

# Formelsammlung »BRAND«



2021.01

FG Brandtechnologie und  
Brandschutzingenieurwesen

## Vorwort

Die aufgeführten Formeln dienen zur Bearbeitung der Übungsaufgaben der Vorlesungen

- »Grundlagen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes« (B.Sc.),
- »Modellierung von Bränden« (M.Sc.) und
- »Numerische Methoden« (M.Sc.).

Die verwendeten Symbole und Formelzeichen entsprechen dem internationalen (SI-) Standard bzw. der gebräuchlichen Darstellungsweise der Brandtechnologie.

Anregungen und Wünsche hinsichtlich Form oder Inhalt des Dokumentes sind ausdrücklich erwünscht an: [sailer@uni-wuppertal.de](mailto:sailer@uni-wuppertal.de)

# Inhalt

<b>1</b>	<b>GRÖßEN, EINHEITEN, DIMENSIONEN, KONSTANTEN .....</b>	<b>4</b>
1.1	SI-BASISEINHEITEN (AUSWAHL)* .....	4
1.2	ABGELEITETE SI-EINHEITEN (AUSWAHL)* .....	4
1.3	KONSTANTEN (AUSWAHL) .....	4
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN .....</b>	<b>5</b>
2.1	GEOMETRIE .....	5
2.2	UMRECHNUNG ZWISCHEN TEMPERATUREINHEITEN (AUSWAHL) .....	5
2.3	HYDROSTATIK .....	5
2.4	REAKTIONSKINETIK .....	5
2.5	INTERPOLATION .....	5
2.6	NUMERISCHE ITERATION NACH NEWTON-RAPHSON .....	5
<b>3</b>	<b>IDEALE GASE .....</b>	<b>6</b>
3.1	GRUNDLAGEN .....	6
3.2	MOLARE GRÖßEN .....	6
3.3	MASSENANTEIL, STOFFMENGENANTEIL .....	6
3.4	DRUCK, PARTIALDRUCK .....	6
<b>4</b>	<b>VERBRENNUNGSRECHNUNG .....</b>	<b>7</b>
4.1	GRUNDLAGEN .....	7
4.2	ENERGIEFREISETZUNG .....	7
4.3	STÖCHIOMETRISCHE VERBRENNUNG .....	8
<b>5</b>	<b>FLAMME, PLUME UND CEILING JET .....</b>	<b>9</b>
5.1	FLAMME .....	9
5.2	PLUME .....	9
5.3	CEILING JET .....	10
<b>6</b>	<b>BRANDDYNAMIK IN RÄUMEN .....</b>	<b>10</b>
6.1	GASGESCHWINDIGKEITEN .....	10
6.2	HOMOGENE RAUMTEMPERATUR, $\Delta p$ KONSTANT ÜBER DIE HÖHE DER VENTILATIONSÖFFNUNG .....	10
6.3	HOMOGENE RAUMTEMPERATUR, $\Delta p$ VERÄNDERLICH ÜBER $H_0$ .....	11
6.4	ZWEI RAUMTEMPERATURZONEN, $\Delta p$ VERÄNDERLICH ÜBER $H_0$ .....	11
6.5	ZWEI RAUMTEMPERATURZONEN, ÖFFNUNG IN DER DECKE .....	11
<b>7</b>	<b>WÄRMEÜBERTRAGUNG .....</b>	<b>12</b>
7.1	WÄRMELEITUNG (STATIONÄR, EINDIMENSIONAL) .....	12
7.2	KONVEKTIVER WÄRMEÜBERGANG .....	12
7.3	WÄRMEDURCHGANG (LEITUNG UND KONVEKTION) .....	12
7.4	ERMITTLUNG DES WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN .....	13
7.5	INSTATIONÄRE WÄRMEÜBERTRAGUNG (MIT KLEINER BIOT-ZAHL, $Bi < 1$ ) .....	14
7.6	STRAHLUNG .....	15
<b>8</b>	<b>VERZEICHNIS ÜBER DIE FORMELZEICHEN (AUSWAHL) .....</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>DATENBLÄTTER .....</b>	<b>20</b>
9.1	EIGENSCHAFTEN VON LUFT .....	20
9.2	THERMODYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN GEBRÄUCHLICHER STOFFE .....	21
9.3	STOFFEIGENSCHAFTEN FÜR DIE VERBRENNUNGSRECHNUNG .....	23

# 1 Größen, Einheiten, Dimensionen, Konstanten

## 1.1 SI-Basiseinheiten (Auswahl)\*

Größe	Formelzeichen	SI-Basiseinheit	Dimensionsymbol
Länge	$l$	Meter m	L
Masse	$m$	Kilogramm kg	M
Zeit	$t$	Sekunde s	T
thermodynamische Temperatur	$T$	Kelvin K	$\Theta$
Stoffmenge	$n$	Mol mol	N

## 1.2 Abgeleitete SI-Einheiten (Auswahl)\*

Größe	Formelzeichen	SI-Einheit	Dimension
Druck	$p$	Pascal Pa = N · m <sup>-2</sup> = J · m <sup>-3</sup>	M · L <sup>-1</sup> · T <sup>-2</sup>
Kraft	$F$	Newton N = kg · m · s <sup>-2</sup>	M · L · T <sup>-2</sup>
Energie (Wärme, Arbeit)	$E (Q, W)$	Joule J = kg · m <sup>2</sup> · s <sup>-2</sup> = N · m	M · L <sup>2</sup> · T <sup>-2</sup>
Leistung	$P$	Watt W = kg · m <sup>2</sup> · s <sup>-3</sup> = J · s <sup>-1</sup>	M · L <sup>2</sup> · T <sup>-3</sup>
Volumen	$V$	m <sup>3</sup>	L <sup>3</sup>
Geschwindigkeit	$v$	m · s <sup>-1</sup>	L · T <sup>-1</sup>
Beschleunigung	$a$	m · s <sup>-2</sup>	L · T <sup>-2</sup>
Impuls	$p$	N · s = kg · m · s <sup>-1</sup>	M · L · T <sup>-1</sup>
Dynamische Viskosität	$\eta$	N · s · m <sup>-2</sup>	M · L <sup>-1</sup> · T <sup>-1</sup>
Kinematische Viskosität	$\nu$	m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup>	L <sup>2</sup> · T <sup>-1</sup>
Spezifische Wärmekapazität	$c$	J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>	L <sup>2</sup> · T <sup>-2</sup> · $\Theta$ <sup>-1</sup>

## 1.3 Konstanten (Auswahl)

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	SI-Einheit
Universelle Gaskonstante	$R$	8,3145	$\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$
Stefan-Boltzmann-Konstante	$\sigma$	$5,67 \cdot 10^{-8}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$

\* nach Bureau International des Poids et Mesures: „The International System of Units (SI)“, 8th edition 2006

## 2 Grundlagen

### 2.1 Geometrie

Kreisumfang:	$U = 2 \cdot \pi \cdot R = \pi \cdot D$	$[U] = \text{m}$
Kreisfläche:	$A = \pi \cdot R^2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$	$[A] = \text{m}^2$
Kugeloberfläche:	$A_0 = 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \pi \cdot D^2$	$[A_0] = \text{m}^2$
Kugelvolumen:	$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot D^3$	$[V] = \text{m}^3$

### 2.2 Umrechnung zwischen Temperatureinheiten (Auswahl)

Temperaturskala	Einheit	in Kelvin	in Celsius
Kelvin	K	-	$T_C = T_K - 273,15$
Celsius	°C	$T_K = T_C + 273,15$	-
Fahrenheit	°F	$T_K = (T_F + 459,67) \cdot 5/9$	$T_C = (T_F - 32) \cdot 5/9$
Rankine	°Ra	$T_K = T_{Ra} \cdot 5/9$	$T_C = T_{Ra} \cdot 5/9 - 273,15$

