

Leitung: Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker

Fakultät für Maschinenbau

Verbrennungstechnik I

Thema:

Verbrennungsrechnung

Bearbeitet von:

Sven Jollet, M.Eng.

Tag der Bearbeitung:

17. April 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	1
1.1	Brennstoffe, Brennluft und Grundreaktion	1
1.1.1	Brennstoffe	1
1.1.2	Brennluft	2
1.1.3	Grundreaktionen	3
1.2	Sauerstoffbedarf, Luftbedarf, Abgaszusammensetzung	4
1.2.1	Verbrennungsreaktionen	4
1.2.2	Feste und flüssige Brennstoffe	8
1.2.3	Gasförmige Brennstoffe	11
1.3	Heizwert, Brennwert	16

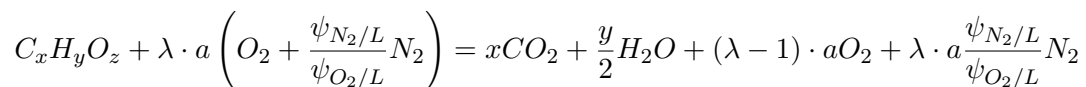
1 Grundlagen

Im Folgenden werden für das Verständnis der Verbrennungstechnik notwendige Grundlagen aus dem Buch Thermodynamik für Ingenieure (Klaus Langeheinecke) zusammengefasst und beschrieben.

1.1 Brennstoffe, Brennluft und Grundreaktion

Die Brennstoffe B bestehen in unterschiedlichen Zusammensetzungen vorwiegend aus den Elementen Kohlenstoff C und Wasserstoff H . Daneben gibt es auch andere Elemente wie Sauerstoff O , Schwefel S und Stickstoff N , die jedoch meist nur im geringen Maße enthalten sind. Außerdem gibt es bei festen Brennstoffen feinst eingelagerte Mineralstoffe, wie z.B. an den Brennstoff chemisch gebundene Metalle und Ballaststoffe. Diese Stoffe bleiben nach der Verbrennung als Asche oder Schlacke zurück.

Neben der vereinfachten allgemeinen Form der globalen Reaktionsgleichung (Einführung in die Verbrennungstechnik) für Kohlenwasserstoff-Verbrennung gibt es eine auch eine Form die den Sauerstoff im Brennstoff berücksichtigt.



mit

$$a = \left[x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right]$$

a entspricht dabei dem Mindestsauerstoffbedarf von $C_x H_y O_z$ -Kohlenwasserstoffen aus Tabelle 1.9

1.1.1 Brennstoffe

Bei den Brennstoffen sind zwei Gruppen zu unterscheiden, bei denen bei den folgenden Berechnungen unterschiedlich vorzugehen sein wird. Bei der ersten Brennstoffgruppe sind nur die Ergebnisse der Elementaranalyse bekannt, nicht aber die darin enthaltenen, oft zahlreichen chemischen Verbindungen. Dazu gehören vor allem feste und flüssige Brennstoffe. Deren Zusammensetzung wird durch die Massenanteile ξ_i der Komponenten beschrieben, für deren Zahlenwerte als Formelzeichen entsprechende kleine Buchstaben verwendet werden.

Im Folgenden werden die brennstoffbezogenen Massen- oder Molanteile mit dem Index B versehen ($\xi_{i/B}$, bzw. $\psi_{i/B}$). Üblich sind auch kleine Buchstaben für die brennstoffmassenbezogenen Anteile (z.B. c, h, s, \dots).

