

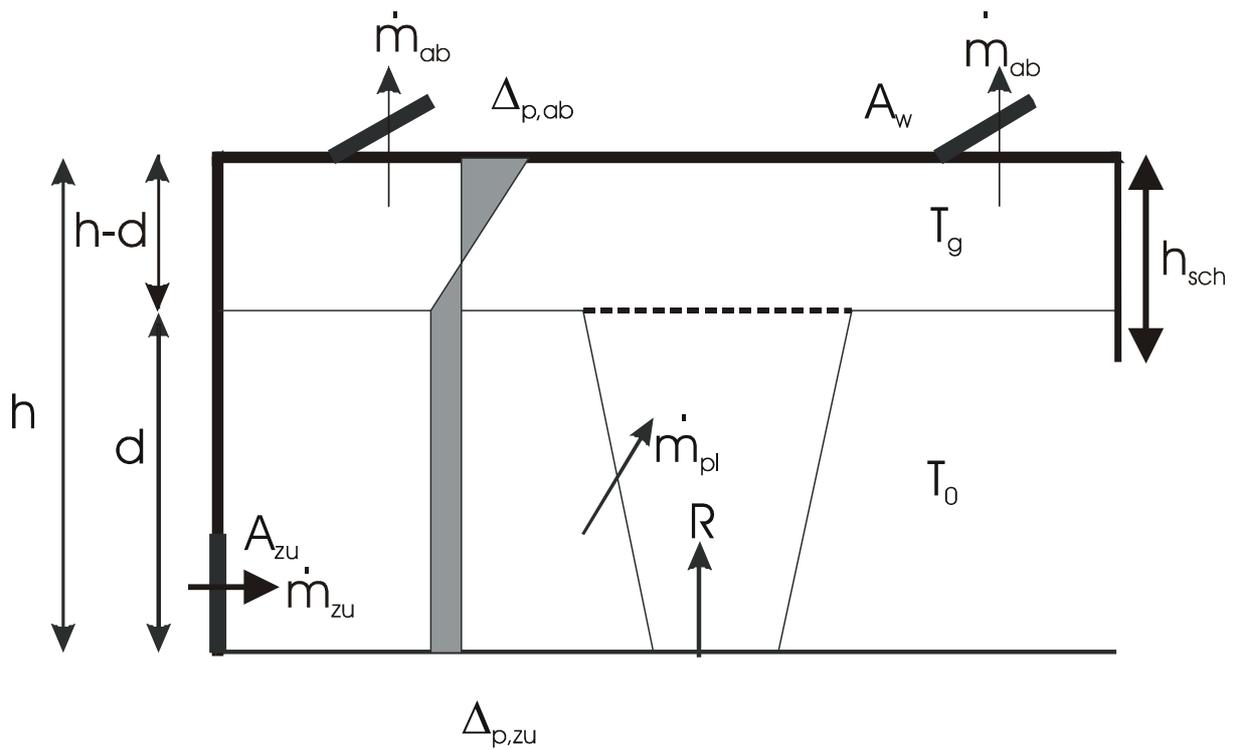
U. Max
Mitarbeit von D. Brein

Letzte Änderung: 08.11.2002

Berechnungsgrundlagen für die Auslegung von Rauchabzugsanlagen nach DIN 18232-2

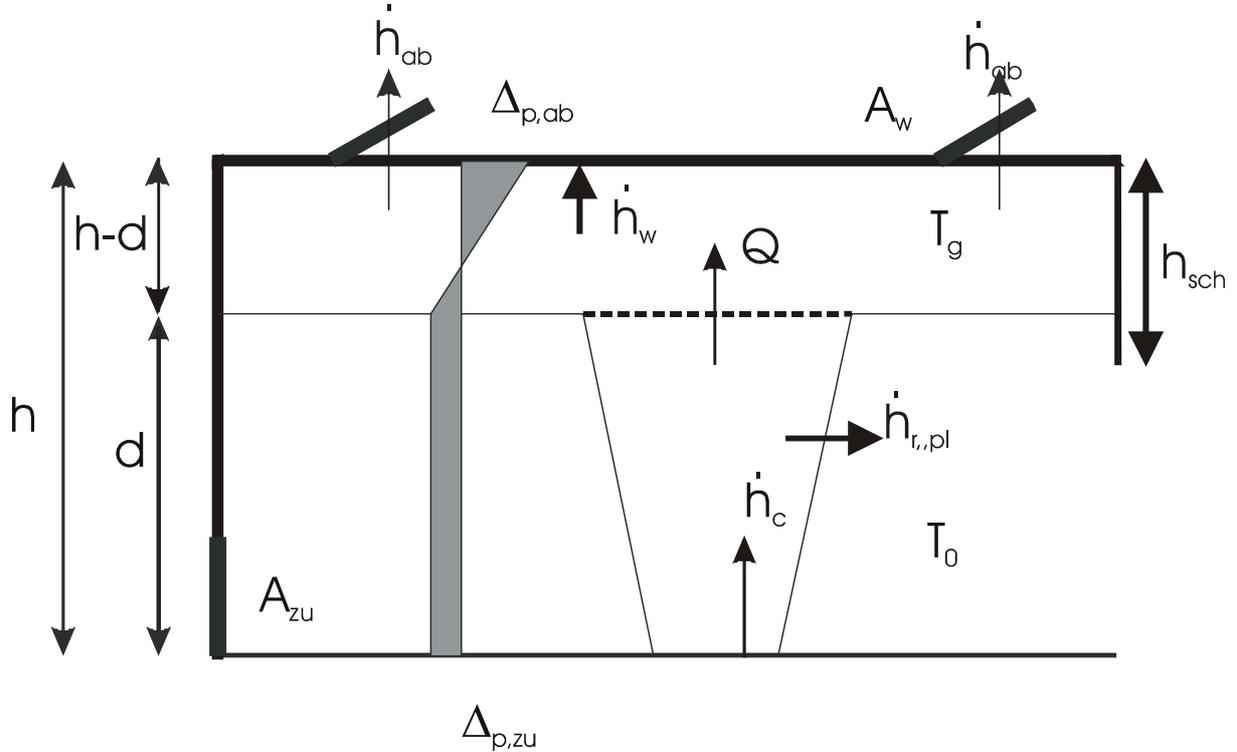
1 Grundlagen der Berechnung für RA im Dach nach Zonenmodell

Die Berechnung der erforderlichen Öffnungsflächen für natürliche RA-Geräte erfolgt auf der Basis eines stark vereinfachten Zonenmodells, bei dem ausschließlich die Massenbilanz für die Rauchgasschicht erfüllt wird. Die Energiebilanz ist nicht berücksichtigt. Die Abgabe von Wärme an die Bauteile und die Strahlungsverluste am Plume werden mit einem pauschalen Faktor berücksichtigt. Es werden die in der folgenden Darstellung enthaltenen Angaben zur Druckverteilung und sonstiger Randbedingungen für die Berechnung unterstellt.



Massenströme an einem Rauchabschnitt

Bild 1: Massenströme an einem Rauchabschnitt



Energieströme an einem Rauchabschnitt

Bild 2: Energieströme an einem Rauchabschnitt

Für die folgenden Ausführungen gelten diese Beziehungen bzw. Formelzeichen:

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

Die Berechnung gilt unter folgenden Voraussetzungen:

- Stationäre Verhältnisse, d. h. Schicht ist stabil, Temperaturen sind konstant, Änderungen der Schicht werden vernachlässigt
- Wärmeabgabe an die Bauteile ist konstant
- Temperatur der unteren Schicht entspricht der Umgebungstemperatur, d. h. eine Erwärmung der unteren Schicht wird nicht berücksichtigt
- Die Einmischung aus der unteren Schicht bestimmt sich aus einer Plumberechnung (Die Anwendbarkeit der verschiedenen aus der Literatur bekannten Beziehungen wird in Abschnitt 4 diskutiert.)

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

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

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

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

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

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

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

und der Massenstrom zu

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

Für die Abluftströme gilt entsprechend

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

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

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

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

bzw:

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

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

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

bzw.

