

# Verbrennungsrechnung Feste und flüssige Brennstoffe:

**Zusammensetzung:**  $C + H + S + O + N + A + W = 100 \%_{\text{Gew}}$

**Unterer Heizwert:**  $H_u = 34,8 C + 93,9 H + 10,46 S + 6,28 N - 10,8 O - 2,5 W$

$$[H_u] = \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$[H_o] = \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Für Erdölprodukte:  $H_u = 33,15 C + 94,1 H + 10,46(S - O)$

**Brennwert (oberer Heizw.):**  $H_o = H_u + h_{fg} m_{H_2O}$  mit  $h_{fg} = 2,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$  bei  $0^\circ\text{C}; 1 \text{ bar} \Rightarrow H_{o, \text{Norm}} = H_u + 2,5(9H + W)$

**Stöchiometrie:**

$$\left. \begin{array}{l} C + O_2 = CO_2 + 393,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kmol}} \\ 12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 44 \text{ kg} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{8}{3} \cdot \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_C} \text{ bzw. } \frac{11}{3} \cdot \frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kg}_C}$$

$$\left. \begin{array}{l} H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O + 241,8 \frac{\text{MJ}}{\text{kmol}} \\ 2 \text{ kg} + 16 \text{ kg} = 18 \text{ kg} \end{array} \right\} \Rightarrow 8 \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_{H_2}}; 9 \frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{H_2}}$$

$$\left. \begin{array}{l} S + O_2 = SO_2 + 296,9 \frac{\text{MJ}}{\text{kmol}} \\ 32 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 64 \text{ kg} \end{array} \right\} \Rightarrow 1 \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_S}; 2 \frac{\text{kg}_{SO_2}}{\text{kg}_S}$$

**Luftbedarf:**

Mindestsauerstoffmasse:  $O_{\text{min}} = \frac{8}{3} C + 8 H + S - O$

$$[O_{\text{min}}] = \frac{\text{kg}_{O_2}}{\text{kg}_{BS}} = 1$$

$$[M_{L_{\text{min}}}] = \frac{\text{kg}_{\text{trL}}}{\text{kg}_{BS}} = 1$$

Minimale Verbr.- Luftmasse bei trockener Luft:  $M_{L_{\text{min}}} = \frac{1}{0,232} \left( \frac{8}{3} C + 8 H + S - O \right) = 11,49 C + 34,48 H + 4,31(S - O)$

Volumetrischer Mindestluftbedarf an tr. Luft im Normzustand ( $0^\circ\text{C}; 1 \text{ bar}$ ):  $L_{\text{min}} = 8,88 C + 26,44 H + 3,33(S - O)$

Mindestluftbedarf unter Berücksichtigung der Luftfeuchte:  $L'_{\text{min}} = L_{\text{min}} (1 + 1,6 x)$

$$x_{\text{Sommer}} \approx 0,009 \frac{\text{kg}_D}{\text{kg}_{\text{fl}}}$$

$$x_{\text{Winter}} \approx 0,002 \frac{\text{kg}_D}{\text{kg}_{\text{fl}}}$$

$\lambda_{\text{Rostfeuerug}} = 1,25 \dots 1,35$  ( $\dots 1,7$  für Altanlagen)  
 $\lambda_{\text{Kohlestaubfeueug.}} = 1,05 \dots 1,15$   
 $\lambda_{\text{Zyklonfeueug.}} = 1,1 \dots 1,25$   
 $\lambda_{\text{Ölfeueug.}} = 1,03 \dots 1,1$

Tatsächlich erforderliche Verbrennungsluftmenge (Luftüberschuss):  $L = \lambda L'_{\text{min}}$

= "Luft-(überschuss-)zahl"

$$[L_{\text{min}}] = \frac{m_{\text{trL}}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

$$[L'_{\text{min}}] = \frac{m_{\text{fl}}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

$$[L] = \frac{m_{\text{fl}}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

**Rauchgasmenge:** Aus stöchiometrischen Beziehungen:

$$V_{CO_2} = \frac{11}{3} C \approx 1,867 C$$

$$V_{SO_2} \approx 0,68 S$$

$$V_{N_2} = 0,8 N + 0,79 L_{\text{min}}$$

$$[V_{CO_2}] = \frac{m_{CO_2}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

$$[V_{SO_2}] = \frac{m_{SO_2}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

$$[V_{N_2}] = \frac{m_{N_2}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

Unter Berücksichtigung von Luftüberschuss:

$$\Rightarrow V_{N_2} = 0,8 N + 0,79 \lambda L_{\text{min}}$$

$$\Rightarrow V_{O_2} = 0,21 (\lambda - 1) L_{\text{min}} \text{ (= überschüssige } O_2 \text{ - Menge)}$$

$$[V_{O_2}] = \frac{m_{O_2}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

Rauchgasmenge, trocken:

$$V_{\text{trG}} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \approx 1,867 C + 0,68 S + 0,8 N + [0,79 \lambda + 0,21 (\lambda - 1)] L_{\text{min}}$$