Element	$\xi_{i/B}$	i	$\frac{m_{i/B}}{m_B}$	$\frac{kg_i}{kg_B}$
Kohlenstoff	$\xi_{C/B}$	$= c$	$= \frac{m_{C/B}}{m_B}$	$\frac{kgC}{kgB}$
Wasserstoff	$\xi_{H_2/B}$	$= h$	$= \frac{m_{H_2/B}}{m_B}$	$\frac{kgH_2}{kgB}$
Schwefel	$\xi_{S/B}$	$= s$	$= \frac{m_{S/B}}{m_B}$	$\frac{kgS}{kgB}$
Sauerstoff	$\xi_{O_2/B}$	$= o$	$= \frac{m_{O_2/B}}{m_B}$	$\frac{kgO_2}{kgB}$
Stickstoff	$\xi_{N_2/B}$	$= n$	$= \frac{m_{N_2/B}}{m_B}$	$\frac{kgN_2}{kgB}$
Wasser	$\xi_{W/B}$	$= w$	$= \frac{m_{W/B}}{m_B}$	$\frac{kgH_2O}{kgB}$
Asche	$\xi_{A/B}$	$= a$	$= \frac{m_{A/B}}{m_B}$	$\frac{kgA}{kgB}$

Tabelle 1.1: Massenanteile von Brennstoffen

In der zweiten Brennstoffgruppe sind die chemischen Verbindungen wie Wasserstoff H_2 , Kohlenmonoxid CO oder Erdgas mit dem Hauptbestandteil Methan CH_4 bekannt. Hierzu gehören im wesentlichen die gasförmigen Brennstoffe. Deren Zusammensetzung wird mit den Molanteilen ψ_i oder X_i beschrieben.

Element	$\psi_{i/B}$	$\frac{n_{i/B}}{n_B}$	$\frac{kmol_i}{kmol_B}$
Wasserstoff	$\psi_{H_2/B}$	$= \frac{n_{H_2/B}}{n_B}$	$\frac{kmolH_2}{kmolB}$
Kohlenmonoxid	$\psi_{CO/B}$	$= \frac{n_{CO/B}}{n_B}$	$\frac{kmolCO}{kmolB}$
Schwefel	$\psi_{S/B}$	$= \frac{n_{S/B}}{n_B}$	$\frac{kmolS}{kmolB}$
Methan	$\psi_{CH_4/B}$	$= \frac{n_{CH_4/B}}{n_B}$	$\frac{kmolCH_4}{kmolB}$
Kohlenwasserstoffe	$\psi_{C_zH_yO_z/B}$	$= \frac{n_{C_zH_yO_z/B}}{n_B}$	$\frac{kmolC_zH_yO_z/B}{kmolB}$
Stickstoff	$\psi_{N_2/B}$	$= \frac{n_{N_2/B}}{n_B}$	$\frac{kmolN_2}{kmolB}$
Wasser	$\psi_{W/B}$	$= \frac{n_{W/B}}{n_B}$	$\frac{kmolH_2O}{kmolB}$

Tabelle 1.2: Molanteile von Brennstoffen

1.1.2 Brennluft

Die Brennluft besteht in erster Linie aus Sauerstoff O_2 und Stickstoff N_2 . Dem Stickstoff werden unter der Bezeichnung Luftstickstoff auch die für die Verbrennung unerheblichen Bestandteile von Argon Ar , Kohlendioxid CO_2 , Wasserstoff H_2 , Neon Ne , Helium He , Krypton Kr und Xenon Xe zugerechnet. Der Wasserdampfgehalt der Luft kann häufig vernachlässigt werden. Die so definierten trockene Brennluft hat die in der Tabelle 1.3 aufgeführten Mol- und Massenanteile. Diese Werte können jedoch für die Verbrennungsrechnung auf zwei Nachkommastellen abgerundet werden.

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Sauerstoff O_2			
Molanteile	$\psi_{O_2/L}$	0.2095	$\frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}L}$
Massenanteile	$\xi_{O_2/L}$	0.2314	$\frac{\text{kg}O_2}{\text{kg}L}$
Stickstoff N_2			
Molanteile	$\psi_{N_2/L}$	0.7905	$\frac{\text{kmol}N_2}{\text{kmol}L}$
Massenanteile	$\xi_{N_2/L}$	0.7686	$\frac{\text{kg}N_2}{\text{kg}L}$
Luft			
Gaskonstante	R_L	287.1	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Molmasse	M_L	28.96	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Spez. isobare Wärmekapazität	c_p	1.005	$\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ (25°C)
Isentropenexponent	κ	1.400	—
Normvolumen	V_{mn}	22.414	$\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$ (0°C, 1.01325bar)

