

Verbrennungsrechnungen mit Emissionen

V.020502

Stoffwerte

$$\text{Atommassen} \quad M_{mH} := 1.008 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad M_{mC} := 12.01 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad M_{mO} := 16.00 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$\text{Molmasse Luft aus [BAER8], S.207} \quad M_{m\text{Luft}} := 28.965 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

1. Stöchiometrische Verbrennung von Methan $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ (1)

Molmassen



$$\text{Methan} \quad M_{m\text{CH}_4} := M_{mC} + 4 \cdot M_{mH} \quad M_{m\text{CH}_4} = 16.042 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$\text{CO}_2 \quad M_{m\text{CO}_2} := M_{mC} + 2 \cdot M_{mO} \quad M_{m\text{CO}_2} = 44.01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$\text{H}_2\text{O} \quad M_{m\text{H}_2\text{O}} := 2 \cdot M_{mH} + M_{mO} \quad M_{m\text{H}_2\text{O}} = 18.016 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$\text{O}_2 \quad M_{m\text{O}_2} := 2 \cdot M_{mO} \quad M_{m\text{O}_2} = 32.000 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

Für eine Wärmeproduktion von

$$Q := 1 \cdot \text{kWh}$$

einem unteren Heizwert von Methan von
([Dubbel17], S.D42)

$$h_u := 50 \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad h_u = 13.89 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

und einem auf den unteren Heizwert bezogenen
Kesselwirkungsgrad von

$$\eta_K := 1$$

ist folgende Methanmasse bzw.
Methanmenge zu verbrennen

$$M_{\text{CH}_4} := \frac{Q}{h_u \cdot \eta_K} \quad M_{\text{CH}_4} = 0.0720 \text{ kg}$$

$$N_{\text{CH}_4} := \frac{M_{\text{CH}_4}}{M_{m\text{CH}_4}} \quad N_{\text{CH}_4} = 4.488 \times 10^{-3} \text{ kmol}$$

Dabei entstehen **folgende Rauchgasanteile**

$$\text{aus (2)} \quad N_{\text{CO}_2} := N_{\text{CH}_4} \quad N_{\text{CO}_2} = 4.488 \times 10^{-3} \text{ kmol}$$

$$M_{\text{CO}_2} := N_{\text{CO}_2} \cdot M_{m\text{CO}_2} \quad M_{\text{CO}_2} = 0.198 \text{ kg}$$

$$N_{\text{H}_2\text{O}} := 2 \cdot N_{\text{CH}_4} \quad N_{\text{H}_2\text{O}} = 8.9764 \times 10^{-3} \text{ kmol}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} := N_{\text{H}_2\text{O}} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} \quad M_{\text{H}_2\text{O}} = 0.162 \text{ kg}$$

und benötigt

$$N_{\text{O}_2} := 2 \cdot N_{\text{CH}_4} \quad N_{\text{O}_2} = 8.976 \times 10^{-3} \text{ kmol}$$

$$M_{\text{O}_2} := N_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2} \quad M_{\text{O}_2} = 0.287 \text{ kg}$$

Luftmasse bei einem Sauerstoffmassenanteil [BAER8],S.207 von 0.23142

$$M_{\text{Luft}} := \frac{M_{\text{O}_2}}{0.23142} \quad M_{\text{Luft}} = 1.241 \text{ kg}$$

Luftmenge bei einem Sauerstoffmengenanteil [BAER8],S.207 von 0.20948

$$y_{\text{O}_2} := 0.20948 \quad N_{\text{Luft}} := \frac{N_{\text{O}_2}}{y_{\text{O}_2}} \quad (3) \quad N_{\text{Luft}} = 0.0429 \text{ kmol}$$

Produziertes Rauchgas

$$\text{totale Rauchgasmasse} \quad M_{\text{RG}} := M_{\text{CH}_4} + M_{\text{Luft}} \quad M_{\text{RG}} = 1.313 \text{ kg}$$

produzierte Rauchgasmenge (CO₂, H₂O, unverbrannter Anteil der Luft)

$$N_{\text{RG}_0} := N_{\text{CO}_2} + N_{\text{H}_2\text{O}} + (1 - y_{\text{O}_2}) \cdot N_{\text{Luft}} \quad N_{\text{RG}_0} = 0.0473 \text{ kmol}$$

gemessen wird nach der Kondensation des Wasserdampfs, dann bleibt noch

$$N_{\text{RG}} := N_{\text{CO}_2} + (1 - y_{\text{O}_2}) \cdot N_{\text{Luft}} \quad N_{\text{RG}} = 0.0384 \text{ kmol}$$

2. Verbrennung von Methan mit LuftüberschussDefinition des **Sauerstoffanteils im Rauchgas** (stöchiometrisch = 0) als Molenbruch y_{RG} mit der Überschussluftmenge $N_{\text{Lü}}$

$$y_{\text{RG}} = \frac{N_{\text{O}_2}}{N_{\text{RG}} + N_{\text{Lü}}} \quad (4)$$