Zugehörige Wasserdampfmenge:

$$V_D = V_{H_2O} \approx 11,11 H + 1,24 W + 1,6 x \cdot \lambda L_{\text{min}}$$

$$[V_{\text{trG}}] = \frac{m_{\text{trG}}^3}{\text{kg}_{BS}}$$

Rauchgasmenge unter Berücksichtigung des Wasserdampfes:  $V_G = V_{\text{trG}} + V_D$

$$[V_D] = \frac{m_D^3}{\text{kg}_{BS}}$$

Bei unvollkommener Verbrennung zusätzlich:

$$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$$

$$12 \text{ kg} + 16 \text{ kg} = 28 \text{ kg}$$

$$[V_G] = \frac{m_G^3}{\text{kg}_{BS}}$$

**Verbrennungstemperatur:**

Leistungsbilanz als Ansatz:

$$\dot{m}_{BS} (H_u + c_{BS} t_{BS} + L \rho_L c_{pL} t_L) = \dot{m}_{BS} h_G$$

$$[\dot{m}_{BS}] = \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$[h_G] = \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{mit } \dot{m}_{BS} h_G = \dot{Q}_{\text{zu}}$$

$$[\dot{Q}_{\text{zu}}] = \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

Theoretische (verlustfreie) Verbrennungstemp.:

$$t_{\text{th}} = \frac{H_u}{V_G r_G c_{pG}} = \frac{h_G}{c_{pG}}$$

$$[V_G] = \frac{m_G^3}{\text{kg}_{BS}}$$

$$[r_G] = \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$[t] = ^\circ\text{C}$$

## Gasförmige Brennstoffe:

**Zusammensetzung:**  $CH_4 + CO + H_2 + C_m H_n + H_2S + O_2 + CO_2 + N_2 = 100 \%_{Vol}$

**Unterer Heizwert:**  $H_u = \sum r_i H_{ui}$       **Brennwert (oberer Heizw.):**  $H_o = \sum r_i H_{oi}$        $[H_u] = \frac{MJ}{m^3}$        $[H_o] = \frac{MJ}{m^3}$

**Stöchiometrie:**

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O + 241,8 \frac{MJ}{kmol}$$

$$1 m^3 + \frac{1}{2} m^3 \mapsto 1 m^3 \quad (!!!)$$

$$CH_4 + 2 O_2 = CO_2 + 2 H_2O$$

$$1 m^3 + 2 m^3 = 1 m^3 + 2 m^3$$

$$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2 + 283,0 \frac{MJ}{kmol}$$

$$1 m^3 + \frac{1}{2} m^3 \mapsto 1 m^3 \quad (!!!)$$

$$C_n H_m + \left(n + \frac{m}{4}\right) O_2 = n CO_2 + \frac{m}{2} H_2O$$

$$1 m^3 + \left(n + \frac{m}{4}\right) m^3 = n m^3 + \frac{m}{2} m^3$$

**Luftbedarf:** Volumetrischer Mindestluftbedarf an trockener Luft im Normzustand (0 °C; 1 bar):

$$L_{min} = 4,76 \left[ \frac{1}{2} (H_2 + CO) + 2CH_4 + \left(n + \frac{m}{4}\right) C_n H_m + \frac{3}{2} H_2S - O_2 \right]$$

$$[L_{min}] = \frac{m_{trL}^3}{m_{BG}^3} = 1$$

(Berücksichtigung der Luftfeuchte w. b. festen und flüssigen Brennst.)

Tatsächl. erforderl. Verbrennungsluftmenge (Luftüberschuss):  $L = \lambda L_{min}$        $[L] = \frac{m_{trL}^3}{m_{BG}^3} = 1$        $\lambda_{Gasfeuerung} = 1,03 \dots 1,1$

**Rauchgasmenge:** Stöchiometrische Verbrennung im Normzustand (0 °C; 1 bar):

$$V_{CO_2} = CO_2 + CO + CH_4 + n C_n H_m$$

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \lambda L_{min}$$

$$V_{O_2} = 0,21 (\lambda - 1) L_{min}$$

$$[V_{CO_2}] = \frac{m_{CO_2}^3}{m_{BG}^3} = 1$$

Rauchgasmenge, trocken:  $V_{trG} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$

$$[V_{trG}] = \frac{m_{trG}^3}{m_{BG}^3} = 1$$

$$[V_{N_2}] = \frac{m_{N_2}^3}{m_{BG}^3} = 1$$

Zugehörige Wasserdampfmenge:  $V_D = V_{H_2O} = H_2 + 2 CH_4 + \frac{m}{2} C_n H_m + 1,6 \times \lambda L_{min}$