### 2.3 Hydrostatik

Druck:	$p = \frac{F}{A}$	$[p] = \text{Pa}$
Hydrostatischer Druck:	$p(z) = p_0 + \rho \cdot g \cdot (z - z_0)$	$[p] = \text{Pa}$
Kontinuitätsgleichung:	$\dot{m} = \rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 = \text{konst.}$	$[\dot{m}] = \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
Bernoulli-Gleichung:	$p_1 + \frac{\rho_1}{2} v_1^2 + \rho_1 \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \frac{\rho_2}{2} v_2^2 + \rho_2 \cdot g \cdot z_2$	$[p] = \text{Pa}$

### 2.4 Reaktionskinetik

Arrhenius-Gleichung	$k = A \cdot e^{-\frac{E}{R \cdot T}}$
- $A$ ist hier der präexponentielle Faktor, $E$ die Aktivierungsenergie	

### 2.5 Interpolation

Lineare Interpolation	$f(x) = f_0 + \frac{f_1 - f_0}{x_1 - x_0} \cdot (x - x_0)$
- $x_0, f_0$ und $x_1, f_1$ sind bekannte Wertepaare, um $f(x)$ für $x$ zu bestimmen -	

### 2.6 Numerische Iteration nach Newton-Raphson

Ansatz für nichtlineare Gleichungen	$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$
-------------------------------------	--

### 3 Ideale Gase

#### 3.1 Grundlagen

Ideales Gasgesetz:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Luftdichte:

$$\rho_{\text{Luft}} = \frac{353}{T_{\text{Luft}}}$$

$$[\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Dichte:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$[\rho] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Spezifisches Volumen:

$$v = \frac{V}{m}$$

$$[v] = \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Umrechnung Wärmekapazitäten:

$$c_v = c_p - \frac{R}{M}$$

$$[c_v, c_p] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

- Wenn  $c_p, c_v$  massenspezifisch angegeben, ist  $R_s$  zu verwenden

#### 3.2 Molare Größen

Molare Masse:

$$M = \frac{m}{n}$$

$$[M] = \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Spezifische Gaskonstante

$$R_s = \frac{R}{M}$$

$$[R_s] = \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

Molares Volumen:

$$V_m = \frac{V}{n}$$

$$[V_m] = \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

-  $V_m = 22,414$  Liter pro Mol (bei  $T = 273,15$  K und  $p = 101325$  Pa)

Stoffmengendichte:

$$d = \frac{1}{V_m}$$

$$[d] = \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Umrechnung Wärmekapazitäten

$$\bar{c}_v = \bar{c}_p - R$$

$$[\bar{c}_v, \bar{c}_p] = \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

#### 3.3 Massenanteil, Stoffmengenanteil

- Indizes: ges = gesamt,  $i$  = betrachtete Komponente

Massenanteil:

$$w_i = \frac{m_i}{m_{\text{ges}}}$$

$$[w_i] = 1$$

Stoffmengenanteil:

$$x_i = \frac{n_i}{n_{\text{ges}}}$$

$$[x_i] = 1$$

Umrechnungen:

$$w_i = \frac{m_i}{\sum m_i} = \frac{M_i \cdot n_i}{\sum M_i \cdot n_i} = \frac{M_i \cdot x_i}{\sum M_i \cdot x_i}$$

$$x_i = \frac{n_i}{\sum n_i} = \frac{m_i / M_i}{\sum m_i / M_i} = \frac{w_i / M_i}{\sum w_i / M_i}$$

#### 3.4 Druck, Partialdruck

Partialdruck:

$$p_i = \frac{n_i}{\sum n_i} \cdot p_{\text{ges}} = x_i \cdot p_{\text{ges}} = n_i \cdot \frac{R \cdot T}{V_{\text{ges}}}$$

Gesamtvolumen:

$$V_{\text{ges}} = \sum \frac{n_i \cdot R \cdot T}{p_i}$$

Gesamtdruck:

$$p_{\text{ges}} = \frac{1}{V_{\text{ges}}} \sum p_i \cdot V_{\text{ges}} = \frac{R \cdot \sum n_i \cdot T_i}{V_{\text{ges}}}$$

## 4 Verbrennungsrechnung

### 4.1 Grundlagen

Zu-/abgeführte Wärme:  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$   $[Q] = \text{J}$

$$Q = \int_t \dot{Q}(t) dt$$

Zu-/abgeführter Wärmestrom:  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$   $[\dot{Q}] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$

Luft\*: - Zusammensetzung  $x_{\text{O}_2} = 0,21; x_{\text{N}_2} = 0,79$   $[x_i] = \frac{\text{mol}}{\text{mol}}$

$$M_{\text{Luft}} = x_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2} + x_{\text{N}_2} \cdot M_{\text{N}_2} = 28,84 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

- Verhältnis Luft/O<sub>2</sub>  $\frac{x_{\text{Luft}}}{x_{\text{O}_2}} = \frac{1}{0,21} = 4,762$

- Verhältnis N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>  $\frac{x_{\text{N}_2}}{x_{\text{O}_2}} = \frac{0,79}{0,21} = 3,762$

\* genähert

### 4.2 Energiefreisetzung

Wärmefreisetzungsrate:  $\dot{Q} = \chi \cdot \dot{m} \cdot \Delta h_c = \dot{m} \cdot \Delta h_{\text{eff}} = \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta h_{\text{eff}}$   $[\dot{Q}] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$   
-  $A_f$  ist die Brandfläche

... über Sauerstoffverbrauch:  $\dot{Q} = 13,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kgO}_2} \cdot (x_{\text{O}_2, \text{zu}} - x_{\text{O}_2, \text{ab}}) \cdot \dot{V}_{\text{ab}} \cdot \rho_{\text{O}_2}$

... dimensionslos:  $\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{c_p \cdot T_{\infty} \cdot \rho_{\infty} \cdot \sqrt{g \cdot D^3}}$

Verbrennungseffektivität (Chi):  $\chi = \frac{\Delta h_{\text{eff}}}{\Delta h_c}$   $[\chi] = 1$

Poolbrand:  $\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \cdot (1 - e^{-K\beta \cdot D})$   $[\dot{m}''] = \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$

Wärmefreisetzung aus Standard-Bildungsenthalpien:  $[\Delta H] = \text{kJ}$

$$\Delta H_f = [\sum(n_i \cdot \Delta \bar{h}_{b,i}^{298})]_{\text{Produkte}} - [\sum(n_i \cdot \Delta \bar{h}_{b,i}^{298})]_{\text{Edukte}}$$

-  $\Delta H_f$  = heat of formation, wenn Reaktanden und Produkte bei 25 °C vorliegen

Bildungsenthalpie (T):  $\Delta h_{b,i}(T) = \Delta h_{b,i}^{298} + \int_{298\text{K}}^T c_{p,i} \cdot dT$   $[\Delta h] = \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$

### 4.3 Stöchiometrische Verbrennung

- Die Formeln gelten für jeweils 1 mol Brennstoff (engl. Fuel)

Sauerstoffkoeffizient:

$$r_{\text{O}} = \gamma_{\text{O}} \cdot \frac{32}{M_{\text{Fuel}}}$$

$$[r_{\text{O}}] = \frac{\text{kg}_{\text{O}_2}}{\text{kg}_{\text{Fuel}}}$$

$$\text{mit } \gamma_{\text{O}} = \left( c + \frac{h}{4} + s - \frac{o}{2} - \frac{cl}{4} - \frac{br}{4} \right)$$

$$[\gamma_{\text{O}}] = \frac{\text{mol}_{\text{O}_2}}{\text{mol}_{\text{Fuel}}}$$