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

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

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

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

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

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

Die Lösung der Bilanzen führt zu umfangreichen Gleichungssystemen, die nicht mehr geschlossen (von Hand) lösbar sind. Sie werden mit Rechenprogrammen unter Verwendung von Lösungsverfahren aus der numerischen Mathematik gelöst. Solche Programme werden in der Literatur Zonenmodelle genannt. Unter der Voraussetzung, dass die Temperaturen der Rauchgasschicht und der Bauteiloberflächen stationär sind (d. h. sich nicht verändern $dT_g/dt = 0$), wird auch dh/dt in der Energiebilanz der Rauchgasschicht zu null. Vereinfachend werden auch die Strahlung durch die RWA-Öffnungen, sonstige Energieverluste z. B. an Einbauten o. ä. sowie die durch Strahlung der Rauchgasschicht an die Bauteile im Bereich der unteren Schicht abgegebenen Energieströme im Rahmen dieses Näherungsverfahrens vernachlässigt. Durch Vergleich (Kalibrierung) mit Wärmebilanzrechnungen mit dem Rechenprogramm MRFC (Mehrraum- Mehrzonenmodell) wird ein Anteil der Brandleistung bei der Berechnung der Rauchgastemperatur subtrahiert, so dass diese Energieströme ebenfalls zumindest pauschal berücksichtigt sind. Im Rahmen einer genaueren Rechnung werden diese Anteile bei einem Nachweis im Einzelfall berücksichtigt.

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

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

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

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

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

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

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

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

Wenn die Energiebilanz unter Berücksichtigung von \dot{h}_{ab} (Energiestrom durch die Rauchgase), \dot{h}_w (Energiestrom in die Bauteile) und der in die Rauchgasschicht konvektiv eingetragenen Wärmemenge \dot{Q} als Anteil aus der Brandleistung nach Abzug der Strahlungsverluste am Plume eingetragenen Brandleistung (Anteil $f_{r,pl}$ an der Brandleistung) aufgestellt wird, ergibt sich daraus die Energiebilanz für die Rauchgasschicht.

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

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

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

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

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

2 Ermittlung der am Plume eingemischten Luftmenge

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

- Thomas und Hinkley
- McCaffrey
- Zukoski

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

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

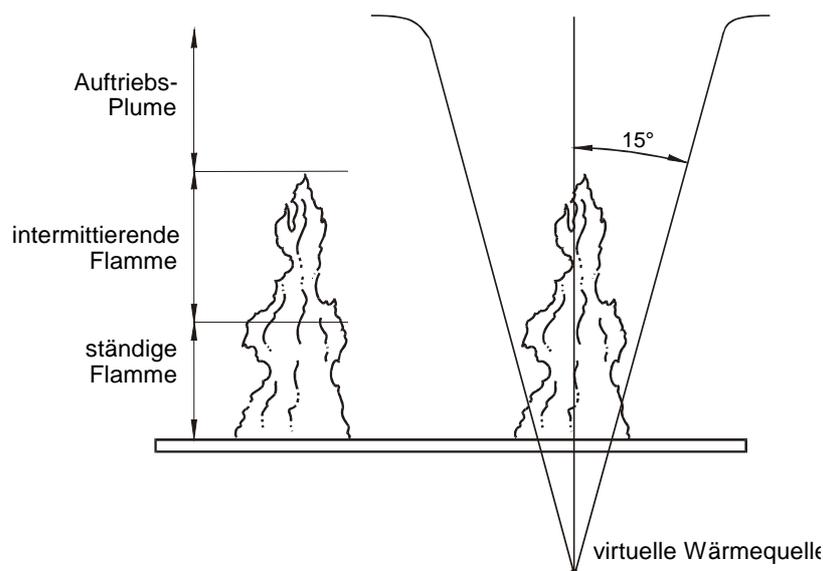


Bild 3: Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume

3 Flammenhöhe

Die Höhe des Flammenbereiches inklusive der intermittierenden Zone beträgt nach

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

$$l_F = 0,23 \cdot \dot{Q}_C^{2/5} \tag{Gl. (22)}$$

Darin sind:

- l_F Flammenhöhe in m
- \dot{Q}_C Brandleistung in kW
- D Durchmesser des Brandherdes in m.

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

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

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

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

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

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

(der Klammerausdruck ist dimensionslos mit SI-Einheiten also \dot{m}'' in $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$, ρ_0 in kg/m^3 , g aber

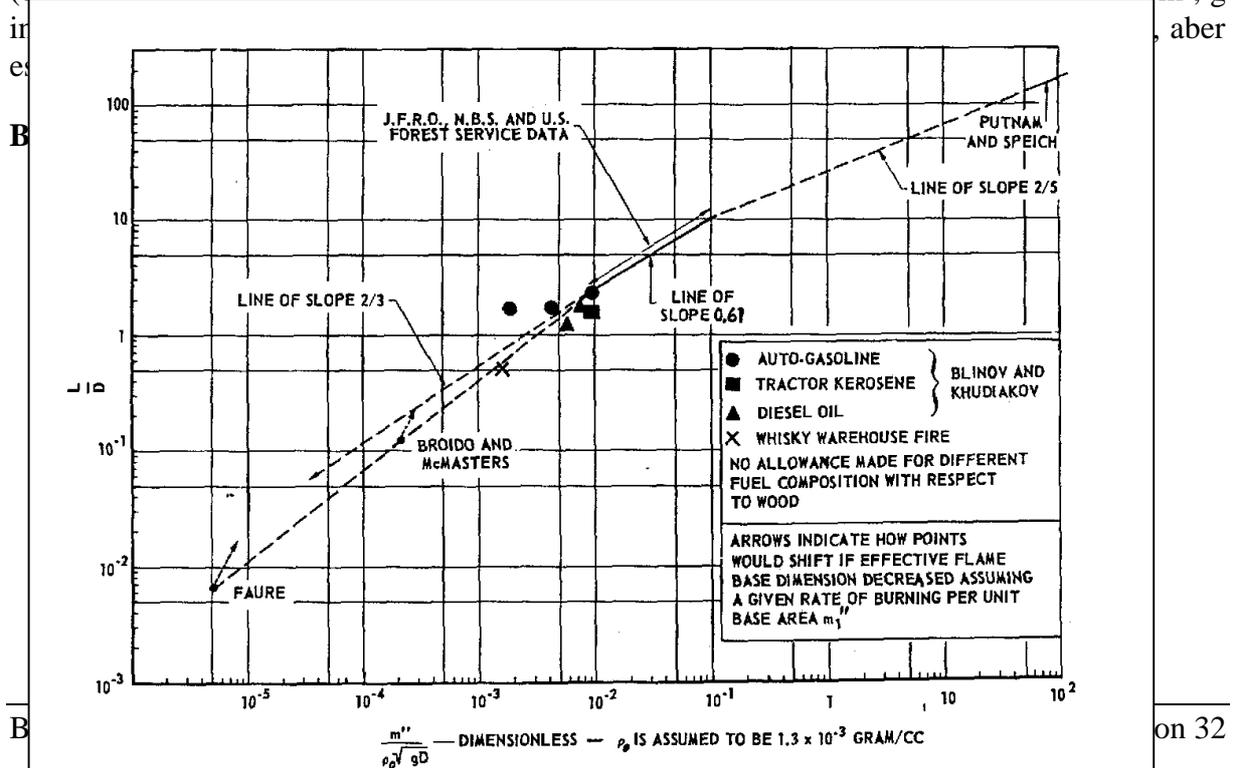


FIG. 4. Flame height correlation.

Bild 4 ist der Arbeit von Thomas entnommen (S. 847), hierauf bezieht sich die Gleichung (12ii). $\left(\frac{\dot{m}''}{\rho_0 (gD)^{1/2}} \right)$ ist hierbei eine FROUDE-Zahl bzw. deren Quadratwurzel, und bezeichnet das dimensionslose Verhältnis von Trägheitskräften zu Auftriebskräften.

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

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

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

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

Damit berechnet sich die Flammenhöhe zu:

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

42 entspricht dem Achsenabschnitt beim Durchgang durch 1 im doppeltlogarithmischen Maßstab,

0,61 entspricht der Steigung

4 Massenströme nach verschiedenen Theorien

In den Formeln dieses Abschnittes wird die Aufstiegshöhe der Rauchgase zur besseren Unterscheidung vom Durchmesser der Brandfläche D mit z bezeichnet. Diese entspricht d in Bild 1 und in Bild 2.