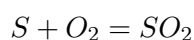
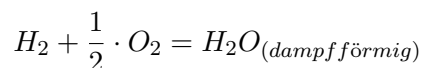
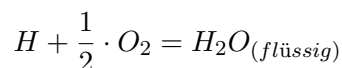
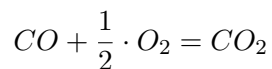
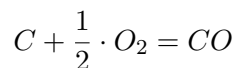
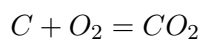
Tabelle 1.3: Stoffwerte von trockener Luft

Element	Molare Masse M_i	Wert	Einheit
Kohlenstoff	M_C	= 12	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Wasserstoff	M_{H_2}	= 2	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Schwefel	M_S	= 32	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Sauerstoff	M_{O_2}	= 32	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Stickstoff	M_{N_2}	= 28	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Wasser	M_W	= 18	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$
Kohlendioxid	M_{CO_2}	= 44	$\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

Tabelle 1.4: Molare Massen

1.1.3 Grundreaktionen

In den folgenden Grundgleichungen für die chemischen Verbrennungsreaktionen stehen die Symbole für die einzelnen Stoffe und ihre Verbindungen.



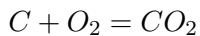
1.2 Sauerstoffbedarf, Luftbedarf, Abgaszusammensetzung

Die vorherigen chemischen Grundgleichungen sind zunächst Beziehungen zwischen Teilchenzahlen und daher zwischen Stoffmengen.

1.2.1 Verbrennungsreaktionen

Verbrennungsgleichungen des Kohlenstoffes

Die Grundgleichung für die stöchiometrische Verbrennung des festen Brennstoffes Kohlenstoff C gibt die Reaktion miteinander reagierender Teilchen wieder.



Da die Stoffmengen proportional der Teilchen sind, kann man schreiben:

$$1\text{kmol}C + 1\text{kmol}O_2 = 1\text{kmol}CO_2 \quad (1.1)$$

Durch Umrechnung der Stoffmengen mit den Molmassen ergeben sich folgende Massenbilanzen ($m = n \cdot M$):

$$12\text{kg}C + 32\text{kg}O_2 = 44\text{kg}CO_2 \quad (1.2)$$

Diese Gleichung 1.2 wird auf den Kohlenstoff normiert.

$$1\text{kg}C + \frac{8}{3}\text{kg}O_2 = \frac{11}{3}\text{kg}CO_2 \quad (1.3)$$

$$1\text{kg}C + 2.664\text{kg}O_2 = 3.664\text{kg}CO_2 \quad (1.4)$$

Für den Kohlenstoffanteil c eines Brennstoffes folgt daraus:

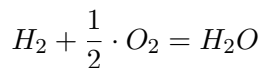
$$c \frac{\text{kg}C}{\text{kg}B} + \frac{1}{12} c \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kg}B} = \frac{1}{12} c \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kg}B} \quad (1.5)$$

$$c \frac{\text{kg}C}{\text{kg}B} + \frac{1}{12} c \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kg}B} 32 \frac{\text{kg}O_2}{\text{kmol}O_2} = \frac{1}{12} c \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kg}B} 44 \frac{\text{kg}CO_2}{\text{kmol}CO_2} \quad (1.6)$$

$$c \frac{\text{kg}C}{\text{kg}B} + \frac{8}{3} c \frac{\text{kg}O_2}{\text{kg}B} = \frac{11}{3} c \frac{\text{kg}CO_2}{\text{kg}B} \quad (1.7)$$

Verbrennungsgleichungen des Wasserstoffes

Analog zur Reaktionsberechnung des Kohlenstoffes erfolgt die Grundgleichung für die stöchiometrische Verbrennung des festen Brennstoffes Wasserstoff H_2 .