Beispiel Gasmotor > 100 kW

$$y_{\text{RG}} := 0.05$$

durch Ersetzen von N_{O_2} nach (3)

$$y_{\text{RG}} = \frac{N_{\text{Luft}} \cdot y_{\text{O}_2}}{N_{\text{RG}} + N_{\text{Lü}}} \quad (5)$$

folgt aus (5) für die Überschussluftmenge

$$N_{\text{Lü}} := y_{\text{RG}} \cdot \frac{N_{\text{RG}}}{(y_{\text{O}_2} - y_{\text{RG}})} \quad (6) \quad N_{\text{Lü}} = 0.012 \text{ kmol}$$

und damit für die neue Rauchgasmenge

$$N_{RG\ddot{u}} := N_{RG} + N_{L\ddot{u}}$$

$$N_{RG\ddot{u}} = 0.05 \text{ kmol}$$

Kontrolle: Luftüberschuss

$$\lambda := \frac{N_{Luft} + N_{L\ddot{u}}}{(N_{Luft})}$$

$$\lambda = 1.281$$

Rauchgasvolumen bei Normalbedingungen aus

$$p := 1.01325 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \quad T := 273.15 \cdot \text{K} \quad R := 8314.5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

$$p \cdot V = N_{RG\ddot{u}} \cdot R \cdot T \quad (7) \quad V := N_{RG\ddot{u}} \cdot R \cdot \frac{T}{p} \quad V = 1.129 \text{ m}^3$$

Emissionen

Grenzwerte für CH-Luftreinhalteverordnung LRV

Beispiel Gasturbine > 40 MW

$$\text{Stickoxid} \quad M_{NO_x} := 250 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot V \quad M_{NO_x} = 2.824 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

$$\text{Kohlenmonoxid} \quad M_{CO} := 650 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot V \quad M_{CO} = 7.341 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

3. Verbrennung von Erdgas mit den Angaben aus [GWA]

Für eine Wärmeproduktion von

$$Q := 1 \cdot \text{kWh}$$

einem unteren Heizwert von [GWA]

$$h_u := 47.6 \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \quad h_u = 13.22 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

und einem auf den unteren Heizwert bezogenen
Kesselwirkungsgrad von

$$\eta_K := 1$$

ist folgende Erdgasmasse
zu verbrennen

$$M_{EG} := \frac{Q}{h_u \cdot \eta_K} \quad M_{EG} = 0.0756 \text{ kg}$$

Normdichte Erdgas aus [GWA]

$$\rho := 0.767 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

benötigtes Erdgasvolumen

$$V_{EG} := \frac{M_{EG}}{\rho} \quad V_{EG} = 0.0986 \text{ m}^3$$

Stöchiometrische Verbrennung

Volumenverhältnis Luft/Erdgas bei stöchiometrischer Verbrennung aus [GWA]

$$v_{\text{LEG}} := 9.65$$

Benötigtes Luftvolumen bei stöchiometrischer Verbrennung

$$V_{\text{Ls}} := v_{\text{LEG}} \cdot V_{\text{EG}} \quad V_{\text{Ls}} = 0.952 \text{ m}^3$$

Volumenverhältnis Rauchgas/Erdgas bei stöchiometrischer Verbrennung aus [GWA]

$$v_{\text{REG}} := 10.68$$

Entstehendes Rauchgasvolumen bei stöchiometrischer Verbrennung und Normbedingungen

$$V_{\text{RG}} := v_{\text{REG}} \cdot V_{\text{EG}} \quad V_{\text{RG}} = 1.053 \text{ m}^3$$

Wasserdampfvolumenanteil im Abgas aus [GWA]

$$v_{\text{H}_2\text{O}} := 0.188$$

Entstehendes trockenes Rauchgasvolumen bei stöchiometrischer Verbrennung und Normbedingungen

$$V_{\text{RGt}} := V_{\text{RG}} \cdot (1 - v_{\text{H}_2\text{O}}) \quad V_{\text{RGt}} = 0.8551 \text{ m}^3$$

Verbrennung mit Luftüberschuss

Volumenanteil Sauerstoff im trockenen Rauchgas (Messbedingung)

Beispiel Verbrennungsmotor > 100 kW

$$v_{\text{O}_2\text{RG}} := 0.05$$

Sauerstoffvolumenanteil in der Luft gemäss Abschnitt 1

$$v_{\text{O}_2} := y_{\text{O}_2} \quad v_{\text{O}_2} = 0.2095$$

Für den Luftüberschuss folgt analog der Gl.(6)

$$V_{\text{Lü}} := \frac{v_{\text{O}_2\text{RG}}}{v_{\text{O}_2} - v_{\text{O}_2\text{RG}}} \cdot V_{\text{RGt}} \quad V_{\text{Lü}} = 0.268 \text{ m}^3$$

Kontrolle Luftüberschuss

$$\lambda := \frac{(V_{\text{Ls}} + V_{\text{Lü}})}{V_{\text{Ls}}} \quad \lambda = 1.282$$

Rauchgasvolumen mit Luftüberschuss bei Normbedingungen

$$V_{RG} := V_{RGt} + V_{Lü} \quad V_{RG} = 1.123 \text{ m}^3$$

Emissionen Grenzwerte gemäss CH-Luftreinhalteverordnung LRV

Beispiel Verbrennungsmotor > 100 kW

Stickoxid $M_{NO_x} := 250 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot V_{RG} \quad M_{NO_x} = 2.808 \times 10^{-4} \text{ kg}$

Kohlenmonoxid $M_{CO} := 650 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot V_{RG} \quad M_{CO} = 7.301 \times 10^{-4} \text{ kg}$

Referenzen

- [BAER8] Baer, H.D.: Thermodynamik, 8.Aufl., Springer-Verlag, Berlin u.a.O., 1992.
- [Dubbel17] Beitz,W., Küttner,K.H. (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, Berlin u.a.O. 1990.
- [GWA] Eigenschaften der in der Schweiz verteilten Erdgase im Jahre 1998, Gas-Wasser-Abwasser 70(1999)4, 326. (Werte für Swissgas)