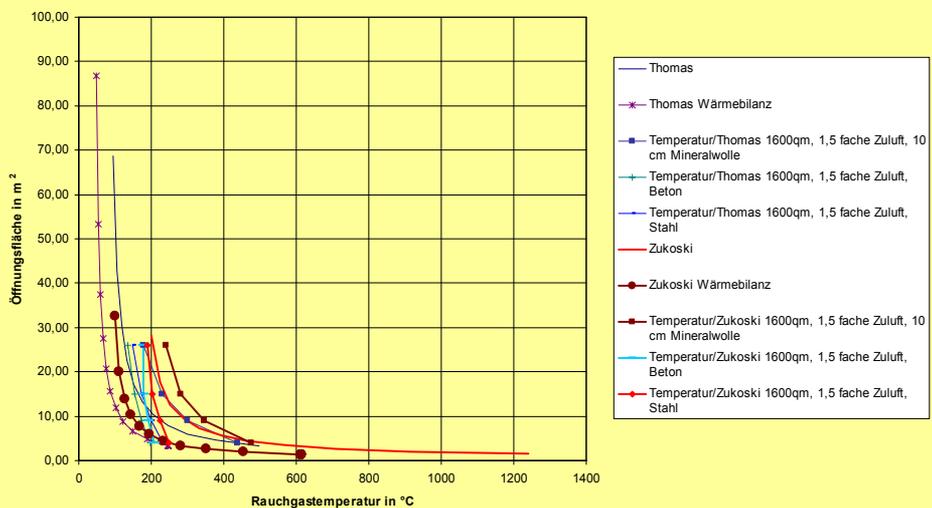
# Schichtdicken, 8m Halle, BMG4

BMG 4



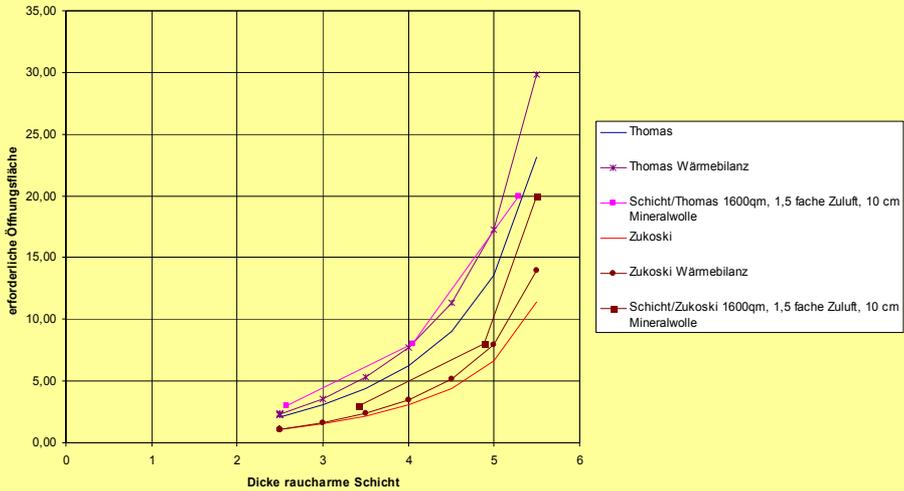
# Temperaturen, 8m Halle, BMG4

BMG 4