Da die Stoffmengen proportional der Teilchen sind, kann man schreiben:

$$1 \text{ kmol } H_2 + \frac{1}{2} \cdot 1 \text{ kmol } O_2 = 1 \text{ kmol } H_2O \quad (1.8)$$

Durch Umrechnung der Stoffmengen mit den Molmassen ergeben sich folgende Massenbilanzen:

$$2 \text{ kg } H_2 + \frac{1}{2} \cdot 32 \text{ kg } O_2 = 18 \text{ kg } H_2O \quad (1.9)$$

$$1 \text{ kg } H_2 + 8 \text{ kg } O_2 = 9 \text{ kg } H_2O \quad (1.10)$$

Für den Wasserstoffanteil h eines Brennstoffes folgt daraus:

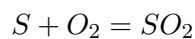
$$h \frac{\text{kgC}}{\text{kgB}} + \frac{1}{4} h \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kgB}} = \frac{1}{2} h \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kgB}} \quad (1.11)$$

$$h \frac{\text{kgC}}{\text{kgB}} + \frac{1}{4} h \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kgB}} \cdot 32 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kmol } O_2} = \frac{1}{2} h \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kgB}} \cdot 18 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kmol } H_2O} \quad (1.12)$$

$$h \frac{\text{kgC}}{\text{kgB}} + 8h \frac{\text{kg } O_2}{\text{kgB}} = 9h \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kgB}} \quad (1.13)$$

Verbrennungsgleichungen des Schwefels

Die Reaktionsberechnung des Schwefels gibt die Grundgleichung für die stöchiometrische Verbrennung des festen Brennstoffes Schwefels S mit der Reaktion miteinander reagierender Teilchen wieder.



Da die Stoffmengen proportional der Teilchen sind, kann man schreiben:

$$1 \text{ kmol } S + 1 \text{ kmol } O_2 = 1 \text{ kmol } SO_2 \quad (1.14)$$

Durch Umrechnung der Stoffmengen mit den Molmassen ergeben sich folgende Massenbilanzen:

$$32 \text{ kg } S + 32 \text{ kg } O_2 = 64 \text{ kg } SO_2 \quad (1.15)$$

$$1kgS + 1kgO_2 = 2kgSO_2 \quad (1.16)$$

Für den Schwefelanteil s eines Brennstoffes folgt daraus:

$$s \frac{kgS}{kgB} + \frac{1}{32} s \frac{kmolO_2}{kgB} = \frac{1}{32} s \frac{kmolSO_2}{kgB} \quad (1.17)$$

$$s \frac{kgS}{kgB} + \frac{1}{32} s \frac{kmolO_2}{kgB} \cdot 32 \frac{kgO_2}{kmolO_2} = \frac{1}{32} s \frac{kmolSO_2}{kgB} \cdot 64 \frac{kgSO_2}{kmolSO_2} \quad (1.18)$$

$$s \frac{kgS}{kgB} + s \frac{kgO_2}{kgB} = 2s \frac{kgSO_2}{kgB} \quad (1.19)$$

Verbrennungsgleichungen des Sauerstoffes

Der im Brennstoff enthaltene Sauerstoff O_2 dient der vollständigen Verbrennung und wird deshalb auch vollständig in andere Produkte umgesetzt. Daher taucht dieser bei einer stöchiometrischen Verbrennung nicht im Abgas auf.

O_2

Da die Stoffmengen proportional der Teilchen sind, kann man schreiben:

$1kmolO_2$

Durch Umrechnung der Stoffmengen mit den Molmassen ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$1kmolO_2 \cdot 32 \frac{kgO_2}{kmolO_2} = 32kgO_2 \quad (1.20)$$

Eine Umrechnung auf $1kgO_2$ ergibt folgenden Zusammenhang:

$$1kgO_2 = 1kmolO_2 \cdot \frac{32}{32} \frac{kgO_2}{kmolO_2} \quad (1.21)$$

Für den Sauerstoffanteil o eines Brennstoffes folgt daraus:

$o \frac{kgO_2}{kgB}$

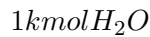
$$o \frac{kgO_2}{kgB} = \frac{1}{32} o \frac{kmolO_2}{kgB} \quad (1.22)$$

Verbrennungsgleichungen des Wasser

Brennstoffe haben in der Regel einen gewissen Wasseranteil w der sich bei der Verbrennung als Wasserdampf im Abgas wieder findet.



