

# Grundlagen der Ingenieurmethoden – - Beispiele

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

**VIB**

## Beispiel: Strömungsgeschwindigkeit

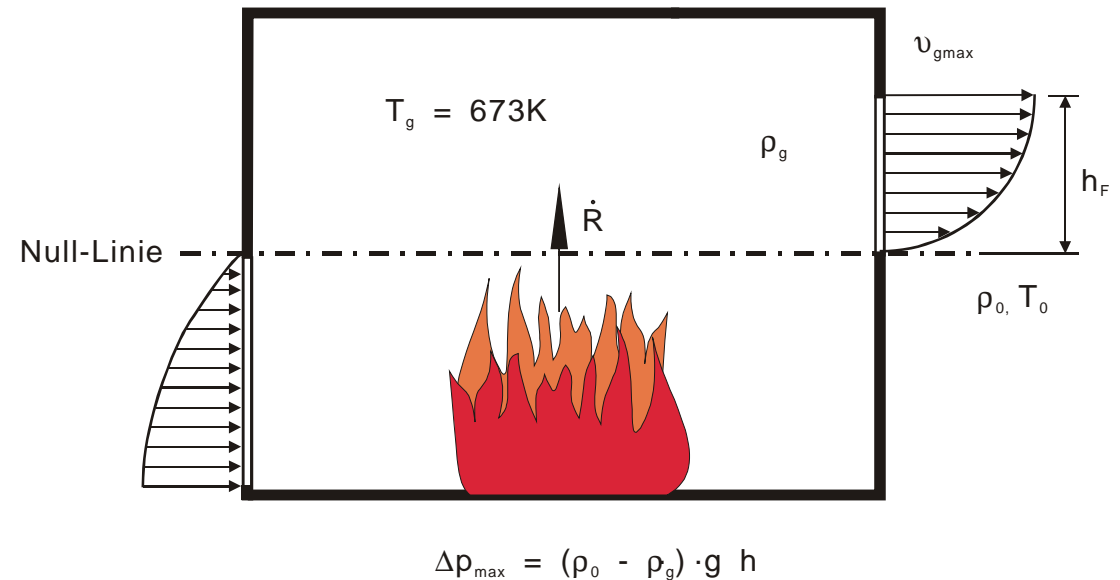
**Szenarium:** In einem Brandraum mit 673K liegt die Nulllinie genau in Brüstungshöhe der Fenster.

**Gesucht:** Maximale Ausströmgeschwindigkeit an der Fensteroberkante (Fensterhöhe:  $h_F = 1,5\text{m}$ )?

$$v_{g,\max} = \left( 2 \cdot g \cdot h_F \left( \frac{\rho_o}{\rho_g} - 1 \right) \right)^{1/2}$$

$$v_{g,\max} = \left( 2 \cdot 9,81 \cdot 1,5 \left( \frac{673}{293} - 1 \right) \right)^{1/2}$$

$$v_{g,\max} = 6,1781 \text{ m/s}$$



## Beispiel: Rauchgasmenge / Fenster

**Szenarium:** In einem Brandraum mit 673K liegt die Nulllinie genau in Brüstungshöhe der Fenster.

**Gesucht:** Menge der ausströmenden Rauchgase, wenn das Fenster 3x1,5m<sup>2</sup> groß ist ( $b_D \times h_F$ ). (Ausströmfaktor:  $c = 0,7$ )

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot c \cdot b_D \cdot \rho_g (2g(\frac{\rho_o}{\rho_g} - 1))^{1/2} \cdot h_F^{3/2}$$

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot 0,7 \cdot 3,0 \cdot \rho_o \frac{T_o}{T_g} (19,62 \cdot 1,2969)^{1/2} \cdot 1,5^{3/2}$$