Luftkoeffizient:

$$r_{\text{Luft}} = \gamma_{\text{O}} \cdot 4,762 \cdot \frac{M_{\text{Luft}}}{M_{\text{Fuel}}} = \gamma_{\text{Luft}} \cdot \frac{M_{\text{Luft}}}{M_{\text{Fuel}}}$$

$$[r_{\text{Luft}}] = \frac{\text{kg}_{\text{Luft}}}{\text{kg}_{\text{Fuel}}}$$

-  $r_{\text{Luft}}$  ist in einiger Fachliteratur invers definiert.

$$\text{mit } \gamma_{\text{Luft}} = \left( c + \frac{h}{4} + s - \frac{o}{2} - \frac{cl}{4} - \frac{br}{4} \right) \cdot 4,762$$

$$[\gamma_{\text{Luft}}] = \frac{\text{mol}_{\text{Luft}}}{\text{mol}_{\text{Fuel}}}$$

Stöchiometrisches Mengenverhältnis:

$$c_{\text{st}} = \frac{n_{\text{Fuel}}}{n_{\text{Fuel}} + \gamma_{\text{Luft}}}$$

$$[c_{\text{st}}] = 1$$

- Werte siehe Tabelle 6

Max. Entstehungsanteile:

$$\psi_{i,\text{max}} = \frac{n_{\text{max. in Produkt}} \cdot M_{\text{Produkt}}}{n_{\text{in Fuel}} \cdot M_{\text{Fuel}}}$$

- Sie werden in englischsprachiger Literatur als „Yields“ bezeichnet

Rauchpartikelentstehungsanteil:  $\psi_{\text{R}} = \frac{m_{\text{R}}}{\Delta m_{\text{Fuel}}}$

Äquivalenzverhältnis:

$$\Phi = \frac{(m_{\text{Fuel}}/m_{\text{Luft}})_{\text{aktuell}}}{(m_{\text{Fuel}}/m_{\text{Luft}})_{\text{stöch.}}} = r_{\text{Luft}} \cdot \left( \frac{m_{\text{Fuel}}}{m_{\text{Luft}}} \right)_{\text{akt.}} = \gamma_{\text{Luft}} \cdot \left( \frac{n_{\text{Fuel}}}{n_{\text{Luft}}} \right)_{\text{akt.}}$$

-  $\Phi < 1$  = brennstoffgesteuert,  $\Phi = 1$  = stöchiometrisch,  $\Phi > 1$  = ventilationsgesteuert



## 5 Flamme, Plume und Ceiling Jet

### 5.1 Flamme

Flammenlänge (mittlere):  $L = 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5} \frac{\text{m}}{\text{kW}^{2/5}} - 1,02 \cdot D$   $[L] = \text{m}$

- D ist der Durchmesser der Brandquelle

Flammenlänge (Reihenbrenner):  $L = 0,035 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{b}\right)^{2/3} \frac{\text{m}^{5/3}}{\text{kW}^{2/3}}$

- mit den Seitenlängen  $a$  und  $b$ ; gültig für  $b > 3a$

### 5.2 Plume

#### 5.2.1 Idealer Plume

Geschwindigkeit:  $v = 1,94 \cdot \left(\frac{g}{c_p \cdot T_\infty \cdot \rho_\infty}\right)^{1/3} \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot z^{-1/3}$   $[v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Massenstrom:  $\dot{m} = 0,20 \cdot \left(\frac{\rho_\infty^2 \cdot g}{c_p \cdot T_\infty}\right)^{1/3} \cdot \dot{Q}^{1/3} \cdot z^{5/3}$   $[\dot{m}] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Temperaturzuwachs:  $\Delta T_0 = 5,0 \cdot \left(\frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2}\right)^{1/3} \cdot \dot{Q}^{2/3} \cdot z^{-5/3}$   $[\Delta T] = \text{K}$

#### 5.2.2 Heskestad-Plume

Virtueller Ursprung:  $z_0 = 0,083 \cdot \dot{Q}^{2/5} \frac{\text{m}}{\text{kW}^{2/5}} - 1,02 \cdot D$   $[z_0] = \text{m}$

Geschwindigkeit für  $z > L$ :  $v = 3,4 \cdot \left(\frac{g}{c_p \cdot T_\infty \cdot \rho_\infty}\right)^{1/3} \cdot \dot{Q}_C^{1/3} \cdot (z - z_0)^{-1/3}$   $[v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

... für »Standardwerte«:  $v = \left(\frac{\dot{Q}_C}{(z - z_0)}\right)^{1/3} \frac{\text{m}^{4/3}}{\text{s} \cdot \text{kW}^{1/3}}$

- Gilt nur für  $z > L$ ; mit  $T_\infty = 293 \text{ K}$ ,  $c_p = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ,  $\rho_\infty = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Temperaturzuwachs für  $z > L$ :  $\Delta T_0 = 9,1 \cdot \left(\frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2}\right)^{1/3} \cdot \dot{Q}_C^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3}$   $[\Delta T] = \text{K}$

... für »Standardwerte«:  $\Delta T_0 = 25 \cdot \left(\frac{\dot{Q}_C^{2/5}}{(z - z_0)}\right)^{5/3} \frac{\text{K} \cdot \text{m}^{5/3}}{\text{kW}^{2/3}}$

- Gilt nur für  $z > L$ ; mit  $T_\infty = 293 \text{ K}$ ,  $c_p = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ,  $\rho_\infty = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Massenstrom für  $z > L$ :

$$\dot{m} = 0,071 \cdot \dot{Q}_C^{1/3} \cdot (z - z_0)^{5/3} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{kW}^{1/3} \cdot \text{m}^{5/3}} + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_C \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{kW}} \quad [\dot{m}] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Massenstrom für  $z \leq L$ :  $\dot{m} = 0,0056 \cdot \dot{Q}_C \cdot \frac{z}{L} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{kW}}$

Radius:  $r = 0,12 \left(\frac{T_0}{T_\infty}\right)^{1/2} \cdot (z - z_0)$   $[r] = \text{m}$

### 5.2.3 Thomas-Plume

Massenstrom:  $\dot{m} = 0,188 \cdot P \cdot z^{3/2} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^{5/2}} \quad [\dot{m}] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

### 5.2.4 McCaffrey-Plume

Geschwindigkeit:  $v = \kappa \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}}\right)^\eta \cdot \dot{Q}^{1/5} \quad [v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Temperaturzuwachs:  $\Delta T_0 = \left(\frac{\kappa}{0,9 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}\right)^2 \cdot \left(\frac{z}{\dot{Q}^{2/5}}\right)^{2 \cdot \eta - 1} \cdot T_\infty \quad [\Delta T] = \text{K}$

### 5.3 Ceiling Jet

-  $H$  ist der vertikale Abstand zwischen Brandquelle und Decke

Geschwindigkeit (für  $\frac{r}{H} \leq 0,15$ ):  $v_{\max} = 0,96 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{H}\right)^{1/3} \frac{\text{m} \cdot \text{m}^{1/3}}{\text{s} \cdot \text{kW}^{1/3}} \quad [v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Geschwindigkeit (für  $\frac{r}{H} > 0,15$ ):  $v_{\max} = 0,195 \cdot \frac{\dot{Q}^{1/3} \cdot H^{1/2}}{r^{5/6}} \frac{\text{m} \cdot \text{m}^{1/3}}{\text{s} \cdot \text{kW}^{1/3}}$

Temperaturzuwachs (für  $\frac{r}{H} \leq 0,18$ ):  $T_{\max} - T_\infty = \frac{16,9 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}} \frac{\text{K} \cdot \text{m}^{5/3}}{\text{kW}^{2/3}} \quad [\Delta T] = \text{K}$