Thomas und Hinkley (Literatur [2])

Die angegebene Beziehung wurde von Thomas und Hinkley aus Versuchen mit

Parameter: z = Höhe über Plumequelle in [m]
 D = Durchmesser Brandherd in [m]
 Z = Aufstiegshöhe des Plume (d in Bild 1 und in Bild 2)

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

mit: $D = \sqrt{A_{Br} \cdot \frac{4}{\pi}}$

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

für große Räume und großen Abstand Decke Brandherd

$$c_{TH} = 0,21$$

wie oben mit $z \leq 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$ Faktor: 1,105

$$c_{TH} = 0,34$$

für kleine Räume Faktor: 1,789

$$\dot{m}_{pl} = 0,188 \cdot z^{\frac{3}{2}} \cdot U \quad \text{Gl.(30)}$$

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

$$\dot{m}_{pl} = 0,337 \cdot z^{\frac{3}{2}} \cdot U \quad \text{Gl.(31)}$$

mit U = Umfang der Brandfläche wird daraus für kreisrunde Brandflächen

$$D = \sqrt{\frac{4A_{Br}}{\pi}} \quad \text{Gl.(32)}$$

$$U = \sqrt{4A_{Br}\pi} \quad \text{Gl.(33)}$$

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

Die genannte Beziehung in Gl. (19) gilt für folgende Bereiche:

$$D > z/10 \text{ (d. h. bis zu begrenzten Aufstiegshöhen)} \quad \text{Gl.(35)}$$

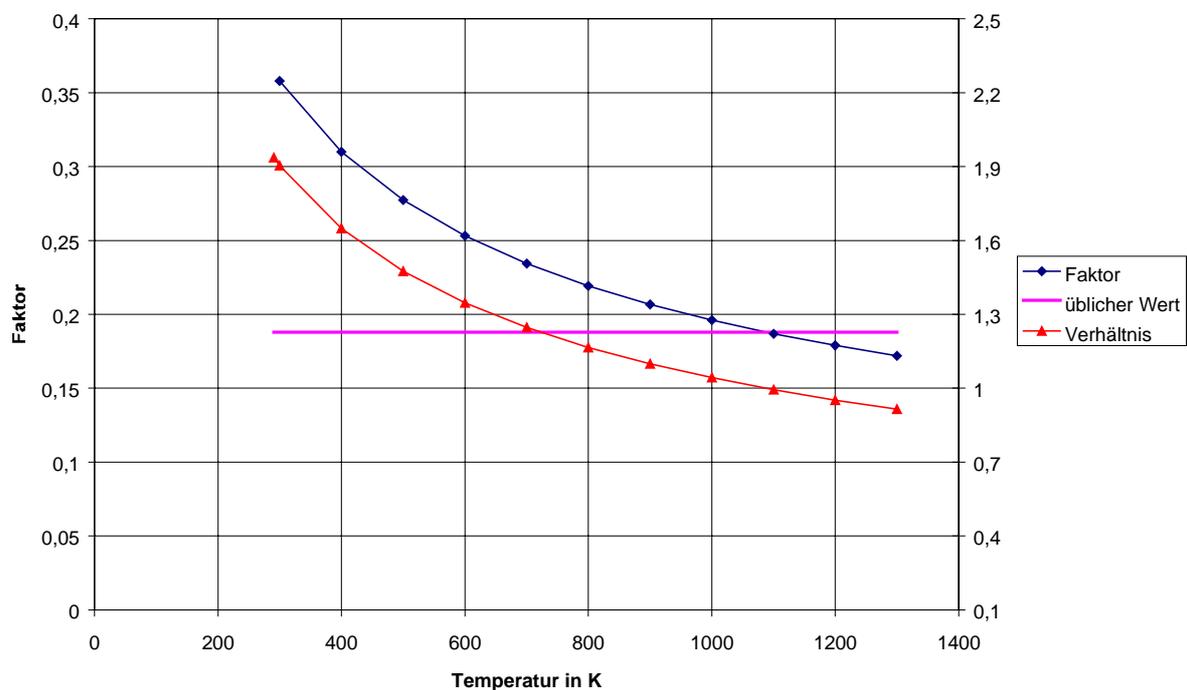
$$z < 2,5 \cdot U \quad \text{Gl.(36)}$$

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

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

$$\dot{m}_{pl} = 0,096 \cdot \rho_0 \sqrt{g \frac{T_0}{T_g}} \cdot z^{\frac{3}{2}} \cdot 2\sqrt{\pi A_{Br}} \quad \text{Gl.(38)}$$

Der Faktor $0,096 \cdot \rho_0 \sqrt{g \frac{T_0}{T_g}}$ ist im folgenden Diagramm ausgewertet. Daraus geht hervor, dass der Massenstrom nach der üblichen Formel für Rauchgastemperaturen bis zu etwa 800 °C bis maximal 100 % unterschätzt wird. Wenn die Korrektur berücksichtigt werden soll, ist eine iterative Berechnung erforderlich, bzw. es ist nur eine Verwendung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Energiebilanz zumindest der Rauchgasschicht möglich. Dies ist bei den Zonenmodellen nach der Wärmebilanzrechnung der Fall. Bei einer Rauchgastemperatur von etwa 500 °C entspricht der Faktor der in Gl. (20) definierten Konstante c_{TH} , die für eine Aufstiegshöhe von $z \leq 3 \cdot \sqrt{A_{Br}}$ gültig ist.



McCaffrey (Literatur [6])

Die Herleitung der Formel erfolgte aus Versuchen mit

Parameter: z = Höhe über Plumequelle in [m]
 \dot{Q} = konvektive Energiefreisetzung in [kW]

Die Bestimmung erfolgt für die drei Bereiche

$$\dot{m}_{Pl} = 0,0109644 \cdot \dot{Q} \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}^{0,4}} \right)^{0,566} \quad \text{für} \quad \frac{z}{\dot{Q}^{0,4}} \leq 0,08 \quad \text{Gl.(39)}$$

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

$$\dot{m}_{pl} = 0,1255552 \cdot \dot{Q} \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}^{0,4}} \right)^{1,895} \quad \text{für} \quad \frac{z}{\dot{Q}^{0,4}} \geq 0,20 \quad \text{Gl.(41)}$$

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

Zukoski (Literatur [3])

Parameter: z = Höhe über Plumequelle in [m]
 \dot{Q} = konvektive Energiefreisetzung in [kW]

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

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

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

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

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

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

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

$$D < 0,25 \cdot (h - z) \quad \text{und} \quad h_{fl} < 0,5 \cdot (h - z) \quad \text{Gl.(72)}$$

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

$$D > 0,5 \cdot (h-z) \text{ und } h_{fl} > (h-z) \quad \text{Gl.(73)}$$

Mit folgenden Größen jeweils in [m]

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

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

5 Überprüfung des Näherungsverfahrens durch Wärmebilanzrechnung und mit Literaturangaben

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

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

Die von Herrn Dr. Hagen bei seinen Berechnungen verwendete Formel nach Tanaka entspricht der in diesem Beitrag enthaltenen Beziehung nach Zukoski, allerdings ohne Berücksichtigung der virtuellen Brandherdlage z_0 in Gl.(42). Bei den durchgeführten Vergleichsrechnungen wurden die folgenden Beziehungen ausgewählt:

- Thomas und Hinkley
- Zukoski

Es wurde festgestellt, dass bei den in DIN 18232-2 definierten Brandszenarien, insbesondere bei den kleineren Bränden in den Bemessungsgruppen 1 bis 3 bei großen Aufstiegshöhen für die festgelegte spezifische Brandleistung von 300 kW/m², der Gültigkeitsbereich der Formel nach Thomas und Hinkley verlassen wird. Es wurde daher festgelegt, dass die Formel nach Thomas und Hinkley erst dann angewendet wird, wenn die Flammen in die Rauchgasschicht hineinragen, d. h. solange $h_{fl} > d$ ist. Davor wird die Beziehung nach Zukoski mit virtueller Lage des Brandherdes angewendet. Da die Beziehungen nicht zueinander kompatibel sind wurde ein Übergangsbereich definiert, bei dem zwischen den beiden Plumeformeln linear interpoliert wird. Die Grenze für den Übergang zwischen den Plumeformeln wird bei $2 \cdot h_{fl} = d$ gesetzt. Es gilt also:

Plumeformel nach Zukoski mit virtuellem Ursprung	$d \geq 2 \cdot h_{fl}$
Lineare Interpolation zwischen Zukoski und Thomas und Hinkley	$2 \cdot h_{fl} > d > h_f$
Plumeformel nach Thomas und Hinkley	$h_{fl} \geq d$

Es wurden die in Tabelle 1 angegebenen Gültigkeitsbereiche für die einzelnen Plumeformeln definiert. In Tabelle 1 sind die Interpolationsfaktoren f_{int} für die Ermittlung des maßgebenden Massenstroms am Plume angegeben. Der Massenstrom berechnet sich aus der Beziehung:

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

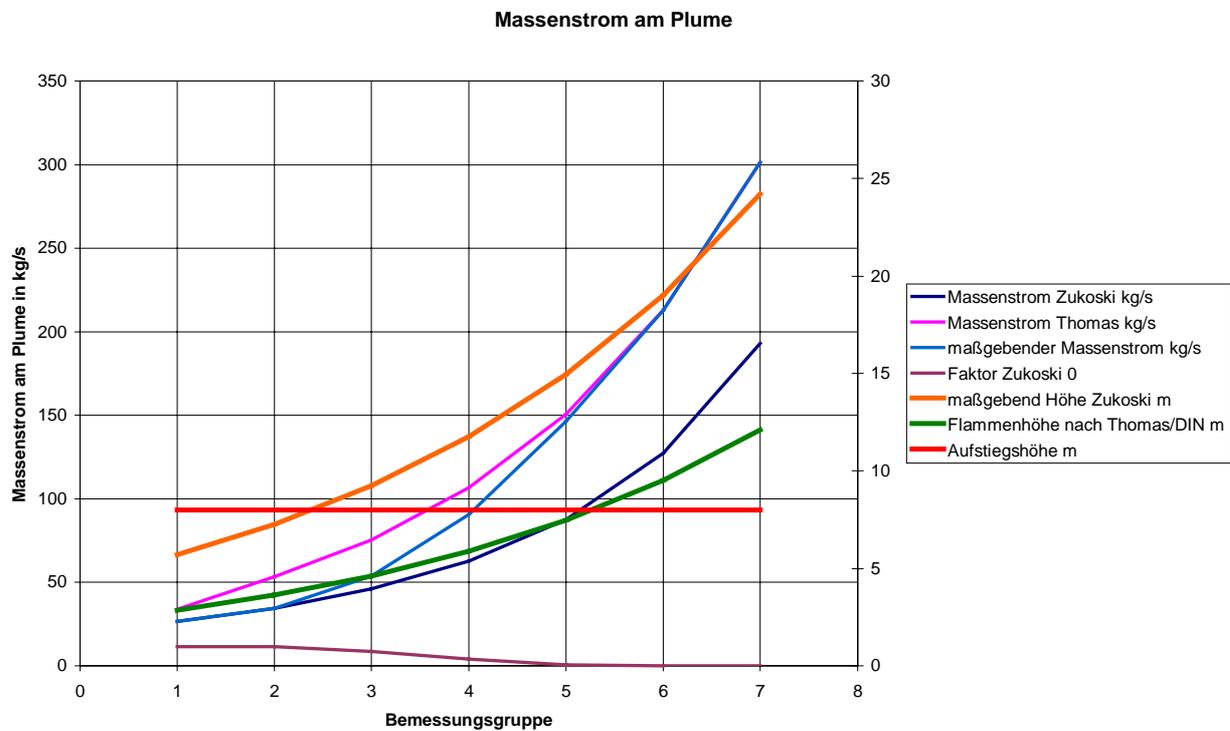
Tabelle 1: Gültigkeitsbereiche der verschiedenen Plumeformeln für Berechnung

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

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

In Bild 5 sind für eine Aufstiegshöhe von 8 m die maßgebenden Höhen sowie die Massenströme für eine spezifische Brandleistung von 300 kW/m² dargestellt.

Bild 5: Massenströme in den verschiedenen Bemessungsgruppen bei einer Aufstiegshöhe von 8 m mit spezifischer Brandleistung von 300 kW/m²



Aus Bild 6 geht hervor, dass sich der Übergangsbereich für die gleiche Aufstiegshöhe von 8 m bei spezifischen Brandleistungen von 600 kW/m² zu geringeren Bemessungsgruppen verschiebt. Danach wird der maßgebende Massenstrom für fast den gesamten Anwendungsbereich nach der Beziehung von Thomas und Hinkley ermittelt. Diese Festlegungen wurden für die Ermittlung der erforderlichen Volumenströme bei der Dimensionierung von mechanischen Rauchabzugsanlagen nach DIN 18232-5 verwendet. Aus Bild 7 geht hervor, dass sich der Übergangsbereich bei spezifischen Brandleistungen von 100 kW/m² zu höheren Bemessungsgruppen verschiebt. Danach wird der maßgebende Massenstrom für einen weiten Anwendungsbereich bei den geringeren Bemessungsgruppen, die mit einer geringeren Brandleistung verbunden sind, nach der Beziehung von Zukoski ermittelt. Der Übergangsbereich beginnt dann erst bei Bemessungsgruppe 5.

Bild 6: Massenströme in den verschiedenen Bemessungsgruppen bei einer Aufstiegshöhe von 8 m mit spezifischer Brandleistung von 600 kW/m²

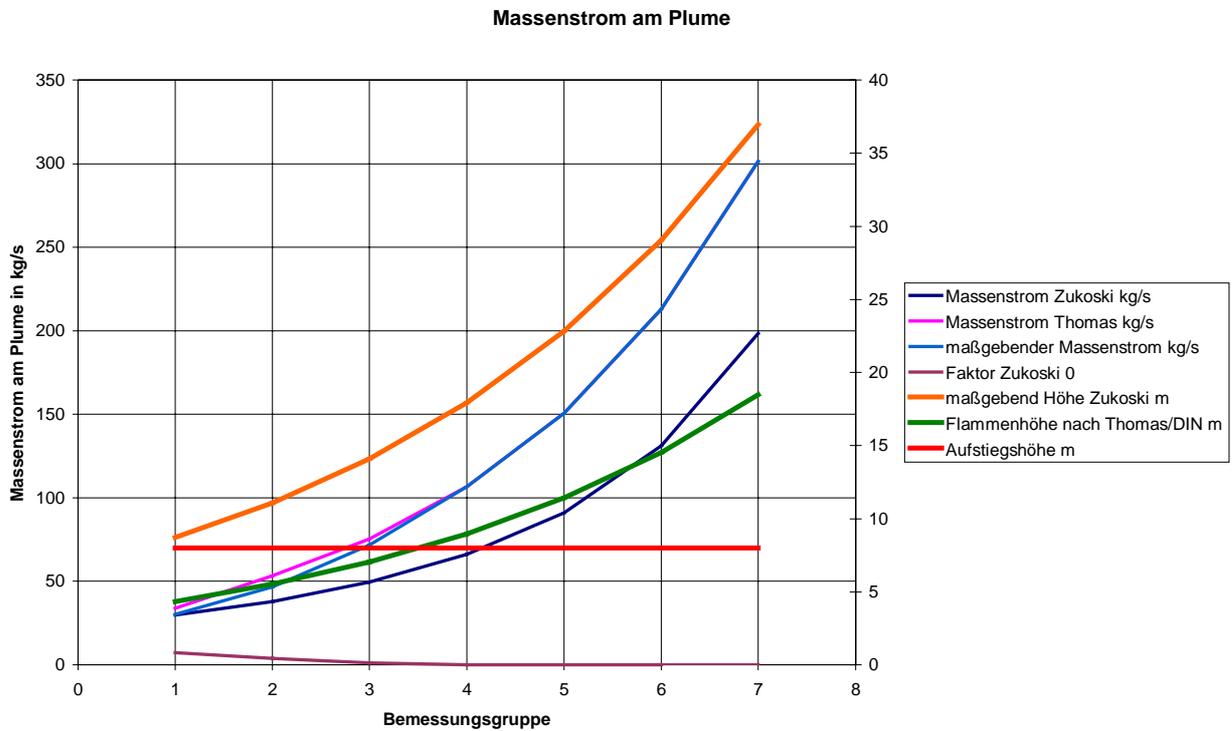
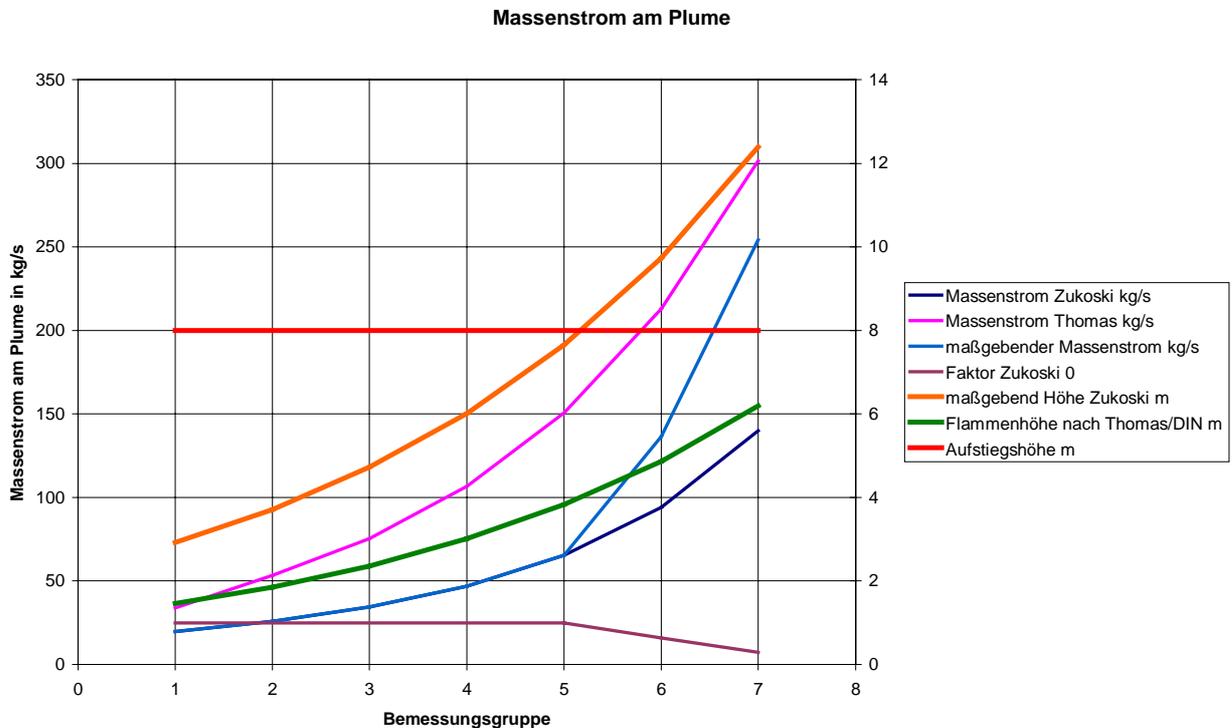