$$\dot{m}_g = 0,4667 \cdot 3,0 \cdot 1,205/2,2969 \cdot 5,0443 \cdot 1,8371$$

$$\dot{m}_g = 6,8067 \text{ kg/s}$$

## Beispiel: Dachöffnung

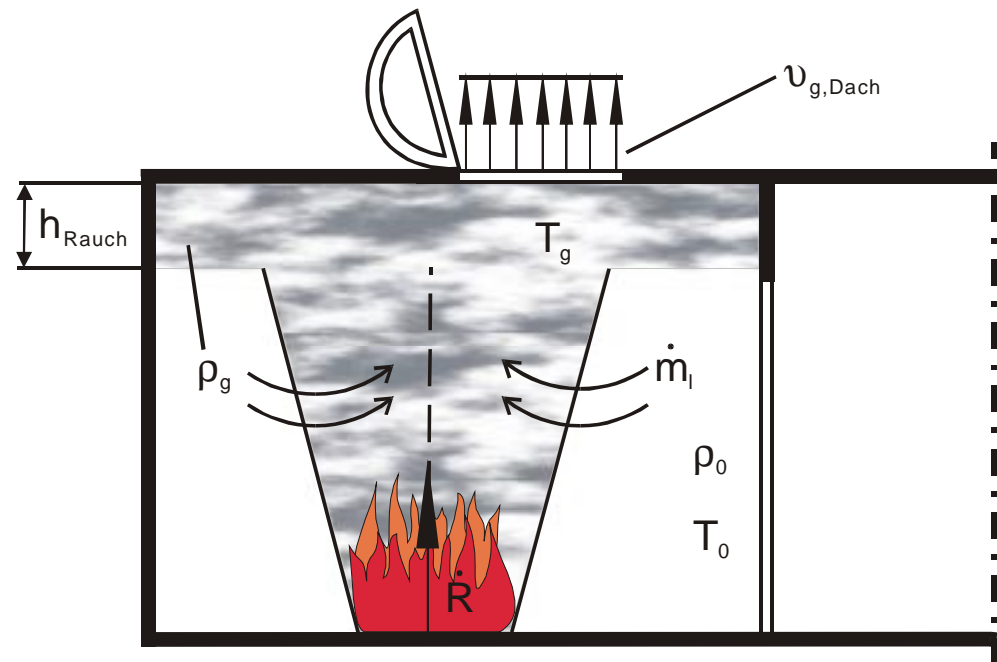
**Szenarium:** In einer Halle ist eine Rauchschrift von 200°C und  $h_{\text{Rauch}} = 3,0\text{m}$  Dicke.

**Gesucht:** Ausströmgeschwindigkeit aus einer horizontalen Dachöffnung.

$$v_{g,\text{Dach}} = [2g \cdot h_{\text{Rauch}} \left( \frac{\rho_o}{\rho_g} - 1 \right)]^{1/2}$$

$$v_{g,\text{Dach}} = [2 \cdot 9,81 \cdot 3,0 \left( \frac{473}{293} - 1 \right)]^{1/2}$$

$$v_{g,} = 6,0131 \text{ m/s}$$



$$\rho_g = \rho_o T_o / T_g$$

**VIB**

## Beispiel: Dachöffnung

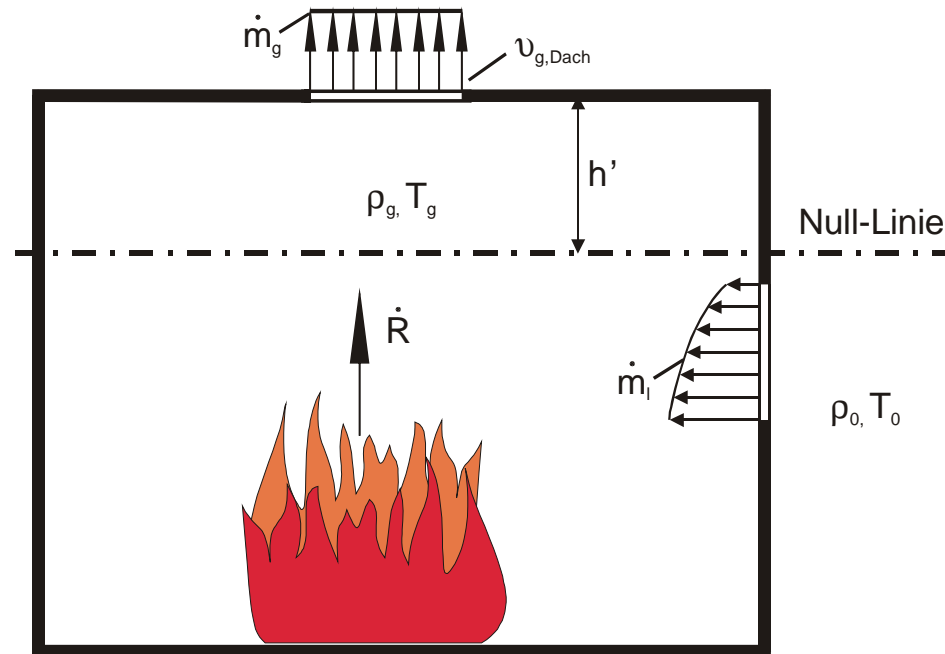
**Szenarium:** In einer Halle ist eine Rauchschicht von 200°C und  $h_{\text{Rauch}} = 3,0\text{m}$  Dicke.