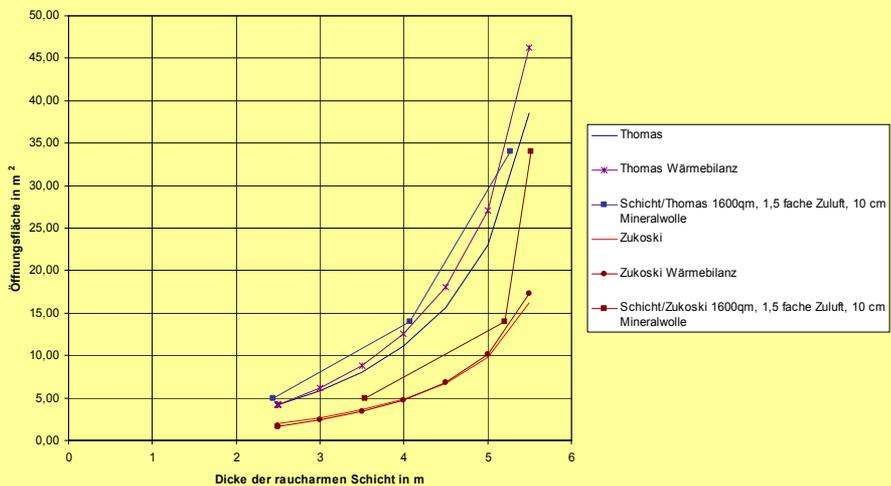
# Schichtdicken, 6 m Halle, BMG 2

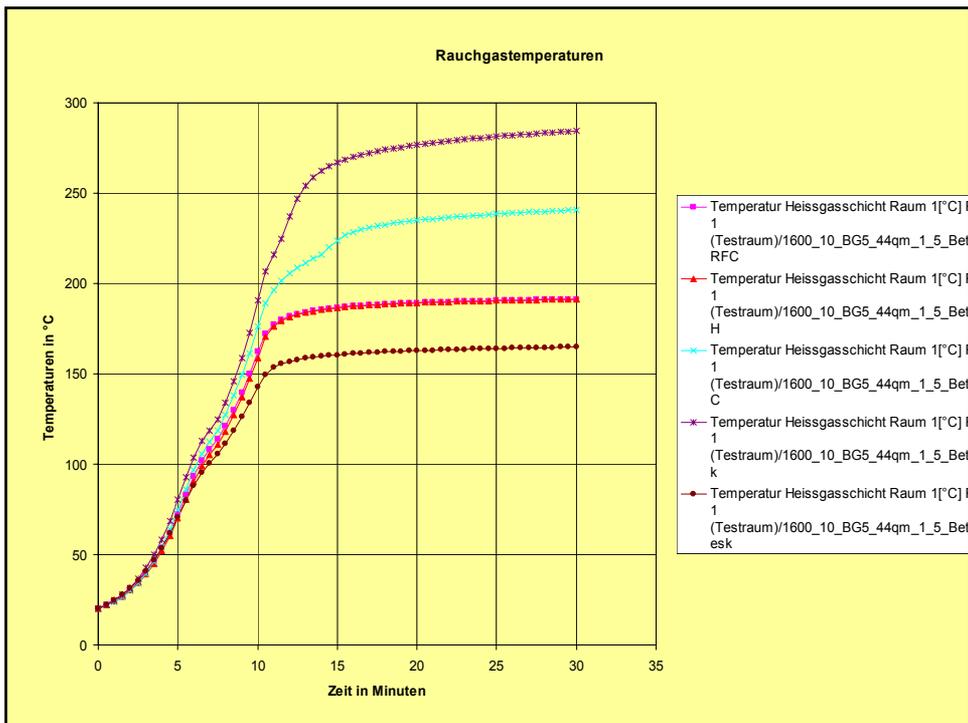
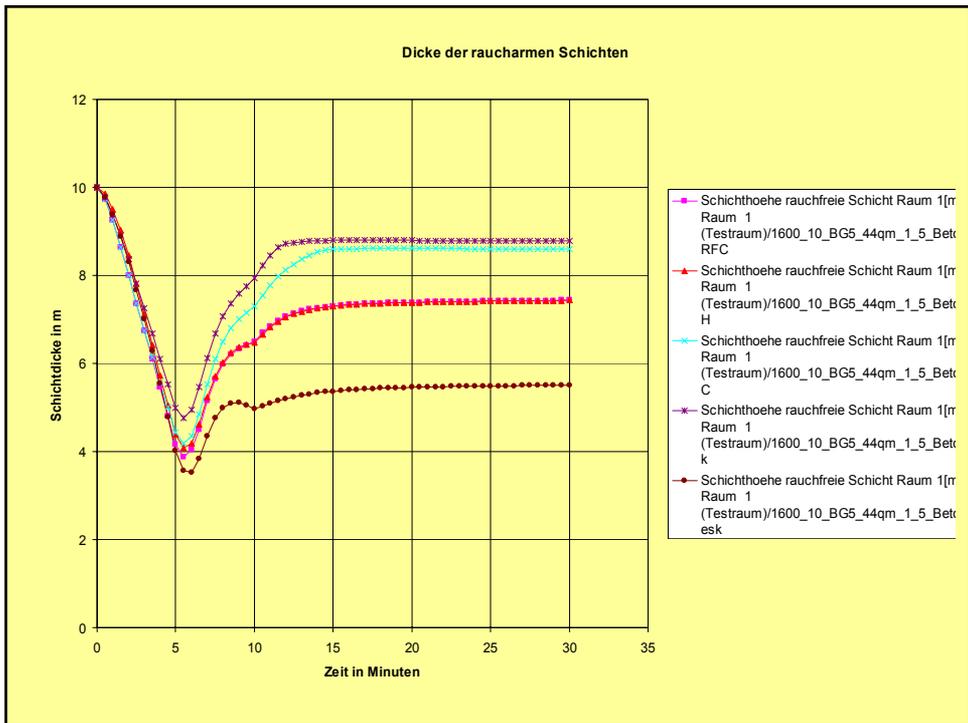
BMG 2