Bild 7: Massenströme in den verschiedenen Bemessungsgruppen bei einer Aufstiegshöhe von 8 m mit spezifischer Brandleistung von 100 kW/m²



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

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

Nach der von Herrn Dr. Hagen angegebenen Literaturstelle BRE 186 wird die erforderliche Öffnungsfläche der RA-Geräte nach der folgenden Beziehung (Gl. (74)) ermittelt. Darin wird die nach Gl. (20) ermittelte mittlere Rauchgastemperatur verwendet.

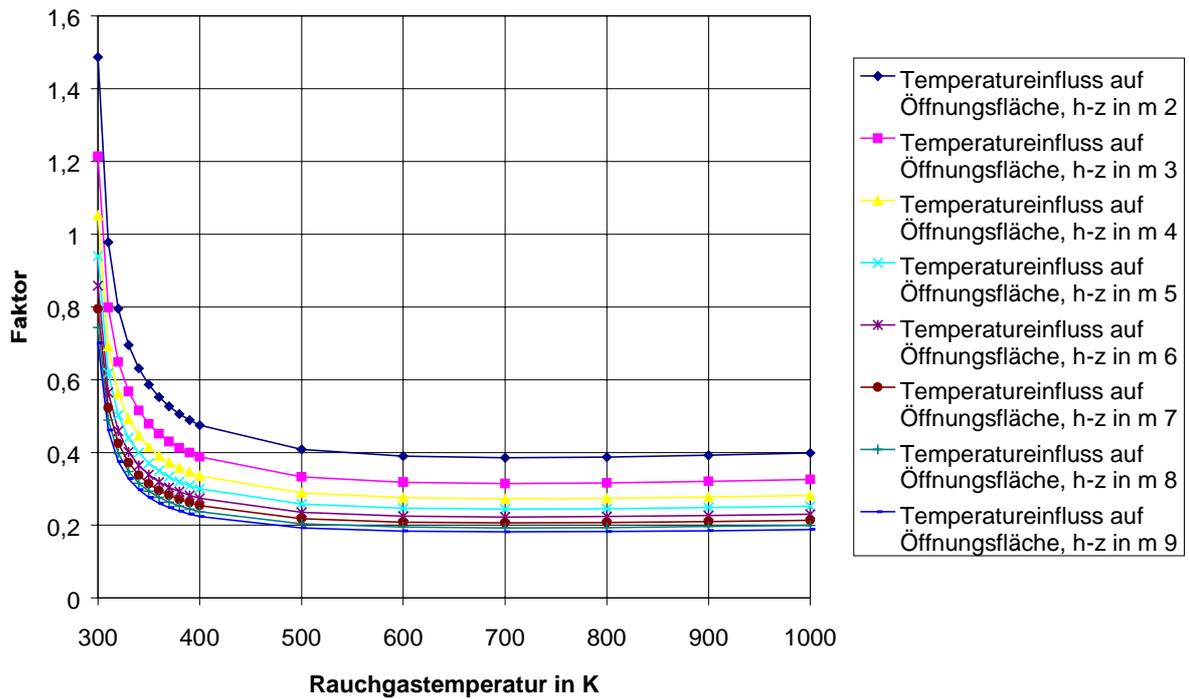
$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl}}{\rho_0} \sqrt{\frac{\left(T_g^2 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 T_0 T_g \right)}{2(h-d)(T_g - T_0)gT_0}} \quad \text{Gl.(74)}$$

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

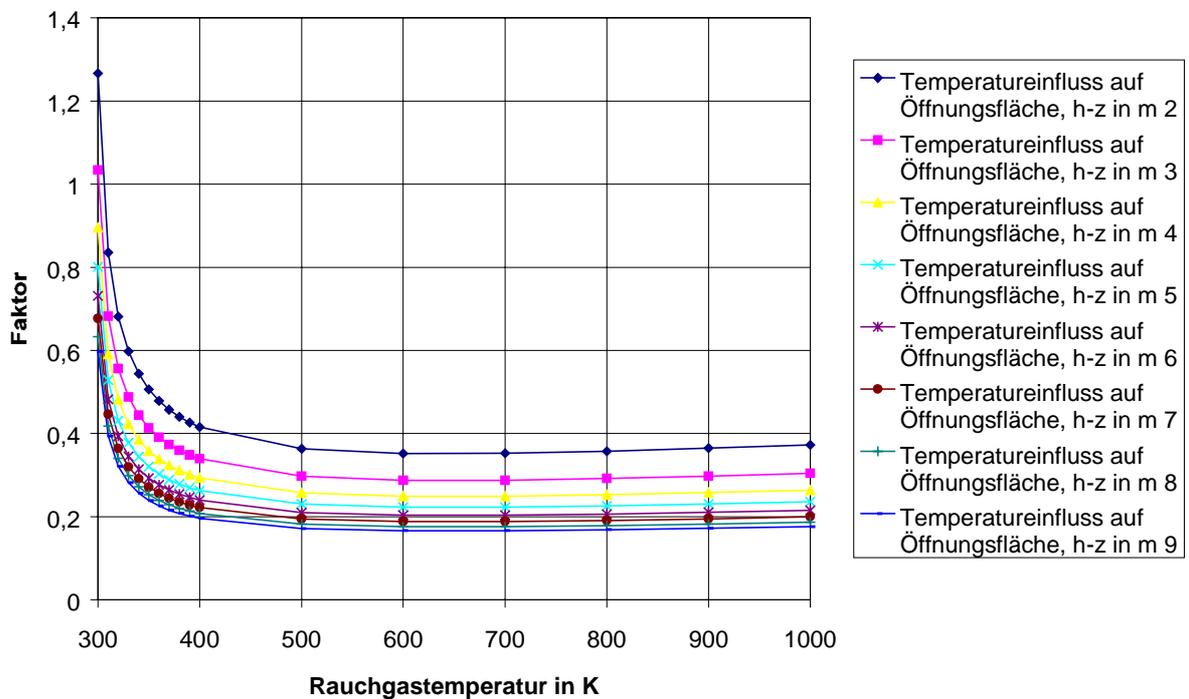
$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl}}{\sqrt{\frac{(h-z) \left(1 - \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 g}{2 \frac{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \right) \rho_0 \frac{T_0}{T_g}}}}} = \dot{m}_{pl} \sqrt{\frac{\left(1 + \left(\frac{A_{ab}}{A_{zu}} \right)^2 \frac{T_0}{T_g} \right)}{(h-z)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

Diese Gleichung stimmt mit Gl.(9) in der von Herrn Dr. Hagen angegebenen Literaturstelle BRE 186 überein.