**Gesucht:** Ausströmende Rauchgasmenge pro Quadratmeter horizontaler Öffnung (Ausströmkoefizient:  $c = 0,65$ ).

$$\dot{m}_g = c \cdot \rho_g \cdot v_g$$

$$\dot{m}_g = 0,65 \cdot 1,205 \cdot \frac{293}{473} \cdot 6,0131$$

$$\dot{m}_g = 2,9175 \text{ kg/m}^2\text{s}$$



$$v_{g,Dach} = [2gh'(\rho_0/\rho_g - 1)]^{1/2}$$

## Beispiel: Wohnraumbrand

Grundfläche	:	40 m <sup>2</sup>
Raumhöhe	:	2,8 m
Fensterfläche	:	6 m <sup>2</sup> (offen)
Brüstung	:	0,9 m
Fensterhöhe	:	1,5625 m
Türflächen	:	6 m <sup>2</sup> (geschlossen)
Türhöhe	:	2,0 m
Abbrandrate	:	300 kW/m <sup>2</sup>
Heizwert	:	4,8 kWh/kg
Luftbedarf	:	5,3 kgL/kgBr

## Beispiel: Wohnraumbrand (Fortsetzung)

**Gesucht:** Lage der Nulllinie?

**Randbedingungen:** Mittlere Raumtemperatur 673K stöchiometrischer Abbrand.

$$y^u = \frac{h_F}{1 + \left[ \frac{\rho_o}{\rho_g} \left( \frac{r + \Phi}{r} \right)^2 \right]^{1/3}}$$

$$\frac{\rho_o}{\rho_g} = \frac{T_g}{T_o} = \frac{673}{293} = 2,2969$$

$$\frac{r + \Phi}{r} = 1 + \frac{\Phi}{r} = 1 + \frac{\dot{R}}{\tilde{r}/\Phi}$$

**Legende:**

$r$  = stöch. Luftmenge (kg) pro kg Brennstoff

$\Phi$  = 1,0 (stöchiometrischer Abbrand)

$$\dot{R} = \frac{\dot{Q}}{H_u} \cdot A = \frac{300}{4,8} \cdot 40$$

$$\dot{R} = 2500 \text{ kg/h} = 0,6944 \text{ kg/s}$$

**VIB**

## Beispiel: Wohnraumbrand (Fortsetzung)

$$\frac{r + \Phi}{r} = 1 + \frac{0,6944}{5,3/1,0} = 1,1310$$

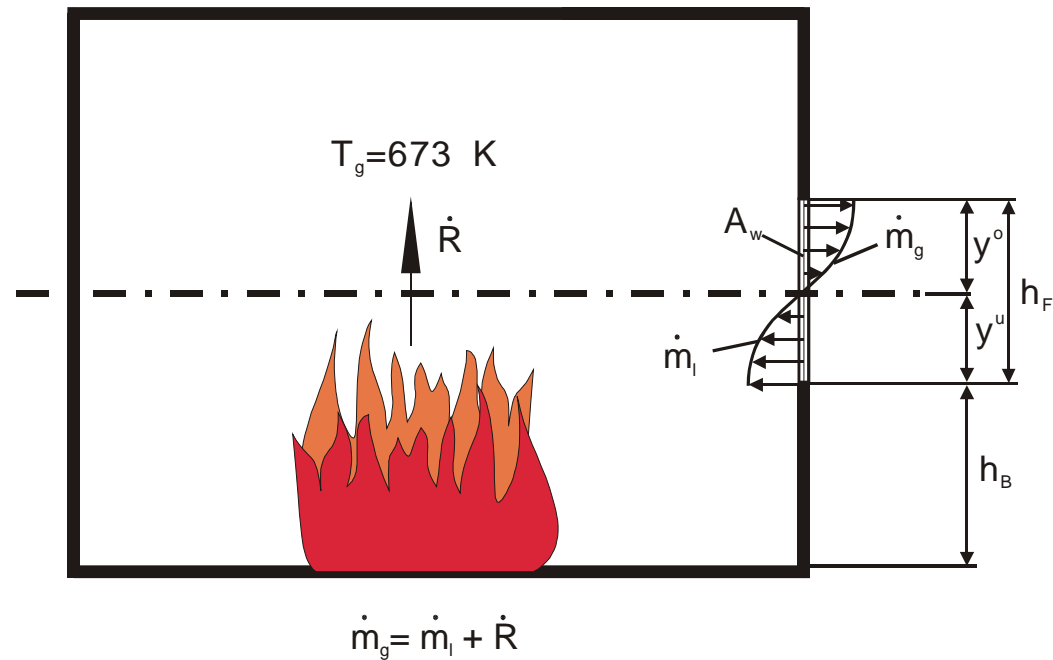
$$y^u = \frac{1,5625}{1 + [2,2969 + 1,2792]^{1/3}}$$