# Schichtdicken, 6 m Halle, BMG 4

BMG 4





# 1. Beispiel

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Berechnung

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Plumemassenstrom

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

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

## 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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 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
- $v_{zu} = 4,280 \text{ m/s}$

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 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,  $40 \text{ m}^2$  mit  $D = 7,14 \text{ m}$

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Plumemassenstrom

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Rauchgastemperatur

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Druckdifferenz an RA

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 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)

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 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  $D = 7,14 \text{ m}$

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# 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)
  - $Q = (1-0,20) \cdot 12000 = 9600 \text{ kW}$

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Rauchgastemperatur

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Druckdifferenz an RA

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Erforderliche RA- und Zuluftfläche

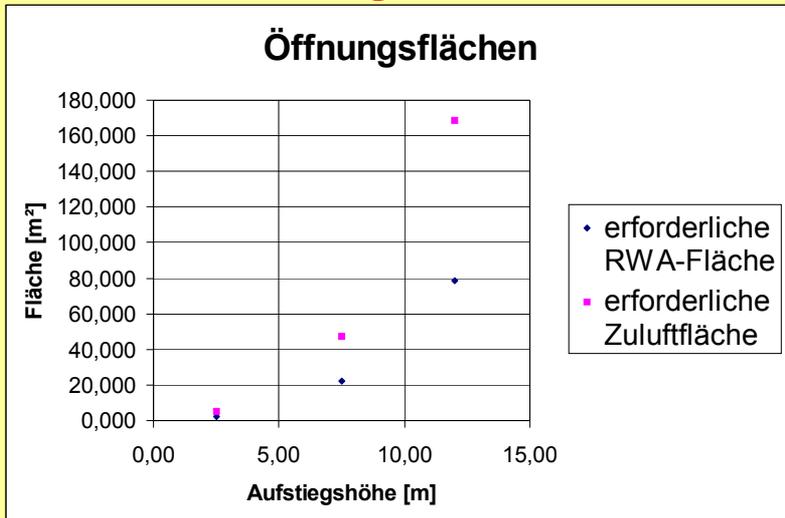
- $A_{ab} = 78,80 \text{ m}^2$  (22,19 m<sup>2</sup>)
- $A_{zu} = 1,5 \cdot 78,80 / 0,7 = 168,86 \text{ m}^2$  (47,54 m<sup>2</sup>)  
–  $c_v = 0,7$  für normale Öffnungen
- $v_{zu} = 0,813 \text{ m/s}$  (2,14 m/s)