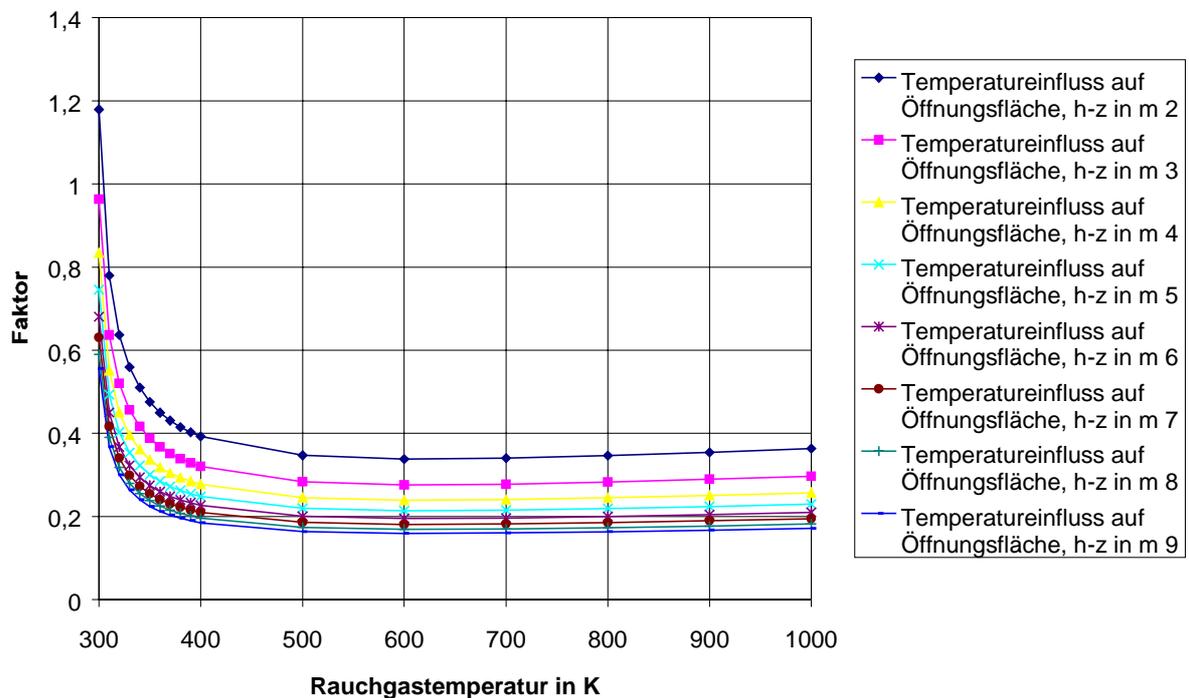
Die Rauchgastemperatur hat einen größeren Einfluss auf die erforderliche Öffnungsfläche der RWA-Geräte. Der Wurzelausdruck in Gl. (74) ist in der folgenden Darstellung für unterschiedliche Rauchgasticken und ein Verhältnis der Zu- und Abluftflächen von 1:1 ausgewertet.



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



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



6 Gang der Berechnung für verschiedene Plumeformeln:

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

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

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

Festlegung der konstanten Parameter:

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

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

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

Berechnung für Bemessungsgruppen und Höhenverhältnisse:

Für jede Bemessungsgruppe:

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

Für unterschiedliche Höhen der raucharme Schicht:

Überprüfung des Gültigkeitsbereichs für Plumeformel

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

Berechnung der Temperaturerhöhung über Umgebungstemperatur

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

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

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

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

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

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

6.1 Berechnung für fest vorgegebenes Verhältnis von Zuluft und RWA-Flächen

Berechnung der Druckdifferenz an den Rauchabzugsöffnungen

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

Berechnung der erforderlichen Rauchabzugsöffnungsflächen

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

Zuluftöffnungen:

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

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

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

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

Beispiel:**6.2 Berechnung der Zuluftflächen bei vorgegebenen RWA-Flächen**

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

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

zu

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

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

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

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

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

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

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

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

zu

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

Beispiel:**6.3 Berechnung der RWA-Flächen bei vorgegebenen Zuluftflächen**

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

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

zu

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

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

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

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

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

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

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

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

zu

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

Beispiel:

6.4 Berechnung der RWA-Flächen bei vorgegebener Zuluftgeschwindigkeit

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

$$\dot{m}_{pl} + \dot{R} = A_{zu} \cdot 2v_{zu} \rho_0$$

zu

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

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

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

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

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

Wenn diese Bedingung nicht eingehalten wird, muss die Zuluftgeschwindigkeit reduziert werden, damit die Berechnung weitergehen kann.

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

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

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

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

zu

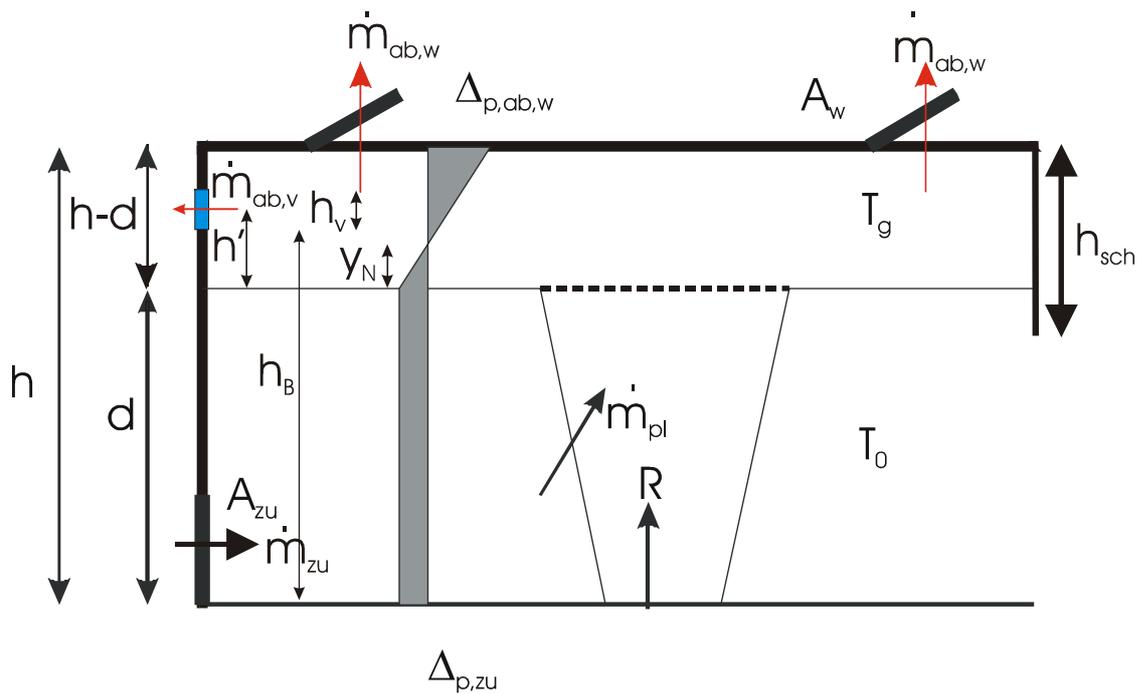
$$A_{ab} = \frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{\sqrt{2\Delta p_{ab} \rho_g}}$$

Beispiel:

7 Grundlagen der Berechnung für RA in Außenwänden nach Zonenmodell

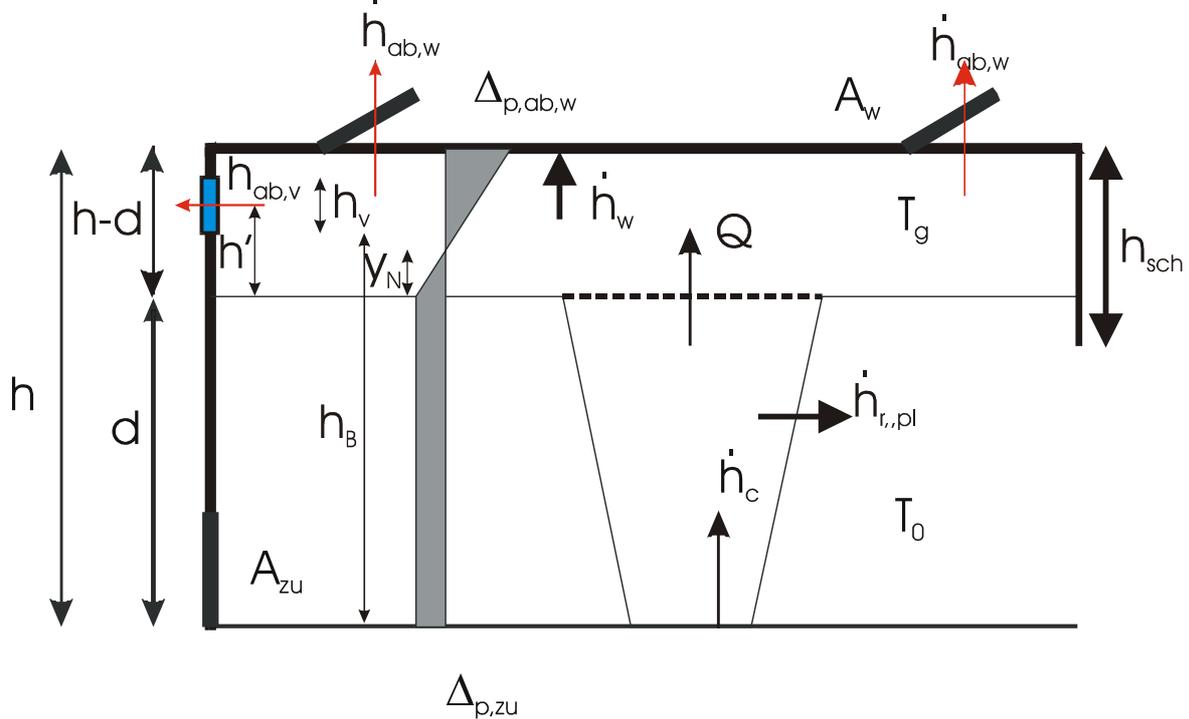
Nach dem oben erläuterten Zonenmodell können auch die notwendigen Öffnungen von RWA-Flächen in Außenwänden von Räumen berechnet werden, wenn bestimmte Voraussetzungen gemacht werden. Die Massenströme an den vertikalen Öffnungen sind in Bild 8 und die Energieströme in Bild 9 dargestellt. Danach ergeben sich für eine Lage der Öffnungen oberhalb der neutralen Ebene (wird in DIN 18232-2 und auch bei den folgenden Ausführungen immer vorausgesetzt) die folgenden zusätzlichen Größen:

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



Massenströme an einem Rauchabschnitt

Bild 8: Massenströme bei vertikalen Öffnungen in Wänden



Energieströme an einem Rauchabschnitt

Bild 9: Energieströme bei vertikalen Öffnungen in Wänden

Neben den genannten geometrischen Bezeichnungen gelten noch die folgenden Abkürzungen:

$\dot{m}_{ab,v}$ über NRA-Öffnungen in den Wänden abgeführter Rauchgasmassenstrom in kg/s
 $\dot{h}_{ab,v}$ Wärmeabgabe über ausströmende Rauchgase aus Öffnungen in den Wänden in kW

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

$$h_B = d + h' - 0,5 \cdot h_v \quad \text{Gl.(7-1)}$$

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

$$b_v = A_v / h_v \quad \text{Gl.(7-2)}$$

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

$$\Delta p_{(y)} = g \cdot (\rho_0 - \rho_g) \cdot y - \Delta p_{zu} = \rho_0 \cdot g \cdot y \cdot (1 - T_0/T_g) - \Delta p_{zu} \quad \text{Gl.(7-3)}$$

Dabei ist y die Höhe oberhalb der Schichtgrenze in m.

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

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

Mit

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

und

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

wird daraus

$$y_N = \frac{\left(\frac{\dot{m}_{pl} + \dot{R}}{f_{zu/ab} \cdot A_{ab} \cdot \rho_0} \right)^2}{2g \frac{T_g - T_0}{T_g}} \quad \text{Gl.(7-4)}$$

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

$$\dot{m}_{ab,v} = b \cdot \rho_g \cdot \int_{h_B-d-y_N}^{h_B+h_v-d-y_N} v_g dy \quad \text{Gl.(7-5)}$$

Mit Gl.(6) und Gl.(7-3) wird daraus

$$\dot{m}_{ab,v} = b \cdot \rho_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0}} \cdot \int_{h_B-d-y_N}^{h_B+h_v-d-y_N} \sqrt{y} dy \quad \text{Gl.(7-6)}$$

und weiter

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

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

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

Beispiel:

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

$$A_v = A_w \cdot \left(\frac{h-d}{h'} \right)^{0,5} \quad \text{Gl.(7-8)}$$

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

Zur Überprüfung der Regelungen in der Norm ist daher für ein vorgegebenes Verhältnis der Zuluft- und RWA-Öffnungsflächen zunächst eine Bemessung der RWA-Flächen erforderlich, die im Dach anzuordnen sind. Daraus ermittelt sich die erforderliche Zuluftöffnungsfläche aus dem vorgegebenen Verhältnis. Mit dieser Zuluftöffnungsfläche liegt dann die Druckverteilung im Raum fest. Wenn die Zuluftöffnungsfläche oder die Strömungsgeschwindigkeit direkt gegeben sind, ist eine vorherige Bemessung der RWA im Dach nicht erforderlich. Der Massenstrom an einer horizontalen Öffnung im Dach ergibt sich aus der Höhenlage der neutralen Ebene (für die gleiche Druckverteilung) aus Gl.(7-3) und der Druckdifferenz an den RWA-Öffnungen im Dach mit

$$\Delta p_{ab} = \Delta p(y=h-d-y_N) = g \cdot (\rho_0 - \rho_g) \cdot (h-d-y_N) \quad \text{Gl.(7-8)}$$

zu

$$\dot{m}_{ab,w} = A_w \cdot \rho_g \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{T_g - T_0}{T_0} (h-d-y_N)}. \quad \text{Gl.(7-9)}$$

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

$$\frac{2}{3} b \cdot \left[(h_B + h_v - d - y_N)^{1.5} - (h_B - d - y_N)^{1.5} \right] = A_w \cdot \sqrt{(h-d-y_N)}. \quad \text{Gl.(7-10)}$$

bzw.

$$\frac{A_v}{A_w} = \frac{b \cdot h}{A_w} = \frac{1,5h\sqrt{(h-d-y_N)}}{\left[(h_B + h_v - d - y_N)^{1.5} - (h_B - d - y_N)^{1.5} \right]} \quad \text{Gl.(7-11)}$$

Mit Gl.(7-11) ist das erforderliche Verhältnis der Öffnungsflächen in den Wänden zur erforderlichen Öffnungsfläche im Dach gefunden. In diesem Ausdruck ist neben den geometrischen Vorgaben bezüglich der Höhenlage der RWA-Öffnungen in den Wänden noch die Lage der neutralen Ebene unbekannt (nur, wenn das Verhältnis von Zuluft- zu RWA-Flächen im Dach vorgegeben wird). Die neutrale Ebene ist dann aus der RWA-Bemessung für die Öffnungen im Dach zu entnehmen.

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

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

vertikale Öffnungen, die weiter unten angeordnet sind, kann der Fehler mehr als 100 % betragen.