$$[V_D] = \frac{m_D^3}{m_{BG}^3} = 1$$

$$[V_{O_2}] = \frac{m_{O_2}^3}{m_{BG}^3} = 1$$

Rauchgasmenge unter Berücksichtigung des Wasserdampfes:  $V_G = V_{trG} + V_D$

$$[V_G] = \frac{m_G^3}{m_{BG}^3} = 1$$

**Verbrennungstemperatur:** Leistungsbilanz als Ansatz:

$$\dot{V}_{BG} (H_u + c_{BG} t_{BG} + L \rho_L c_{pL} t_L) = \dot{V}_{BG} h_G$$

$$[\dot{V}_{BG}] = \frac{m^3}{s}; [h_G] = \frac{kJ}{m^3}$$

mit  $\dot{V}_{BG} h_G = \dot{Q}_{zu}$        $[\dot{Q}_{zu}] = \frac{kJ}{s}$

Theoretische (verlustfreie) Verbrennungstemperatur:  $t_{th} = \frac{H_u}{V_G r_G c_{pG}} = \frac{h_G}{c_{pG}}$

$$[V_G] = \frac{m_G^3}{m_{BG}^3} = 1; [r_G] = \frac{kJ}{kg K}; [t] = ^\circ C$$

## Güte der Verbrennung:

Mittels Kontrollwerten aus Gasanalyse:

Maximaler Kohlendioxid-Gehalt im Rauchgas:  $CO_{2max} \approx 1,867 \frac{C}{V_G}$        $[CO_{2max}] = \%_{Vol}$

Sauerstoff-Gehalt im Rauchgas:  $O_2 = 21 \left(1 - \frac{CO_2}{CO_{2max}}\right)$        $[O_2] = \%_{Vol}$

Luft-(überschuss-)zahl:  $\lambda = \frac{CO_{2max}}{CO_2} = \frac{21}{21 - O_2}$        $[\lambda] = 1$

Zusammensetzung, unterer Heizwert  $H_u$ , Mindestluftbedarf  $L_{\min}$ , feuchte Mindestrauchgasmenge  $V_{G,\min}$  und  $\text{CO}_{2,\max}$  für feste Brennstoffe

Brennstoff	Zusammensetzung in Gew.-%							$H_u$ kJ/kg	$L_{\min}$ m <sup>3</sup> /kg	$V_{G,\min}$ i.N.	$\text{CO}_{2,\max}$ Vol.-%
	C	H	O	N	S	A	W				
Koks (Gaskoks)	86	0,3		1,5	0,7	12	1,5	29 300	7,7	7,7	20,7
<b>Steinkohle</b>											
Ruhr u. Aachen	73-83	3,4-5,3	1,8-6,5	1,1	0,9	4-7	3-5	30 140-33 070	7,7-8,3	8,2-8,6	18,3-18,9
Saar	70-78	4,7-5,2	5,4-12,5	1,2	0,6	3-8	3-5	28 050-31 400	7,9	8,3	18,7
<b>Braunkohle</b>											
Rheinland	25-32	2	9-12	0,3	0,2	3	50-60	7 530-10 460	2,4-3,0	2,4-3,8	19,8
Lausitz	26,6	2,4	12,4	0,4	0,2	3	55	9 630	2,6	3,5	19,5

Zusammensetzung, unterer Heizwert  $H_u$ , Mindestluftbedarf  $L_{\min}$ , feuchte Mindestrauchgasmenge  $V_{G,\min}$  und  $\text{CO}_{2,\max}$  für flüssige Brennstoffe

Brennstoff	Dichte bei 20 °C kg/m <sup>3</sup>	Zusammensetzung in Gew.-%				$H_u$ kJ/kg	$L_{\min}$ m <sup>3</sup> /kg	$V_{G,\min}$ i.N.	$\text{CO}_{2,\max}$ Vol.-%
		C	H	O + N	S				
Heizöl S	0,90-0,92	84-88	11-12	1-3	2	39 800	10,6	11,4	15,9
Heizöl EL	0,82-0,86	86-87	13-14	0,5	0,3	42 700	11,2	11,8	15,2
Benzin	0,72	85	15	-	-	42 700	11,5	12,3	15,0
Dieselöl	0,84	86	13	0,2	0,3	41 800	11,2	11,9	15,5
Steinkohlenteeröl	1,06	89	7	3,4	0,6	37 700	9,8	9,9	18,1

Zusammensetzung, unterer Heizwert  $H_u$ , Mindestluftbedarf  $L_{\min}$ , feuchte Mindestrauchgasmenge  $V_{G,\min}$  und  $\text{CO}_{2,\max}$  für gasförmige Brennstoffe