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

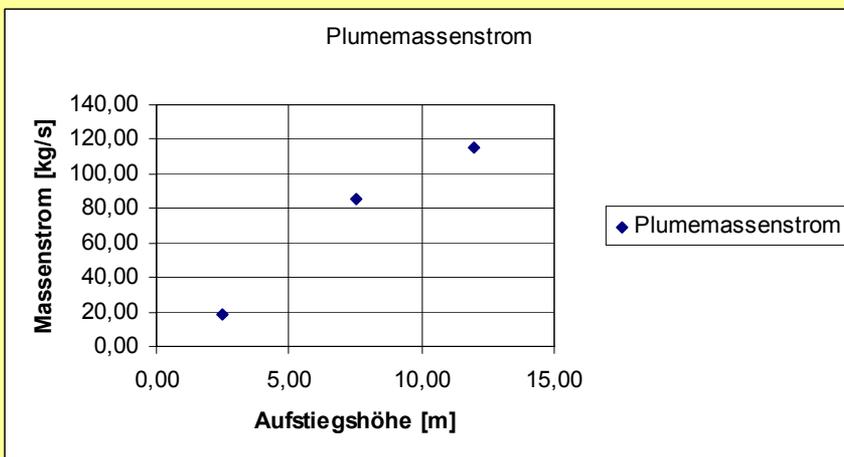
# Öffnungsflächen



Rauchableitung

Uni Stuttgart

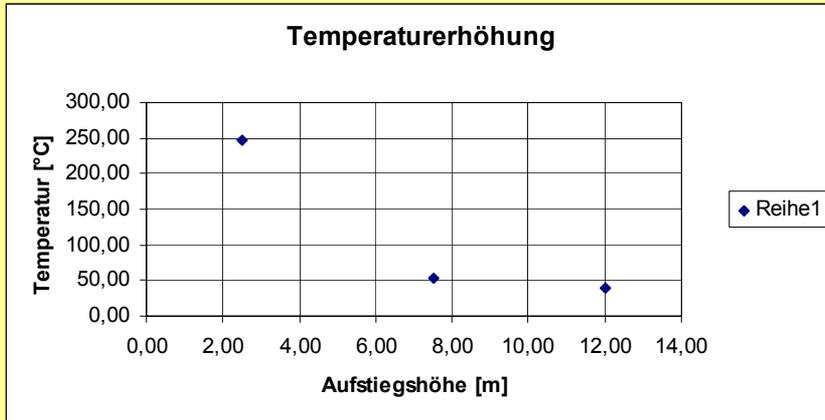
# Plumemassenstrom



Rauchableitung

Uni Stuttgart

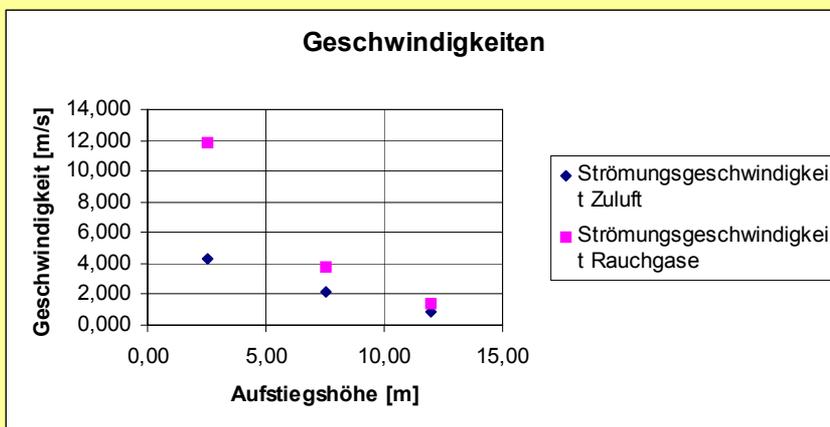
# Temperaturerhöhung



Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Geschwindigkeiten



Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Beispiel Erleichterung A

- Raum 9 m hoch
- A = 2600 m<sup>2</sup>
- Aufstiegshöhen 2,5 , 4 und 8 m
- BMG 3 , 6 MW, 20 m<sup>2</sup> mit D = 5,05 m
- Voraussetzungen
  - H ≥ 9 m
  - Rauchschürzen mind. 1 m alle 1600 m<sup>2</sup>