Beispiel:

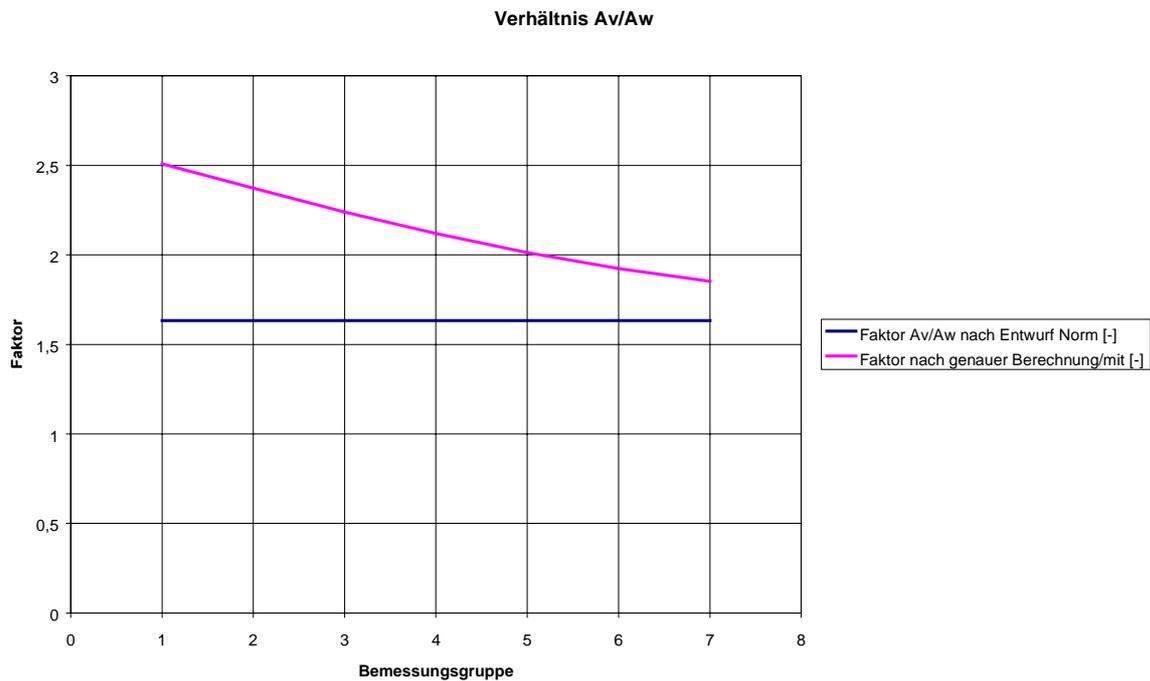


Bild 10: Vergleich zwischen vorgeschlagen Faktor im Normentwurf und dem ingenieurmäßig ermittelten Faktor bei einer Hallenhöhe 10 m, vertikale Öffnungsfläche 50 cm hoch zwischen 6,0 und 6,5 m

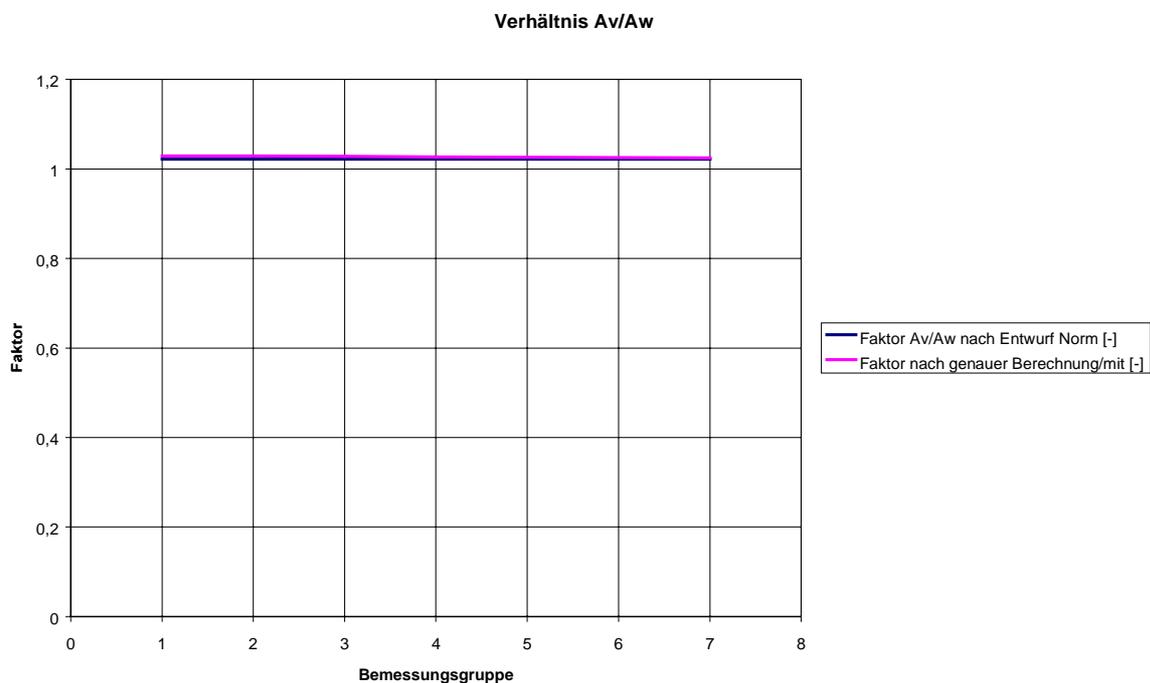


Bild 11: Vergleich zwischen vorgeschlagen Faktor im Normentwurf und dem ingenieurmäßig ermittelten Faktor bei einer Hallenhöhe 10 m, vertikale Öffnungsfläche 50 cm hoch zwischen 9,5 und 10 m

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

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

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

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

Mit dem vorgestellten Verfahren kann grundsätzlich auch die erforderliche Leistung von mechanischen Rauchabzugsanlagen (MRA), die in DIN 18232-5 geregelt sind, berechnet werden. Im Gegensatz zu den NRA (ungünstigste Verhältnisse bei geringen Rauchgas-temperaturen) liegen für MRA die ungünstigsten Verhältnisse dann vor, wenn maximale Temperaturen auftreten; dann ist die effektive Absaugleistung der Geräte minimal. Für eine derartige Bemessung könnte beispielsweise die Wärmeabgabe an Bauteile vollständig vernachlässigt werden (Faktor $f_w = 0$ in Gl. 20). Eine Differenzierung nach erhöhten Brandleistungen für die Brandszenarien (600 kW/m² anstelle von 300 kW/m² für die gleiche Bemessungsgruppe) wären in diesem Fall nicht erforderlich und auch nicht gerechtfertigt.

Eine Berechnung mit einem instationären Modell (z. B. mit MRFC nach [4]) ist immer dann erforderlich, wenn durch eine Auslegung RWA-Anlagen dimensioniert werden sollen, die gemäß Brandschutzkonzept auch für die Evakuierung der Personen im Gebäude benötigt werden. Dies ist insbesondere dann unerlässlich, wenn die Öffnungsflächen nicht sofort für die Rauchabfuhr zur Verfügung stehen. Solche Berechnungen sind auch dann erforderlich, wenn bei einer Auslegung für RWA-Anlagen von konstruktiven Vorgaben in der Norm abgewichen werden soll, wenn z. B. keine Rauchschürzen vorgesehen werden sollen oder zulässige Rauchabschnittsgrößen nach DIN 18232-2 überschritten werden sollen.

9 Literatur

- [1] Brein D.: Anwendungsbereiche und –grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchableitung in Gebäuden.

- [2] Thomas, P.H. et al.: Investigations into the flow of hot gases in roof venting. Fire Research Technical Paper No. 7, London, HMSO 1963.
- [3] Zukoski, E.E.: Entrainment in the near field of a fire plume. Report NBS-GCR-81-346, CFR NIST, August 1981.
- [4] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit AGB: Referenzhandbuch für MRFC (Multi Room Fire Code), Version 2.7, Bruchsal/Wien, Sept. 2000.
- [5] Heskestad, G.: Engineering relation for fire plumes. Technology Report 82-8. Society of Fire Protection Engineers, Boston, 1982.
- [6] McCaffrey, B.: Momentum Implications for Diffusion Flames. Combustion and Flame 39: 191-209, 1980.
- [7] Thomas, P.H.: The size of flames from natural fires. 9th symposium on combustion (1961), S.844-859.