Temperaturzuwachs (für  $\frac{r}{H} > 0,18$ ):  $T_{\max} - T_\infty = \frac{5,38 \cdot (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H} \frac{\text{K} \cdot \text{m}^{5/3}}{\text{kW}^{2/3}}$

## 6 Branddynamik in Räumen

Massenstrom  $\dot{m}_a = 0,5 \cdot A_v \cdot \sqrt{H_0} \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^{5/2}} \quad [\dot{m}] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

- Zuluft bei Raumbränden, gültig für  $T_g/T_a > 2,7$
- $H_0$  ist die Höhe der Ventilationsöffnung

Druckdifferenz:  $\Delta p(z) = z(\rho_a - \rho_g) \cdot g \quad [\Delta p] = \text{Pa}$

### 6.1 Gasgeschwindigkeiten

Ausströmende Gase:  $v_g(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p(z)}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot z \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \quad [v] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Einströmende Gase:  $v_a(z) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p(z)}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot z \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}}$

### 6.2 Homogene Raumtemperatur, $\Delta p$ konstant über die Höhe der Ventilationsöffnung

-  $h_l$  und  $h_u$  sind die Abstände von der neutralen Ebene zu den Mittelpunkten der unteren (l) bzw. oberen (u) Ventilationsöffnung A

Einströmende Gase:  $\dot{m}_a = C_d \cdot A_l \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_l \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \quad [\dot{m}_a] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Ausströmende Gase:  $\dot{m}_g = C_d \cdot A_u \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_u \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \quad [\dot{m}_g] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Neutrale Ebene:

$$\frac{h_l}{h_u} = \left( \frac{A_u}{A_l} \right)^2 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_a}$$

### 6.3 Homogene Raumtemperatur, $\Delta p$ veränderlich über $H_0$

- $H_0$  ist die Höhe der Ventilationsöffnung
- $h_l$  und  $h_u$  sind die Abstände von der neutralen Ebene zur unteren (l) bzw. oberen (u) Ventilationsöffnungsgrenze

Einströmende Gase:

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \cdot h_l^{3/2} \quad [\dot{m}_a] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

... mit Berücksichtigung der Abbrandrate:

$$\dot{m}_a = \frac{\frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \cdot H_0^{3/2}}{\left[ 1 + \left( \frac{1 + \dot{m}_b / \dot{m}_a}{\sqrt{\rho_g / \rho_a}} \right)^{2/3} \right]^{3/2}}$$

Ausströmende Gase:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \cdot h_u^{3/2} \quad [\dot{m}_g] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Neutrale Ebene:

$$h_l = \frac{H_0}{1 + (\rho_a / \rho_g)^{1/3}}$$

### 6.4 Zwei Raumtemperaturzonen, $\Delta p$ veränderlich über $H_0$

- $H_0$  ist die Höhe der Ventilationsöffnung
- $H_N$  und  $H_D$  sind die Höhe der neutralen Ebene bzw. der Rauchsicht über einem Referenzpunkt
- Der Nullpunkt für die Höhenmessung ist die untere Ventilationsöffnungsgrenze

Einströmende Gase:

$$\dot{m}_{a,1} = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \cdot (H_N - H_D)^{3/2} \quad [\dot{m}_a] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{a,2} = C_d \cdot W \cdot H_D \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (H_N - H_D) \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}}$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}} \cdot \sqrt{(H_N - H_D)} \cdot \left( H_N + \frac{1}{2} \cdot H_D \right)$$

Ausströmende Gase:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot W \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}} \cdot (H_0 - H_N)^{3/2}$$

Neutrale Ebene: mit dem Ansatz  $\dot{m}_a = \dot{m}_g$  zu ermitteln

### 6.5 Zwei Raumtemperaturzonen, Öffnung in der Decke

- $H_N$  und  $H_D$  sind die Höhe der neutralen Ebene bzw. der Rauchsicht über einem Referenzpunkt

Einströmende Gase:

$$\dot{m}_a = C_d \cdot A_l \cdot \rho_a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (H_N - H_D) \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_a}}$$

Ausströmende Gase:

$$\dot{m}_c = C_d \cdot A_c \cdot \rho_g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (H - H_N) \cdot (\rho_a - \rho_g) \cdot g}{\rho_g}}$$

- $A_c$  ist die Fläche der Ventilationsöffnung in der Decke

Neutrale Ebene: mit dem Ansatz  $\dot{m}_a = \dot{m}_g$  zu ermitteln

## 7 Wärmeübertragung

- Das (Minus-) Vorzeichen des berechneten Wärmestroms gibt dessen Richtung an.

Wärmestromdichte:  $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$   $[\dot{q}] = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

### 7.1 Wärmeleitung (stationär, eindimensional)

Fouriersches Gesetz:  $\dot{Q} = A \cdot \frac{k}{d_{W_{12}}} \cdot (T_{W_1} - T_{W_2})$   $[\dot{Q}] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$

- Indizes:  $W_1, W_2$  = Wandbegrenzungen

### 7.2 Konvektiver Wärmeübergang

- siehe auch Abschnitt 7.4

Konvektiver Wärmestrom:  $\dot{Q} = A \cdot h \cdot (T_W - T_{F,\infty})$   $[\dot{Q}] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$

- Indizes: W = Wand, F = Fluid,  $\infty$  = ungestört

### 7.3 Wärmedurchgang (Leitung und Konvektion)

Wärmestrom<sub>Fluid1-Wand-Fluid2</sub>:  $\dot{Q} = A \cdot \frac{(T_{F1,\infty} - T_{F2,\infty})}{\frac{1}{h_{F1}} + \sum \frac{d_{W_i}}{k_i} + \frac{1}{h_{F2}}} = A \cdot U \cdot (T_{F1,\infty} - T_{F2,\infty})$

Wärmedurchgangskoeffizient<sub>Fluid1-Wand-Fluid2</sub>:  $U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{h_{F1}} + \sum \frac{d_{W_i}}{k_i} + \frac{1}{h_{F2}}}$   $[U] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

Wärmedurchgangswiderstand<sub>Fluid1-Wand-Fluid2</sub>:  $R = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_{F1}} + \sum \frac{d_{W_i}}{k_i} + \frac{1}{h_{F2}}$   $[R] = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$

- Obwohl flächenspezifisch angegeben, werden für  $R$  und  $U$  große Buchstaben verwendet (DIN EN ISO 6949)

Serielle Anordnung von Widerständen:  $R_{\text{ges}} = \sum_{i=1}^n R_i$   $[R] = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$

Parallele Anordnung von Widerständen:  $R_{\text{ges}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}}$   $[R] = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$

## 7.4 Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten

Formelzeichen:  $l_c$ : Charakteristische Länge

$v$ : Strömungsgeschwindigkeit

$\nu$ : Kinematische Viskosität (Ny)

$\eta$ : Dynamische Viskosität

$k_F$ : Wärmeleitfähigkeit des Fluids

$T_s$ : Temperatur der Oberfläche (engl. Surface)

$T_{F,\infty}$ : Ungestörte Fluidtemperatur

- Die Stoffwerte sind grundsätzlich bei mittlerer Temperatur des Fluides  $T_F$  einzusetzen.