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Berechnung

Normalbemessung

geplante Dicke der raucharmen Schicht [m]	Höhe der Rauchschürzen [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 Rauchschürze mit mindestens 1 m Höhe

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 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
  - Rauchschürzen mind. 1 m alle 1600 m<sup>2</sup>

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Zuluft bei gegebener RA-Fläche

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

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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 4. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - A = 1500 m<sup>2</sup>
  - H = 12 m
  - d = 5,5 m
  - A<sub>w</sub> = 15 m<sup>2</sup> (1 % der Grundfläche)
  - BMG 4 , 12 MW, 40 m<sup>2</sup> mit D = 7,14 m

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Plumemassenstrom

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

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

## Rauchgastemperatur

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

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

# Druckdifferenz an RA

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Zuluftfläche

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

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

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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## RA-Fläche bei Zuluftfläche

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{zu} \sqrt{2\Delta p_{zu} \rho_0}$$
$$\Delta p_{zu} \leq (h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \rho_0 g$$
$$\Delta p_{ab} = (h-d) \left(1 - \frac{T_0}{T_g}\right) \rho_0 g - \Delta p_{zu}$$
$$\dot{m}_{ab} = \dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{ab} \sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_g}$$
$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_g}}$$
$$\Delta p_{zu} = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_{zu}}\right)^2}{2\rho_0}$$
$$v_{zu} = \sqrt{\frac{2\Delta p_{zu}}{\rho_0}}$$

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 5. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - A = 1500 m<sup>2</sup>
  - H = 12 m
  - d = 5,5 m
  - A<sub>zu</sub> = 21,5 m<sup>2</sup> geometrisch, 15 m<sup>2</sup> wirksam (Tore)
  - Torhöhe 4 m
  - BMG 4 , 12 MW, 40 m<sup>2</sup> mit D = 7,14 m

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Plumemassenstrom

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

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

## Rauchgastemperatur

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

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

## Druckdifferenz an Toren

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

- $h = 12 \text{ m}$

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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## RA-Fläche

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

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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## RA bei Zuluftgeschwindigkeit

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

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

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

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 6. Beispiel

- Öffnungsfläche für
  - A = 1500 m<sup>2</sup>
  - H = 12 m
  - d = 5,5 m
  - v<sub>zu</sub> = 1 m/s (Tore)
  - Torhöhe 4 m
  - BMG 4 , 12 MW, 40 m<sup>2</sup> mit D = 7,14 m

Rauchableitung

Uni Stuttgart

## Plumemassenstrom

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

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

## Rauchgastemperatur

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

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

# Druckdifferenz an Toren

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

- $h = 12 \text{ m}$

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

- $v_{zu} = 1 \text{ m/s}$

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# RA-Fläche

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

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

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

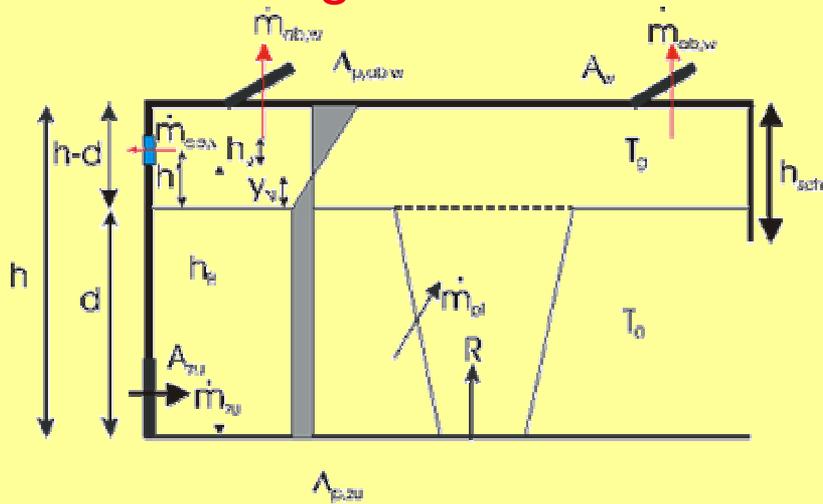
$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}} = \frac{60,63}{\sqrt{2 \cdot 15,217 \cdot 1,2045 \cdot \frac{293}{293 + 76}}} = 11,24 \text{ m}^2$$