$$h_F = y^u + y^o$$

$$y^o = 1,5 - 0,678$$

$$y^n = 0,1678 \text{ m}$$

$$y^o = 0,9447 \text{ m}$$





## Massenstromgleichung

Für  $\dot{m}_g$  und  $\dot{m}_l$  erhält man die folgenden Ausdrücke:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot c \cdot A_w \cdot h_D^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\rho_g \cdot \left( 2 \cdot g \cdot \left( \frac{\rho_0}{\rho_g} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}}}{\left[ 1 + \left( \frac{\rho_g}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{r}{r + \Phi} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{2}{3}}}$$

$$\dot{m}_l = \frac{2}{3} \cdot c \cdot A_w \cdot h_D^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{\rho_0 \cdot \left( 2 \cdot g \cdot \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_0} \right) \right)^{\frac{1}{2}}}{\left[ 1 + \left( \frac{\rho_0}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{r + \Phi}{r} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{2}{3}}}$$

**VIB**

## Beispiel: Wohnraumbrand (Fortsetzung)

**Gesucht:** Ausströmende Rauchgasmenge  
(Ausströmfaktor  $c=0,7$ )

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot c \cdot A_w \cdot h_F^{1/2} \cdot F_1/F_2$$

$$F_1 = \rho_g (2g \cdot (\frac{\rho_o}{\rho_g} - 1))^{1/2}$$

$$F_2 = (1 + (\frac{\rho_o}{\rho_g})^{1/3} \cdot (\frac{r + \Phi}{r})^{2/3})^{2/3}$$

$$F_1 = \rho_o \cdot \frac{T_o}{T_g} \cdot (2g (\frac{T_g}{T_o} - 1))^{1/2}$$

$$F_1 = 1,205/2,2969(19,62 \cdot 1,2969)^{1/2}$$

$$F_1 = 2,6464 \text{ kg/m}^{5/2} \text{ s}$$

$$F_2 = (1 + 1,3194 \cdot 1,0855)^{3/2}$$

$$F_2 = 2,4322^{3/2} = 3,7931$$

$$\dot{m}_g = 0,4667 \cdot 6 \cdot 1,25 \cdot 2,6464/3,7991$$

$$\dot{m}_g = 2,4421 \text{ kg/s}$$

## Beispiel: Wohnraumbrand (Fortsetzung)

**Gesucht:** Menge der einströmenden Luft?  
War die Verbrennung wirklich stöchiometrisch?

$$\dot{m}_l = \dot{m}_g - \dot{R} = 1,7477 \text{ kg/s}$$

**Luftbedarf:**

$$\dot{m}_l = \dot{R} \cdot r$$

$$\dot{m}_l = 0,6944 \cdot 5,3$$

$$\dot{m}_l = 3,6803 \text{ kg/s (stöchiometrisch)}$$

$$\Phi = \frac{\dot{m}_{l,\text{stöch}}}{\dot{m}_{l,\text{real}}} = \frac{3,6803}{1,7477} = 2,1058 > 1,0$$

**Antwort:** Der Brand ist stark unterventiliert!

**VIB**

# Gasgesetz

## Es gilt folgende Annahme:

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

## Für die Gasdichte folgt daraus:

$$\rho_g = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_g}$$

## Beispiel:

Brandraum mit 1000K, Abbrand von Holz:  $r = 5.2 \text{ kg Luft/kg Holz}$   
( $\Phi = 1.0$ ),  $T_0 = 293 \text{ K}$ ,  $\rho_0 = 1.205 \text{ kg/m}^3$ ,  $c = 0.7$  ergibt:

$$\dot{m}_l = 0.474 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_D}$$

**VIB**

## Beispiel: Wohnzimmerbrand

Fensteröffnung:  $A_w = 1.0 \text{ m}^2$  (offen); Fensterhöhe:  $h_D = 1.0 \text{ m}$

Wie groß ist die max. Brandleistung?

$$\dot{Q} = \dot{m}_l \cdot \frac{\dot{H}_u}{r} \Rightarrow \Phi = 1.0 \Rightarrow \frac{H_u}{r} \approx 0.9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$
$$\dot{m}_l = 0.474 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_D}$$

Legende:

$r = 5.2 \text{ kg Luft/kg Holz}$

$H_u = 4.8 \text{ kWh/kg Holz}$

$$\dot{Q} = 0.474 \cdot 1.0 \cdot \sqrt{1} \cdot \frac{4.8}{5.2} \frac{[\text{kWh/kg}]}{[\text{kgL/kg}]} \cdot [3600\text{s/h}]$$

für  $1 \times 1 \text{ m}^2$  Fensterfläche:

$$\dot{Q} = 1575 \text{ kW}$$

allgemein gilt:

$$\dot{Q} \leq 1575 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_D} \quad [\text{kW}]$$

**VIB**