Wärmeübergangskoeffizient

$$h = \frac{Nu \cdot k_F}{l_c}$$

Hinweis: Ermittlung der vorliegenden Nusselt-Zahl nach Strömungsart und Konfiguration aus Tabelle auf nachfolgender Seite

Nusselt-Zahl:

$$Nu = \frac{h \cdot l_c}{k_F}$$

$$[Nu] = 1$$

Kinematische Viskosität:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$$[\nu] = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Das griech.  $\nu$  nicht mit dem lat.  $\nu$  (Geschwindigkeit) verwechseln

Temperaturleitfähigkeit des Fluids:

$$a = \frac{k_F}{\rho \cdot c_p}$$

$$[a] = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Volumenausdehnungskoeffizient:

$$\beta = \frac{1}{T_F}$$

$$[\beta] = \text{K}^{-1}$$

Mittlere Fluidtemperatur:

$$T_F = \frac{T_w + T_{F,\infty}}{2}$$

$$[T_F] = \text{K}$$

Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{v \cdot l_c}{\nu}$$

$$[Re] = 1$$

- Zähler: lat.  $v$  (Geschwindigkeit), Nenner: griech.  $\nu$  (Nü, kinem. Visk.)

Prandtl-Zahl:

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{k_F} = \frac{\nu}{a}$$

$$[Pr] = 1$$

Grashof-Zahl:

$$Gr = \frac{l_c^3 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{F,\infty})}{\nu^2}$$

$$[Gr] = 1$$

- Nenner: griech.  $\nu$  (kinem. Viskosität), nicht lat.  $\nu$  (Geschwindigkeit)

Rayleigh-Zahl:

$$Ra = Gr \cdot Pr$$

$$[Ra] = 1$$

**Nusselt-Zahl in Abhängigkeit von Strömungsart und Konfiguration** (SFPE handbook)

**Erzwungene Konvektion** (Auswahl)

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Parallel zu einer flachen Platte mit der Länge <math>L_C</math>, laminar (<math>Re &lt; 10^5</math>)</li> </ul>                     | $Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Parallel zu einer flachen Platte mit der Länge <math>L_C</math>, turbulent (<math>5 \cdot 10^5 &lt; Re &lt; 10^7</math>)</li> </ul> | $Nu = 0,037 \cdot (Re^{4/5} - 871) \cdot Pr^{1/3}$   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Sphärische Überströmung (<math>3,5 &lt; Re &lt; 7,6 \cdot 10^4</math>)</li> </ul>   | $Nu = 2 + (0,4 \cdot Re^{1/2} + 0,06 \cdot Re^{2/3}) \cdot Pr^{0,4} \left( \frac{\mu_\infty}{\mu_w} \right)^{1/4}$ |

**Natürliche Konvektion** (Auswahl)

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufwärts an einer (warmen) vertikalen flachen Platte mit der Länge <math>L_C</math>, laminar (<math>Gr &lt; 4 \cdot 10^8</math>)</li> </ul> | $Nu = 0,52 \cdot Ra^{1/4}$ <p>(Vereinfachte Formel für Luft)</p>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufwärts an einer vertikalen flachen Platte mit der Länge <math>L_C</math>, keine Einschränkung</li> </ul>                                  | $Nu = (0,825 + 0,325 \cdot Ra^{1/6})^2$ <p>(Vereinfachte Formel für Luft)</p>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>An einer horizontalen flachen Platte (nach oben gerichtet)</li> </ul>   | $Nu = 0,54 \cdot Ra^{1/4} \text{ (für } 10^5 < Ra < 10^7)$ $Nu = 0,15 \cdot Ra^{1/3} \text{ (für } 10^7 < Ra < 10^{10})$ <p>mit <math>L_C = \frac{A}{U}</math></p> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>An einer horizontalen flachen Platte (nach unten gerichtet)</li> </ul>  | $Nu = 0,27 \cdot Ra^{1/4} \text{ (für } 10^5 < Ra < 10^{10})$ <p>mit <math>L_C = \frac{A}{U}</math></p>  |

**7.5 Instationäre Wärmeübertragung** (mit kleiner Biot-Zahl,  $Bi < 1$ )

Biot-Zahl:	$Bi = \frac{l_c \cdot h}{k} \sim \frac{\text{Wärmeleitwiderstand}}{\text{Wärmeübergangswiderstand}}$	$[Bi] = 1$
Charakteristische Länge:	$L_c = R \frac{V}{A}$	$[L_c] = m$
Dimensionslose Temperatur:	$T^* = \frac{T_\infty - T(t)}{T_\infty - T_0} = e^{-\left(\frac{h \cdot A}{\rho \cdot V \cdot c}\right) t}$	$[T^*] = 1$
Charakteristische Zeit	$\tau = \frac{L_c \cdot \rho \cdot c}{h}$	$[\tau] = s$
Abkühl-/ Erwärmungszeit:	$t = -\frac{L_c \cdot \rho \cdot c}{h} \cdot \ln \frac{T_\infty - T(t)}{T_\infty - T_0} = -\tau \cdot \ln(T^*)$	$[t] = s$
RTI-Wert	$RTI = \tau \cdot u^{1/2} = \frac{t_r}{\ln[(T_\infty - T_0)/(T_\infty - T(t))]} \cdot u^{1/2}$	$[RTI] = m^{1/2} \cdot s^{1/2}$

- Formelzeichen:  $t_r$ : Ansprechzeit des Sprinklers,  
 $t_\infty$ : Umgebende Temperatur (z. B. Brandgase bei Erwärmung)  
 $t_0$ : Anfangstemperatur

## 7.6 Strahlung

Ausstrahlung eines grauen ( $\alpha = \varepsilon$ ) Strahlers in schwarzer ( $\varepsilon = 1$ ) Umgebung:

$$\dot{Q} = A \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad [\dot{Q}] = \text{W}$$

### 7.6.1 Kopplungsgleichungen

Kopplung von Strahlung und Wärmeleitung:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{W_1}^4 - T_{W_2}^4) + \frac{k}{d_{W_{12}}} \cdot (T_{W_1} - T_{W_2}) \quad [\dot{q}] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

- Hier zwischen zwei Wänden  $W_1$  und  $W_2$

Kopplung von Strahlung und Konvektion:

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_W^4 - T_F^4) + h \cdot (T_W - T_F) \quad [\dot{q}] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

- Hier zwischen Wand (höhere Temperatur) und Fluid

### 7.6.2 Widerstandskoeffizient für Strahlung

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \longrightarrow h_{\text{Strahlung}} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$h_{\text{Strahlung}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)$$

### 7.6.3 (Schwarzer) Strahler

Spezifische Ausstrahlung des schwarzen Strahlers:

$$E_s = \int_0^\infty e_{\lambda,s} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad [E_s] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}}$$

Normal-spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers:

-  $I_s$  wird im Gegensatz zu  $E_s$  auf die Projektionsfläche bezogen. Bei hemisphär. Ausstrahlung gilt Faktor  $\pi$  (Lambertsches Cosinusetz).

$$I_s = \frac{E_s}{\pi} \quad [I_s] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}}$$

Sonst: 
$$I_s = \frac{E_s}{\cos(\beta)}$$

Spezifische spektrale Ausstrahlung des schwarzen Strahlers:

$$E_{\lambda,s} = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot (e^{(c_2/\lambda \cdot T)} - 1)} \quad [E_{\lambda,s}] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}}$$

$$c_1 = 3,7418 \cdot 10^8 \frac{\text{W} \cdot \mu\text{m}^4}{\text{m}^2}$$

$$c_2 = 1,4387 \cdot 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Wien'sches Verschiebungsgesetz:  $\lambda_{\text{max}} \cdot T_s = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

### 7.6.4 Sicht- bzw. Konfigurationsfaktoren

- Die Winkel  $\beta_1$  und  $\beta_2$  befinden sich zwischen der Sichtlinie  $r$  und den Normalvektoren der Flächen  $A_1$  und  $A_2$ .

