

Gleichung (46) gilt ausschließlich für vollständige Verbrennung, d. h., wenn jedes Sauerstoffmolekül  $O_2$  auch wirklich ein zur Verfügung stehendes Brennstoffmolekül erreicht und bei allen Brennstoffmolekülen die Oxidation vollständig erfolgt.

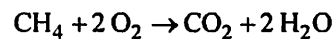
Aus Gleichung (43) folgt die für die Verbrennung von  $n_B = 1$  kmol Methanol benötigte Stoffmenge Sauerstoff  $O_2$ , die auch gleichzeitig die Mindestsauerstoffmenge  $n_{O_2, \min}$  der Verbrennung darstellt:

$$n_{O_2, \min} = \frac{3}{2} \text{ kmol} .$$

Aus der bekannten Mindestsauerstoffmenge  $n_{O_2, \min}$  folgt für die Methanolverbrennung (Gleichung (42)) unter Beachtung der Beziehung (45) die Mindestluftmenge

$$n_{L, \min} = 4,762 \cdot n_{O_2, \min} = \frac{3}{2} \cdot 4,762 \text{ kmol} = 7,143 \text{ kmol} .$$

☞ Für die Methanverbrennung nach Gleichung (27)



folgt für die Mindestsauerstoffmenge zur Verbrennung von  $n_B = 1$  kmol Methan  $CH_4$

$$n_{O_2, \min} = 2 \text{ kmol} .$$

☹ Bei realen Verbrennungsvorgängen ist es unter Einsatz der Mindestluftmenge  $n_{L, \min}$  unmöglich, eine vollständige Verbrennung zu verwirklichen. Da praktisch nicht jedes Sauerstoffmolekül  $O_2$  mit einem vorgesehenen Brennstoffmolekül in Kontakt kommt, müssen technische Feuerungen mit der Überschussluftmenge  $n_{L, \text{Üb}}$  betrieben werden, um so die Trefferwahrscheinlichkeit zu erhöhen. D. h. für die der Feuerung wirklich zugeführte Stoffmenge Luft  $n_L$  gilt

$$n_L = n_{L, \min} + n_{L, \text{Üb}} . \quad (47)$$

Unter dem Luftverhältnis  $\lambda$  versteht man den Quotienten aus der wirklich zugeführten Luftstoffmenge  $n_L$  und der Mindestluftmenge  $n_{L, \min}$ :


$$\lambda = \frac{n_L}{n_{L, \min}}; \quad \lambda = 1 . \quad (48)$$


Im praktischen Betrieb von Feuerungen ist die Auswahl der Größe des Luftverhältnisses  $\lambda$  ein Optimierungsproblem.

Mit steigender Überschussluftmenge  $n_{L, \text{Üb}}$  wird einerseits das Erreichen der vollständigen Verbrennung immer wahrscheinlicher. Andererseits vergrößern sich die Aufwendungen für das Transportieren des Brennstoff-Luftgemisches und des Verbrennungsgases. Außerdem müssen größere Mengen Luft, die den an der Verbrennung nicht teilnehmenden Stickstoff aber auch letztlich den nicht teilnehmenden Sauerstoffüberschuss enthalten, aufgeheizt werden.

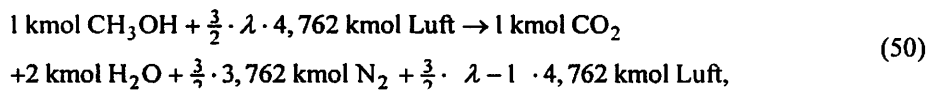
Aus dem Luftverhältnis  $\lambda$  nach Gleichung (48) und der wirklich zugeführten Luftmenge  $n_L$  nach Gleichung (47) ergibt sich die Überschussluftmenge

$$n_{L, \text{Üb}} = \lambda - 1 \cdot n_{L, \min} . \quad (49)$$

Die Überschussluftmenge  $n_{L,\text{Üb}}$  ist jene Luftstoffmenge, die an der Verbrennung nicht teilnimmt und nur zur Gewährleistung der vollständigen Verbrennung in der Verbrennungsluftmenge  $n_L$  enthalten ist. 

In der Mehrzahl der in der Praxis vorkommenden Fälle liegt das Luftverhältnis im Bereich  $1 \leq \lambda \leq 1,5$ . Anhang 1 dieses Studienbriefes enthält eine Übersicht zu Luftverhältnissen  $\lambda$  unterschiedlicher Verbrennungsvorgänge. 

Für das Beispiel der Methanolverbrennung folgt aus Gleichung (46) unter Beachtung des Luftverhältnisses



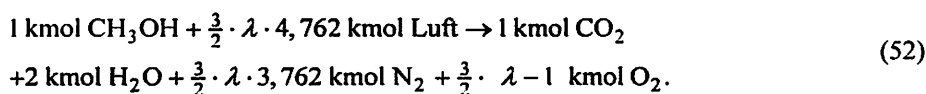
Der letzte Summand auf der rechten Seite

$$\frac{3}{2} \cdot \lambda - 1 \cdot 4,762 \text{ kmol Luft}$$

stellt den Anteil der Luft dar, die aufgrund des Luftüberschusses (Gleichung (49)) nicht an der Verbrennung teilnimmt und sich gemäß Beziehung (45) wie folgt zusammensetzt:

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} \cdot \lambda - 1 \cdot 4,762 \text{ kmol Luft} &\hat{=} \\ \frac{3}{2} \cdot \lambda - 1 \cdot 1 \text{ kmol Sauerstoff O}_2 + \frac{3}{2} \cdot \lambda - 1 \cdot 3,762 \text{ kmol Stickstoff N}_2. \end{aligned} \quad (51)$$

Nach Einsetzen der Gleichung (51) in Ausdruck (50) folgt




Mit Gleichung (52) sind die Problemstellungen in Bezug auf


- die benötigte Luftmenge und
- die Zusammensetzung des Verbrennungsgases

für die Verbrennung von  $n_B = 1$  kmol Methanol  $\text{CH}_3\text{OH}$  gelöst.