Da die Stoffmengen proportional der Teilchen sind, kann man schreiben:



Durch Umrechnung der Stoffmengen mit den Molmassen ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ kmol } H_2O \cdot 18 \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kmol } H_2O} = 18 \text{ kg } O_2 \quad (1.23)$$

Eine Umrechnung auf $1 \text{ kg } H_2O$ ergibt folgenden Zusammenhang:

$$1 \text{ kg } H_2O = 1 \text{ kmol } H_2O \cdot \frac{18 \text{ kg } H_2O}{18 \text{ kmol } H_2O} \quad (1.24)$$

Für den Wasseranteil w der Brennluft folgt daraus:

$$w \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg } B}$$

$$w \frac{\text{kg } H_2O}{\text{kg } B} = \frac{1}{18} w \frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kg } B} \quad (1.25)$$

Verbrennungsgleichungen des Stickstoffes

Neben dem Wasseranteil w bestehen Brennstoffe auch zu einem Teil aus Stickstoff N_2 der sich ebenfalls als Anteil des Abgas darstellt.



Da die Stoffmengen proportional der Teilchen sind, kann man schreiben:



Durch Umrechnung der Stoffmengen mit den Molmassen ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$1 \text{ kmol } N_2 \cdot 28 \frac{\text{kg } N_2}{\text{kmol } N_2} = 28 \text{ kg } N_2 \quad (1.26)$$

Eine Umrechnung auf $1 \text{ kg } N_2$ ergibt folgenden Zusammenhang:

$$1 \text{ kg N}_2 = 1 \text{ kmol N}_2 \cdot \frac{28 \text{ kg N}_2}{28 \text{ kmol N}_2} \quad (1.27)$$

Für den Stickstoffanteil n der Brennluft folgt daraus:

$$n \frac{\text{kg N}_2}{\text{kg B}}$$

$$n \frac{\text{kg N}_2}{\text{kg B}} = \frac{1}{28} n \frac{\text{kmol N}_2}{\text{kg B}} \quad (1.28)$$

1.2.2 Feste und flüssige Brennstoffe

Mindestsauerstoffbedarf

Der gesamte auf die Masse des Brennstoffes bezogene Mindestsauerstoffbedarf für eine vollständige Verbrennung wird als o_{min} bezeichnet. Dieser Mindestsauerstoffbedarf ergibt sich aus den vorangegangenen Sauerstoffbedarf für die einzelnen Reaktionsgleichungen.

$$o_{min} = \left(\frac{m_{O_2}}{m_B} \right)_{min} = \sum \left(\frac{m_{O_2/i}}{m_B} \right)_{min} \quad (1.29)$$

Die Summierung ergibt folgende Gleichung. Hierbei ist auch der im Brennstoff bereits enthaltene Sauerstoff berücksichtigt. Der Sauerstoffanteil o des Brennstoffes wird vom Mindestsauerstoffbedarf abgezogen.

$$o_{min} = \left(\frac{8}{3} \cdot c + 8 \cdot h + s - o \right) \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg B}} \quad (1.30)$$

Für den molaren, auf die Brennstoffmasse m_B bezogene Mindestsauerstoffbedarf ergibt sich folgende Gleichung:

$$(o_m)_{min} = \left(\frac{n_{O_2}}{m_B} \right)_{min} = \sum \left(\frac{n_{O_2/i}}{m_B} \right)_{min} \quad (1.31)$$

Die aus den Reaktionsgleichungen abgeleiteten Größen sind in der Tabelle 1.5 und 1.6 nochmals zusammengefasst.