Raumwinkelelement, unter dem das Element  $dA_2$  von  $dA_1$  aus erscheint:

$$d\omega_{2-1} = \frac{dA_{2,\text{projiziert}}}{r^2} = \frac{\cos \beta_2 \cdot dA_2}{r^2}$$

Konfigurationsfaktor zwischen den differentiellen Flächen  $dA_1$  und  $dA_2$ :

$$F_{12} = \frac{\cos \beta_1 \cdot d\omega_{21}}{\pi} = \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2 \cdot dA_2}{\pi \cdot r^2} \quad [F] = 1$$

Übertragene Strahlung von  $dA_1$  (mit der Emissivität  $E_1$ ) nach  $dA_2$ :

$$\dot{Q}_{12} = E_1 \cdot dA_1 \cdot F_{12} \quad [\dot{Q}] = \frac{J}{s} = W$$

Reziprokverhältnis der Sichtfaktoren:

$$A_1 \cdot F_{12} = A_2 \cdot F_{21}$$

Tabellarische Ermittlung der Sichtfaktoren für die Strahlung von einem Rechteck ( $a \times b$ ) auf eine parallel angeordnete inkrementelle Fläche  $dA$  im senkrechten Abstand  $L$  zu einer Ecke des Rechtecks:

Hilfsgrößen:  $A = \frac{a \cdot b}{L^2}, \quad B = \frac{a}{b}$

→ Sichtfaktoren in der nachfolgenden Tabelle ablesen.

**Tabelle 1 Ermittlung der Sichtfaktoren anhand der Größen A und B (nach Drysdale)**

A	B = 1	B = 0,9	B = 0,8	B = 0,7	B = 0,6	B = 0,5	B = 0,4	B = 0,3	B = 0,2	B = 0,1
10	0,231	0,231	0,231	0,230	0,228	0,226	0,222	0,216	0,204	0,177
5,0	0,215	0,215	0,214	0,213	0,211	0,207	0,201	0,192	0,176	0,144
4,0	0,208	0,208	0,207	0,205	0,203	0,199	0,193	0,183	0,166	0,133
3,0	0,197	0,197	0,197	0,194	0,191	0,187	0,180	0,169	0,152	0,120
2,0	0,178	0,178	0,177	0,175	0,172	0,167	0,161	0,149	0,132	0,102
1,0	0,139	0,138	0,137	0,136	0,133	0,129	0,123	0,113	0,099	0,075
0,9	0,132	0,132	0,131	0,130	0,127	0,123	0,117	0,108	0,094	0,071
0,8	0,125	0,125	0,124	0,122	0,120	0,116	0,111	0,102	0,089	0,067
0,7	0,117	0,116	0,116	0,115	0,112	0,109	0,104	0,096	0,083	0,063
0,6	0,107	0,107	0,106	0,105	0,103	0,100	0,096	0,088	0,077	0,058
0,5	0,097	0,096	0,096	0,095	0,093	0,090	0,086	0,080	0,070	0,053
0,4	0,084	0,083	0,083	0,082	0,081	0,079	0,075	0,070	0,062	0,048
0,3	0,069	0,068	0,068	0,068	0,067	0,065	0,063	0,059	0,052	0,040
0,2	0,051	0,051	0,050	0,050	0,049	0,048	0,047	0,045	0,040	0,032
0,1	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,027	0,026	0,024	0,021
0,09	0,026	0,026	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,024	0,022	0,019
0,08	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,022	0,022	0,020	0,017
0,07	0,021	0,021	0,021	0,021	0,020	0,020	0,020	0,019	0,018	0,016
0,06	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017	0,017	0,016	0,014
0,05	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,014	0,014	0,013
0,04	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,011	0,010
0,03	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,008
0,02	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
0,01	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003



### 7.6.5 Poolbrände (Näherung von Shokri und Beyler)

Emissivität eines Poolbrandes:

$$E = 58 \cdot (10^{-0,00823 \cdot D})$$

$$[E] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Eintreffende Strahlung am Boden (experimentell abgeleitet):

$$\dot{q}_{\text{Strahlung}} = 15,4 \left( \frac{L}{D} \right)^{-1,59}$$

$$[\dot{q}] = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

-  $L$  ist die Entfernung vom Poolmittelpunkt zum Ziel und  $D$  der Pooldurchmesser

### 7.6.6 Modell der punktförmigen Brandquelle (Näherung von Lees)

- wenn 1. die Größe des brennenden Gegenstandes sehr viel kleiner ist als die Entfernung vom Brand zum Ziel, und 2. der Brand gleichmäßig in alle Richtungen hin strahlt, dann kann die folgende Formel angewendet werden.

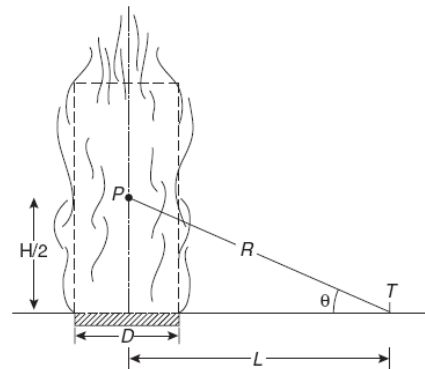
Auftreffende Strahlung:  $\dot{q}_{\text{Strahlung}} = \frac{\chi_r \cdot \dot{Q} \cdot \cos(\theta)}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$

$$[\dot{q}] = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Strahlungsanteil<sub>Poolbrand</sub>:  $\chi_r = 0,21 - 0,0034 \cdot D$

Mittlere Flammenhöhe:  $H = 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \cdot D$

Distanz<sub>Strahlungsquelle-Ziel</sub>:  $R = \sqrt{L^2 + \left(\frac{H}{2}\right)^2}$



## 8 Verzeichnis über die Formelzeichen (Auswahl)

Formelzeichen	Größe	SI-Einheit
$A$	Präexponentieller Faktor (Arrhenius-Gleichung)	-
$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$a$	Beschleunigung	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
$c_p$	Spezifische isobare Wärmekapazität	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$c_v$	Spezifische isochore Wärmekapazität	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\bar{c}_p$	Molare isobare Wärmekapazität	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\bar{c}_v$	Molare isochore Wärmekapazität	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$C_d$	Strömungskoeffizient (Kapitel 6)	
$D$	Durchmesser (Kapitel 2.1 und 5)	
$d$	Wanddicke (Kapitel 7)	$\text{m}$
$E$	Energie	$\text{J}$
$E_A$	Aktivierungsenergie	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
$F$	Kraft	$\text{N}$
$h$	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$k$	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante (Kapitel 2.4)	-
$k$	Wärmeleitkoeffizient	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$l, L$ (wg. Lesbarkeit)	Länge	$\text{m}$
$M$	Molare Masse	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
$m$	Masse	$\text{kg}$
$\dot{m}$	Massenstrom	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$n$	Stoffmenge	$\text{mol}$
$P$	Leistung	$\text{W}$
$p$	Druck	$\text{Pa}$
$p$	Impuls	$\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$
$Q$	Wärme	$\text{J}$
$\dot{Q}$	Wärmestrom, Wärmefreisetzungsrate	$\text{W}$
$R$	Universelle Gaskonstante	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$R$	Wärmedurchgangswiderstand	$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
$t$	Zeit	$\text{s}$
$T$	thermodynamische Temperatur	$\text{K}$
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$V$	Volumen	$\text{m}^3$
$v$	Geschwindigkeit	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$W$	Arbeit	$\text{J}$
$\Delta \bar{h}_b^{(298)}$	(Standard-) Bildungsenthalpie	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta \bar{h}_c$	Heizwert (engl. Combustion)	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\Delta \bar{h}_{eff}$	Effektive Verbrennungswärme	$\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\eta$	Dynamische Viskosität	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$



---

$\nu$	Kinematische Viskosität	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\rho$	Dichte	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