Nachfolgend soll aufbauend auf dieser Muster-Verbrennungsreaktion ein allgemeiner formelmäßiger Ansatz für das Berechnen dieser Größen entwickelt werden.

#### *Berechnung der umgesetzten Sauerstoff- bzw. Luftmengen*

Um die zu gewinnenden Gleichungen von der Größe des Systems unabhängig zu machen<sup>4</sup>, werden dimensionslose Kennzahlen (Verhältnisgrößen) eingeführt, in denen alle zu betrachtenden Stoffmengen auf die Stoffmenge  $n_B$  des Brennstoffs (bei geschlossenen Systemen) bzw. den Brennstoffmassenstrom  $\dot{n}_B$  (bei offenen Reaktionsräumen) bezogen werden. 

Der Bezug auf die Stoffmenge  $n_B$  des Brennstoffs (bzw. auf den Brennstoffmassenstrom  $\dot{n}_B$ ) bietet sich an, da über die Mengenangabe der gasförmigen Brennstoffe mit dem Normvolumen  $V_n$  diese Stoffmenge nach Gleichung (39) in der Praxis relativ leicht zur Verfügung steht. 

<sup>4</sup> Beispielsweise gelten unsere Betrachtungen zur Musterverbrennung nur für die Verbrennung von  $n_B = 1$  kmol Methanol und sind somit nicht allgemeingültig.

Nachfolgend werden die dimensionslosen Kennzahlen definiert.

□ Der molare Mindestsauerstoffbedarf ist als

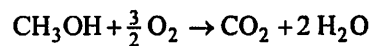
$$O_{\min} = \frac{n_{\text{O}_2, \min}}{n_{\text{B}}} = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2, \min}}{\dot{n}_{\text{B}}}; \quad O_{\min} = 1 \triangleq 1 \text{ kmol}_{\text{O}_2} \text{ kmol}_{\text{B}}^{-1} \quad (53)$$

mit der Mindestsauerstoffmenge  $n_{\text{O}_2, \min}$  definiert.

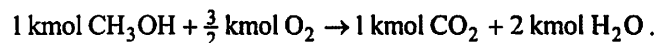
☞ In Reaktionsgleichungen, die so geschrieben werden, dass sie für die Verbrennung der Brennstoffmenge  $n_{\text{B}} = 1 \text{ kmol}$  gelten, entspricht der Wert des molaren Mindestsauerstoffbedarfs  $O_{\min}$  dem stöchiometrischen Koeffizienten des Sauerstoffs  $\nu_{\text{O}_2}$  in der Reaktionsgleichung, d. h.

$$O_{\min} = \nu_{\text{O}_2} \quad \text{bei} \quad n_{\text{B}} = 1 \text{ kmol}. \quad (54)$$

☞ Als Beispiel für den Ausdruck (54) wenden wir die Verbrennungsreaktion des Methanols (42)



auf die Verbrennung der Stoffmenge  $n_{\text{B}} = 1 \text{ kmol}$  dieses Brennstoffs an. Aus der Stoffmengenbilanz (43) dieser Reaktion



folgt mit Gleichung (53) für den molaren Mindestsauerstoffbedarf

$$O_{\min} = \frac{n_{\text{O}_2, \min}}{n_{\text{B}}} = \frac{\frac{3}{2} \text{ kmol}}{1 \text{ kmol}} = \frac{3}{2},$$

was Ausdruck (54)

$$O_{\min} = \frac{3}{2} = \nu_{\text{O}_2}$$

bestätigt.

□ Der molare Mindestluftbedarf (auch molares minimales Luft-Brennstoffverhältnis genannt) wird nach der Definitionsgleichung

$$L_{\min} = \frac{n_{\text{L}, \min}}{n_{\text{B}}} = \frac{\dot{n}_{\text{L}, \min}}{\dot{n}_{\text{B}}}; \quad L_{\min} = 1 \triangleq 1 \text{ kmol}_{\text{L}} \text{ kmol}_{\text{B}}^{-1} \quad (55)$$

mit der erforderlichen Mindestluftmenge  $n_{\text{L}, \min}$  berechnet, die sich aus der Beziehung (45) folgend zu

$$n_{\text{L}, \min} = 4,762 \cdot n_{\text{O}_2, \min} \quad (56)$$

ergibt.

□ Der molare Luftbedarf (auch molares Luft-Brennstoffverhältnis genannt) bestimmt sich zu

$$L = \frac{n_{\text{L}}}{n_{\text{B}}} = \frac{\dot{n}_{\text{L}}}{\dot{n}_{\text{B}}}; \quad L = 1 \triangleq 1 \text{ kmol}_{\text{L}} \text{ kmol}_{\text{B}}^{-1} \quad (57)$$

mit der wirklich zugeführten Luftmenge  $n_{\text{L}}$ .