Brennstoff $\xi_{i/B} = \frac{m_{i/B}}{m_B}$	Mindestsauerstoffbedarf $\left(\frac{m_{O_2/i}}{m_B}\right)_{min}$	Anfall von Reaktionsgas und Inertgas $\frac{m_{i/R}}{m_B}$
$\xi_{C/B} = Y_{C/B} = \frac{m_{C/B}}{m_B} = c \frac{kgC}{kgB}$	$\frac{8}{3} c \frac{kgO_2}{kgB}$	$\frac{11}{3} c \frac{kgCO_2}{kgB}$
$\xi_{H_2/B} = Y_{H_2/B} = \frac{m_{H_2/B}}{m_B} = h \frac{kgH_2}{kgB}$	$8h \frac{kgO_2}{kgB}$	$9h \frac{kgH_2O}{kgB}$
$\xi_{S/B} = Y_{S/B} = \frac{m_{S/B}}{m_B} = s \frac{kgS}{kgB}$	$s \frac{kgO_2}{kgB}$	$2s \frac{kgSO_2}{kgB}$
$\xi_{O_2/B} = Y_{O_2/B} = \frac{m_{O_2/B}}{m_B} = o \frac{kgO_2}{kgB}$	$-o \frac{kgO_2}{kgB}$	
$\xi_{w/B} = Y_{H_2O/B} = \frac{m_{H_2O/B}}{m_B} =$ $w \frac{kgH_2O}{kgB}$		$w \frac{kgH_2O}{kgB}$
$\xi_{N_2/B} = Y_{N_2/B} = \frac{m_{N_2/B}}{m_B} = n \frac{kgN_2}{kgB}$		$n \frac{kgN_2}{kgB}$

Tabelle 1.5: Sauerstoffbedarf, Reaktionsgas- und Inertgasanfall bezogen auf die Brennstoffmasse m_B

Brennstoff $\xi_{i/B} = \frac{m_{i/B}}{m_B}$	Mindestsauerstoffbedarf $\left(\frac{n_{O_2/i}}{m_B}\right)_{min}$	Anfall von Reaktionsgas und Inertgas $\frac{n_{i/R}}{m_B}$
$\xi_{C/B} = Y_{C/B} = \frac{m_{C/B}}{m_B} = c \frac{kgC}{kgB}$	$\frac{1}{12} c \frac{gmolO_2}{kgB}$	$\frac{1}{12} c \frac{kmolCO_2}{kgB}$
$\xi_{H_2/B} = Y_{H_2/B} = \frac{m_{H_2/B}}{m_B} = h \frac{kgH_2}{kgB}$	$\frac{1}{4} h \frac{kmolO_2}{kgB}$	$\frac{1}{2} h \frac{kmolH_2O}{kgB}$
$\xi_{S/B} = Y_{S/B} = \frac{m_{S/B}}{m_B} = s \frac{kgS}{kgB}$	$\frac{1}{32} s \frac{kmolO_2}{kgB}$	$\frac{1}{32} s \frac{kmolSO_2}{kgB}$
$\xi_{O_2/B} = Y_{O_2/B} = \frac{m_{O_2/B}}{m_B} = o \frac{kgO_2}{kgB}$	$-\frac{1}{32} o \frac{kmolO_2}{kgB}$	
$\xi_{w/B} = Y_{H_2O/B} = \frac{m_{H_2O/B}}{m_B} =$ $w \frac{kgH_2O}{kgB}$		$\frac{1}{18} w \frac{kmolH_2O}{kgB}$
$\xi_{N_2/B} = Y_{N_2/B} = \frac{m_{N_2/B}}{m_B} = n \frac{kgN_2}{kgB}$		$\frac{1}{28} n \frac{kmolN_2}{kgB}$

Tabelle 1.6: Molarer Sauerstoffbedarf, Reaktionsgas- und Inertgasanfall bezogen auf die Brennstoffmasse m_B

Luftbedarf

Der für die Verbrennung theoretisch erforderliche Mindestluftbedarf l_{min} wird mit dem Sauerstoffgehalt $\xi_{O_2/L}$ berechnet:

$$l_{min} = \left(\frac{m_L}{m_B}\right)_{min} = \frac{o_{min}}{\xi_{O_2/L}} \quad (1.32)$$

Die auf die Brennstoffmasse m_B bezogene Stoffmenge der Luft ist dann

$$(l_m)_{min} = \left(\frac{n_L}{m_B}\right)_{min} = \frac{(o_m)_{min}}{\psi_{O_2/L}} \quad (1.33)$$