## 9 Datenblätter

### 9.1 Eigenschaften von Luft

**Tabelle 2 Zusammensetzung der Luft**

Komponente	Volumenanteil in %	Massenanteil in %
Stickstoff N <sub>2</sub>	78,09	75,52
Sauerstoff O <sub>2</sub>	20,94	23,13
Argon Ar	0,93	1,29
CO <sub>2</sub>	0,04	0,06

Molares Luftvolumen (bei  $T = 273 \text{ K}$ ):  $V_m = 22,414 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$

**Tabelle 3 Temperaturabhängige Eigenschaften von Luft**

$T$ in K	$\rho$ in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$c_p$ in $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\nu$ in $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$k$ in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\alpha$ in $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$Pr$
100	3,6010	$1,0266 \cdot 10^3$	$1,923 \cdot 10^{-6}$	0,00925	$0,0250 \cdot 10^{-4}$	0,768
200	1,7684	$1,0061 \cdot 10^3$	$7,514 \cdot 10^{-6}$	0,01809	$0,1016 \cdot 10^{-4}$	0,739
300	1,1774	$1,0057 \cdot 10^3$	$16,84 \cdot 10^{-6}$	0,02624	$0,2216 \cdot 10^{-4}$	0,708
400	0,8826	$1,0140 \cdot 10^3$	$25,90 \cdot 10^{-6}$	0,03365	$0,3760 \cdot 10^{-4}$	0,689
500	0,7048	$1,0295 \cdot 10^3$	$37,90 \cdot 10^{-6}$	0,04038	$0,5564 \cdot 10^{-4}$	0,680
600	0,5879	$1,0551 \cdot 10^3$	$51,34 \cdot 10^{-6}$	0,04659	$0,7512 \cdot 10^{-4}$	0,682
700	0,5030	$1,0752 \cdot 10^3$	$66,25 \cdot 10^{-6}$	0,05230	$0,9672 \cdot 10^{-4}$	0,684
800	0,4405	$1,0978 \cdot 10^3$	$82,29 \cdot 10^{-6}$	0,05779	$1,1951 \cdot 10^{-4}$	0,689
900	0,3925	$1,1212 \cdot 10^3$	$99,3 \cdot 10^{-6}$	0,06279	$1,4271 \cdot 10^{-4}$	0,696
1000	0,3524	$1,1417 \cdot 10^3$	$117,8 \cdot 10^{-6}$	0,06752	$1,6779 \cdot 10^{-4}$	0,702
1100	0,3204	$1,160 \cdot 10^3$	$138,6 \cdot 10^{-6}$	0,0732	$1,969 \cdot 10^{-4}$	0,704
1200	0,2947	$1,179 \cdot 10^3$	$159,1 \cdot 10^{-6}$	0,0782	$2,251 \cdot 10^{-4}$	0,707
1300	0,2707	$1,197 \cdot 10^3$	$182,1 \cdot 10^{-6}$	0,0837	$2,583 \cdot 10^{-4}$	0,705
1400	0,2515	$1,214 \cdot 10^3$	$205,5 \cdot 10^{-6}$	0,0891	$2,920 \cdot 10^{-4}$	0,705
1500	0,2355	$1,230 \cdot 10^3$	$229,1 \cdot 10^{-6}$	0,0946	$3,266 \cdot 10^{-4}$	0,705
1600	0,2211	$1,248 \cdot 10^3$	$254,5 \cdot 10^{-6}$	0,100	$3,624 \cdot 10^{-4}$	0,705
1700	0,2082	$1,267 \cdot 10^3$	$280,9 \cdot 10^{-6}$	0,105	$3,977 \cdot 10^{-4}$	0,705
1800	0,1970	$1,287 \cdot 10^3$	$308,1 \cdot 10^{-6}$	0,111	$4,379 \cdot 10^{-4}$	0,704
1900	0,1858	$1,309 \cdot 10^3$	$338,5 \cdot 10^{-6}$	0,117	$4,811 \cdot 10^{-4}$	0,704
2000	0,1762	$1,338 \cdot 10^3$	$369,0 \cdot 10^{-6}$	0,124	$5,260 \cdot 10^{-4}$	0,702
2100	0,1682	$1,372 \cdot 10^3$	$399,6 \cdot 10^{-6}$	0,131	$5,680 \cdot 10^{-4}$	0,703
2200	0,1602	$1,419 \cdot 10^3$	$432,6 \cdot 10^{-6}$	0,139	$6,115 \cdot 10^{-4}$	0,707
2300	0,1538	$1,482 \cdot 10^3$	$464,0 \cdot 10^{-6}$	0,149	$6,537 \cdot 10^{-4}$	0,710
2400	0,1458	$1,574 \cdot 10^3$	$504,0 \cdot 10^{-6}$	0,161	$7,016 \cdot 10^{-4}$	0,718
2500	0,1394	$1,688 \cdot 10^3$	$543,0 \cdot 10^{-6}$	0,175	$7,437 \cdot 10^{-4}$	0,730

## 9.2 Thermodynamische Eigenschaften gebräuchlicher Stoffe

**Tabelle 4 Molare Masse  $M$ , spezifische Gaskonstante  $R_s$ , spezifische isobare Wärmekapazität  $c_p$ , molare Bildungsenthalpie  $\Delta h_b$  ( $T = 298,15 \text{ K}$ ,  $p = 100 \text{ kPa}$ )**

Stoff	Aggregatzustand	$M$ in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	$R_s$ in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$c_p$ in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\Delta h_b$ in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$
Ar	g	39,848	0,20813	0,5203	0
C	fe	12,0107	0,69226	0,7091	0
C	g	12,0107	0,69226	1,7350	716,7
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	g	26,037	0,31933	1,693	226,77
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	g	28,053	0,29638	1,488	52,47
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	fl	46,068	0,18048	2,434	- 276,98
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	g	30,069	0,27651	1,730	- 84,73
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	g	44,096	0,18855	1,667	- 103,85
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	g	58,122	0,14305	1,690	- 124,73
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	fl	72,149	0,11524	2,297	- 173,83
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	fl	86,175	0,09648	2,263	- 198,8
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	fl	78,112	0,10644	1,7425	49,04
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	fl	100,20	0,08298	2,242	- 224,4
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	fl	114,23	0,07279	2,224	- 250,0
Ca	fe	40,078	0,20746	0,647	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	fe	74,093	0,11222	1,183	- 986,1
CaC <sub>2</sub>	fe	64,099	0,12971	0,974	- 59,4
CaCO <sub>3</sub>	fe	100,09	0,08307	0,818	- 1208,4
CaO	fe	56,077	0,14827	0,751	- 634,9
CaSO <sub>4</sub>	fe	136,14	0,06107	0,732	- 1434,1
CH <sub>2</sub> O	g	30,026	0,27691	1,167	- 115,90
CH <sub>3</sub> OH	fl	32,042	0,25949	2,546	- 239,45
CH <sub>4</sub>	g	16,042	0,51829	2,185	- 74,87
Cl <sub>2</sub>	g	70,906	0,11726	0,4788	0
CO	g	28,0101	0,29684	1,0404	- 110,53
CO <sub>2</sub>	g	44,010	0,18892	0,8438	- 393,51
COS	g	60,076	0,13840	0,672	- 138,40
F <sub>2</sub>	g	37,99680	0,21882	0,8239	0
H	g	1,00794	8,24897	20,622	217,998
H <sub>2</sub>	g	2,01588	4,12449	14,304	0
H <sub>2</sub> O	fl	18,0153	0,46152	4,1819	- 285,84
H <sub>2</sub> O	g	18,0153	0,46152	1,8646	- 241,83
H <sub>2</sub> S	g	34,081	0,24396	1,0049	- 20,6
HCl	g	36,461	0,22804	0,7991	- 92,31
HCN	g	27,025	0,30765	1,293	135,14
HCOOH	fl	46,025	0,18065	2,154	- 424,7
He	g	4,002602	2,07727	5,1932	0
HF	g	20,00634	0,41559	1,4564	- 273,3
Kr	g	83,80	0,09922	0,2480	0
Luft, trocken	g	28,9654	0,28705	1,0047	- 0,142
N	g	14,0067	0,59361	1,4840	472,7
N <sub>2</sub>	g	28,0134	0,29681	1,0396	0