Brenngas	Zusammensetzung in Vol.-%						$H_u$ kJ/m <sup>3</sup>	$L_{\min}$ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	$V_{G,\min}$ i.N.	$\text{CO}_{2,\max}$ Vol.-%
	CH <sub>4</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>				
i. N. = im Normzustand (0 °C und 1,013 bar)										
Erddgas L	82	3	-	-	1	14	31 800	8,4	9,4	11,8
Erddgas H	93	2	-	-	1	4	36 170	9,8	10,9	12,0
Generatorgas (BK)	2	-	15	27	7	49	5 760	1,19	1,98	20,1
Koksotengas	25	2	55	6	2	10	17 370	4,26	4,97	10,1

i. N. = im Normzustand (0 °C und 1,013 bar), BK = Braunkohle

Mittlere spez. Wärmekapazität  $c_p$  der Gase [kJ/kg K] im Temperaturbereich von 0 bis  $t$  °C

Temperatur in °C	Luft	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
0	1,0037	1,0394	0,9148	0,8165	1,8591	0,6083
100	1,0065	1,0404	0,9230	0,8677	1,8724	0,6365
200	1,0117	1,0434	0,9355	0,9122	1,8931	0,6634
300	1,0192	1,0490	0,9500	0,9509	1,9185	0,6877
400	1,0286	1,0568	0,9649	0,9850	1,9467	0,7090
500	1,0389	1,0661	0,9792	1,0152	1,9767	0,7274
600	1,0498	1,0764	0,9925	1,0422	2,0082	0,7433
800	1,0712	1,0976	1,0158	1,0881	2,0741	0,7692
1000	1,0910	1,1179	1,0350	1,1253	2,1414	0,7891
1200	1,1087	1,1363	1,0512	1,1560	2,2078	0,8049
1400	1,1243	1,1528	1,0651	1,1816	2,2714	0,8178
1600	1,1382	1,1673	1,0775	1,2032	2,3311	0,8286
1800	1,1505	1,1801	1,0888	1,2217	2,3866	0,8377
2000	1,1615	1,1914	1,0993	1,2377	2,4379	0,8457
2200	1,1714	1,2015	1,1092	1,2517	2,4851	0,8527

Molmasse, -volumen und Dichte (im Normzustand bei 0 °C und 1,013 bar) von Brennstoffbestandteilen, Luft und Rauchgaskomponenten

Stoff	Molmasse $M$ kg/kmol	Molvolumen $V_{Mol}$ $m^3/kmol$	Dichte $\rho$ kg/ $m^3$
Kohlenstoff C	12,01	-	-
Schwefel S	32,06	-	-
Sauerstoff O <sub>2</sub>	32,00	22,39	1,429
Stickstoff N <sub>2</sub>	28,16	22,40	1,257
Wasserstoff H <sub>2</sub>	2,016	22,43	0,090
Luft	28,96	22,40	1,293
Kohlendioxid CO <sub>2</sub>	44,01	22,26	1,977
Schwefeldioxid SO <sub>2</sub>	64,06	21,86	2,931
Wasserdampf H <sub>2</sub> O	18,02	22,41	0,804

Heizwert  $H_u$  und Brennwert  $H_o$  der Brenngase

Gas	Chem. Formel	$H_u$ in MJ/ $m^3$	$H_o$ in MJ/ $m^3$
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	10,81	12,78
Kohlenmonoxid	CO	12,64	12,64
Methan	CH <sub>4</sub>	35,93	39,87
Acetylen	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	56,9	58,9
Ethylen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	59,55	63,5
Ethan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	64,5	70,45
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	93	101
Butan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	123,8	134
Benzol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	144	150,3
Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S	28,14	30,3

Zusammensetzung der trockenen Luft

Bestandteil	Sauerstoff O <sub>2</sub>	Stickstoff N <sub>2</sub>	Verhältnis N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>
Mol- und Raumanteile	0,21	0,79	3,76
Vol.-%	21,0	79,0	3,76
Gew.-%	23,2	76,8	3,31

CO<sub>2max</sub> für verschiedene Brennstoffarten

Brennstoff	CO <sub>2max</sub> in Vol.-%
Stein- und Braunkohle	18,6–19,8
- Fettkohle	18,7
- Magerkohle	19,1
- Anthrazit	19,2
Koks	20,6
Heizöl	15,5–16,0
Erdgas	12,5

$t_{th}$ in °C	$t_{FR}$ in °C
Steinkohle 2200 – 2300	Steinkohlenstaubfeuerung 1200 – 1500 Schmelzfeuerung 1400 – 1800
Braunkohle 1400 – 1500	Braunkohlenstaubfeuerung 1000 – 1150 Wirbelschichtfeuerung 800 – 900
Heizöl S und EL 2000 – 2100	Heizölfеuerung 1200 – 1600
Erdgas rund 2000	Erdgasfeuerung 1200 – 1600