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Berechnung in Außenwänden



Massenströme an einem Rauchabschnitt

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Berechnung

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Berechnung

$$y_N = \frac{\Delta p_{zu}}{g \rho_0 \frac{T_g - T_0}{T_g}} \quad \Delta p_{zu} = \frac{\left( \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{A_{zu}} \right)^2}{2 \rho_0}$$

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

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

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Erforderliche Breite

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

Rauchableitung

Uni Stuttgart

# Vergleich mit Normvorschlag

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

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

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

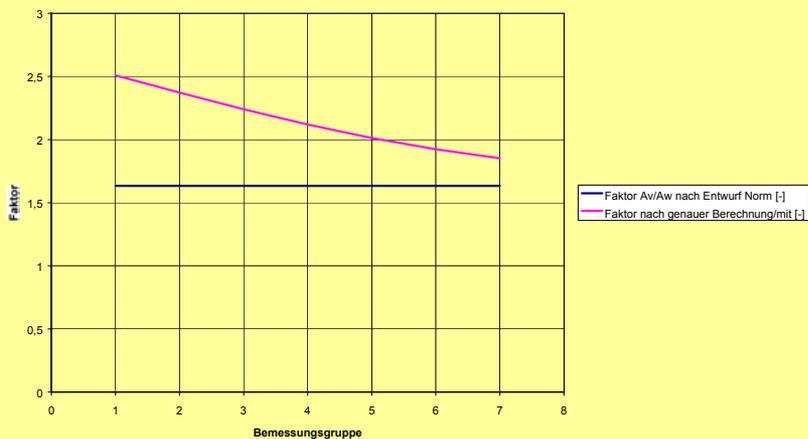
$$\frac{A_v}{A_w} = \frac{b \cdot h}{A_w} \cdot \frac{1,5 h \sqrt{(h-d-y_N)}}{\left[ (h_B + h_v - d - y_N)^{1,5} - (h_B - d - y_N)^{1,5} \right]}$$

Rauchableitung

Uni Stuttgart

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

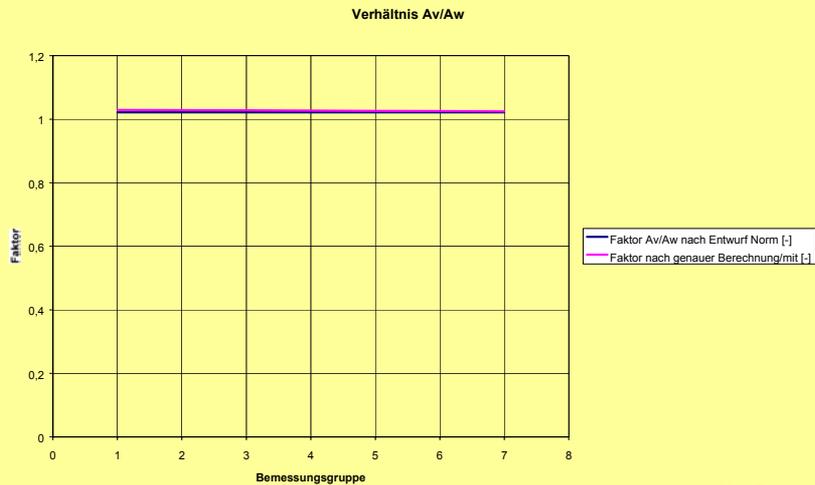
Verhältnis Av/Aw



Rauchableitung

Uni Stuttgart

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



Rauchableitung

Uni Stuttgart

## 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

Rauchableitung

Uni Stuttgart