Stoff	Aggregatzustand	$M$ in g · mol <sup>-1</sup>	$R_s$ in kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>	$c_p$ in kJ · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>	$\Delta h_b$ in kJ · mol <sup>-1</sup>
N <sub>2</sub> O	g	44,0128	0,18891	0,8700	82,05
Ne	g	20,1797	0,41202	1,0300	0
NH <sub>3</sub>	g	17,0305	0,48821	2,0921	- 45,94
NO	g	30,0061	0,27709	0,9965	90,25
NO <sub>2</sub>	g	46,0055	0,18073	0,7938	33,10
O	g	15,9994	0,51967	1,3696	249,18
O <sub>2</sub>	g	31,9988	0,25984	0,9181	0
OH	g	17,0073	0,48888	1,7576	47,52
S	fe	32,065	0,25930	0,7095	0
S	g	32,065	0,25930	0,7383	277,17
S <sub>2</sub>	g	64,130	0,12965	0,5068	128,6
SO <sub>2</sub>	g	64,064	0,12978	0,6219	- 296,8
Xe	g	131,293	0,06333	0,1583	0

Tabelle 5 Spezifische isobare Wärmekapazität  $c_p$  für div. Gase (J · mol<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>)

$T$ in °C	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	Luft	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO
0	29,09	29,26	28,62	29,08	33,47	35,92	29,11
100	29,12	29,53	28,94	29,15	33,71	38,17	29,16
200	29,20	29,92	29,07	29,30	34,08	40,13	29,29
300	29,35	30,39	29,14	29,52	34,54	41,83	29,50
400	29,56	30,87	29,19	29,79	35,05	43,33	29,77
500	29,82	31,32	29,25	30,09	35,59	44,66	30,08
600	30,11	31,75	29,32	30,41	36,15	45,85	30,41
700	30,40	32,14	29,41	30,72	36,74	46,91	30,74
800	30,69	32,49	29,52	31,03	37,34	47,86	31,05
900	30,98	32,82	29,65	31,32	37,95	48,72	31,36
1000	31,25	33,11	29,79	31,60	38,56	49,50	31,65
1100	31,52	33,38	29,95	31,86	39,16	50,21	31,92
1200	31,77	33,62	30,12	32,11	39,76	50,85	32,17
1300	32,00	33,85	30,29	32,35	40,34	51,44	32,41
1400	32,22	34,07	30,47	32,57	40,91	51,98	32,63
1500	32,43	34,28	30,65	32,77	41,47	52,47	32,84
1600	32,62	34,47	30,84	32,97	42,00	52,93	33,03
1700	32,80	34,65	31,02	33,15	42,52	53,35	33,21
1800	32,97	34,83	31,21	33,32	43,03	53,74	33,38
1900	33,12	35,00	31,39	33,48	43,51	54,10	33,54
2000	33,28	35,17	31,58	33,64	43,97	54,44	33,69

### 9.3 Stoffeigenschaften für die Verbrennungsrechnung

**Tabelle 6 Entflammbarkeitsdaten für Gase und Dämpfe**

	UEG		UEG $C_{st}$	OEG	
	in % Vol.	in $g \cdot m^{-3}$		in % Vol.	in $g \cdot m^{-3}$
Wasserstoff	4,0	3,6	0,13	75	67
Kohlenmonoxid	12,5	157	0,42	74	932
Methan	5,0	36	0,53	15	126
Ethan	3,0	41	0,53	12,4	190
Propan	2,1	42	0,52	9,5	210
n-Butan	1,8	48	0,58	8,4	240
n-Pentan	1,4	46	0,55	7,8	270
n-Hexan	1,2	47	0,56	7,4	310
n-Heptan	1,05	47	0,56	6,7	320
n-Oktan	0,95	49	0,58	-	-

**Tabelle 7 Heizwert und Brennwert div. chemischer Verbindungen (bei  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ )**

Brennstoff	Formel	Zustand	Heizwert in $kJ \cdot mol^{-1}$	Brennwert in $kJ \cdot mol^{-1}$
Graphit	C	s	393,51	393,51
Schwefel	S	s	296,83	296,83
Eisen	Fe	s	412,1	412,1
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	g	241,82	285,83
Kohlenmonoxid	CO	g	282,98	282,98
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	g	316,63	382,65
Methan	CH <sub>4</sub>	g	802,34	890,36
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	g	2043,9	2219,9
Methanol	CH <sub>4</sub> O	l	638,5	726,5
Ethanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	l	1235,81	1370,84
Benzol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	l	3037,5	3169,5
Heptan	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	l	4465	4817

**Tabelle 8 Wärmefreisetzung einiger chemischer Verbindungen (bei  $T = 25\text{ °C}$ )**

Brennstoff	$\Delta h_c$ in $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\Delta h_c$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	$\Delta h_c/r_o$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} (\text{O}_2)$	$\Delta h_c/r_{\text{Luft}}$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ (Luft)
Kohlenmonoxid (CO)	283	10,10	17,69	4,10
Methan (CH <sub>4</sub> )	800	50,00	12,54	2,91
Ethan (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	1428	47,45	11,21	2,96
Ethen (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	1411	50,53	14,74	3,42
Acetylen (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	1253	48,20	15,73	3,65
Propan (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	2044	46,45	12,80	2,97
n-Butan (n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	2650	45,69	12,80	2,97
n-Pentan (n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	3259	45,27	12,80	2,97
n-Octan (n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	5104	44,77	12,80	2,97
n-Hexan (c-C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> )	3680	43,81	12,80	2,97
Benzol (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	3120	40,00	13,06	3,03
Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	635	19,83	13,22	3,07
Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	1232	26,78	12,88	2,99
Aceton (CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> )	1786	30,79	14,00	3,25
D-Glucose (C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub> )	2772	15,40	13,27	3,08
Cellulose	-	16,09	13,59	3,15
Brennstoff		$\Delta h_c$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	$\Delta h_c/r_o$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} (\text{O}_2)$	$\Delta h_c/r_{\text{Luft}}$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ (Luft)
Polyethylen		43,28	12,65	2,93
Polypropylen		43,31	12,66	2,94
Polystyrol		39,85	12,97	3,01
Polyvinylchlorid		16,43	12,84	2,98
Polymethylmethacrylat		24,89	12,98	3,01
Polyacrylonitril		30,80	13,61	3,16
Polyoxymethylen		15,46	14,50	3,36
Polyethyleneterephthalat		22,00	13,21	3,06
Polycarbonat		29,72	13,12	3,04
Nylon 6,6		29,58	12,67	2,94
Brennstoff		$\Delta h_c$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$		$\Delta h_c/r_o$ in $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1} (\text{O}_2)$
Eiche (red,oak)		11,1		14,55
PU-Schau (hart)		24,12		13,99
Polyoxymethylengranulat		15,46		14,50
PU-Schaum (flexibel)		23,04		13,99
PVC-Granulat		18,00		12,96
Nylon-Granulat		29,58		12,67
PMMA-Granulat		24,84		12,98
Polystyrolschaum (hart)		39,85		12,97
Polypropylengranulat		43,31		12,66
Polystyrolgranulat		39,96		12,97
Polyethylengranulat		43,28		12,65
Polyethylenschaum		43,28		12,65
Methanol (liquid)		19,80		13,22