Für die vollständige Verbrennung ist eine größere Luftmenge als die theoretisch errechnete Luftmenge notwendig, es muss mit Luftüberschuss verbrannt werden.

$$\lambda = \frac{l}{l_{min}} = \frac{l_m}{(l_m)_{min}} \quad (1.34)$$

Verbrennungsgas

Die Menge des entstehenden Verbrennungsgases wird auch als Abgas oder Rauchgas bezeichnet. Bei der Verbrennung von Kohlenstoff C entsteht als Reaktionsgas CO_2 .

$$\frac{m_{CO_2/R}}{m_B} = \frac{11}{3} \cdot c \frac{kgCO_2}{kgB} \quad (1.35)$$

Die entsprechende Stoffmenge des Kohlendioxids CO_2 ist folgendermaßen beschrieben.

$$\frac{m_{CO_2/R}}{m_B} = \frac{1}{12} \cdot c \frac{kmolCO_2}{kgB} \quad (1.36)$$

Analog zum Kohlenstoff ergeben sich auch die anderen Abgasanteile. Diese sind in der Tabelle 1.7 nochmals aufgelistet und nach der Herkunft aus Brennstoff und Brennluft getrennt.

Der gesamte Verbrennungsgasanfall ergibt sich als Summe aller Komponenten:

$$\frac{m_V}{m_B} = \sum \frac{m_{i/V}}{m_B} = \sum \frac{m_{i/R}}{m_B} + \sum \frac{m_{i/L}}{m_B} \quad (1.37)$$

$$\frac{n_V}{m_B} = \sum \frac{n_{i/V}}{m_B} = \sum \frac{n_{i/R}}{m_B} + \sum \frac{n_{i/L}}{m_B} \quad (1.38)$$

Im Normzustand nehmen sowohl die Brennluft als auch das Verbrennungsgas als Ideale Gase das gleiche Molvolumen $V_{mn} = 22.4 \frac{m^3}{kmol}$ ein. Das zuzuführende Brennluftvolumen V_L und das anfallende Verbrennungsgasvolumen V_V lassen sich daher unmittelbar aus den Gleichungen 1.33 und 1.38 bestimmen.

$$\frac{V_{Ln}}{m_B} = \lambda \cdot (l_m)_{min} \cdot V_{mn} \quad (1.39)$$

$$\frac{V_{Vn}}{m_B} = \frac{n_V}{m_B} \cdot V_{mn} \quad (1.40)$$

Die Massenanteile $\xi_{i/V}$ und die Molanteile $\psi_{i/V}$ der Verbrennungsgase lassen sich folgendermaßen bestimmen:

$$\xi_{i/V} = \frac{\frac{m_{i/V}}{m_B}}{\frac{m_V}{m_B}} = \frac{m_{i/V}}{m_V} \quad (1.41)$$

$$\psi_{i/V} = \frac{\frac{n_{i/V}}{m_B}}{\frac{n_V}{m_B}} = \frac{n_{i/V}}{n_V} \quad (1.42)$$

Anteile des Verbrennungsgases	Anteile aus dem Brennstoff	Anteile aus der Brennluft
$\frac{m_{i/V}}{m_B}$	$\frac{m_{i/R}}{m_B}$	$\frac{m_{i/L}}{m_B}$
$\frac{m_{CO_2/V}}{m_B} =$	$\frac{11}{3} c \frac{kgCO_2}{kgB}$	
$\frac{m_{H_2O/V}}{m_B} =$	$(9h + w) \frac{kgH_2O}{kgB}$	$+\xi_{H_2O/L} \cdot \lambda \cdot l_{min}$
$\frac{m_{SO_2/V}}{m_B} =$	$2s \frac{kgSO_2}{kgB}$	
$\frac{m_{O_2/V}}{m_B} =$		$\xi_{O_2/L} \cdot (\lambda - 1) \cdot l_{min}$
$\frac{m_{N_2/V}}{m_B} =$	$n \frac{kgN_2}{kgB}$	$+\xi_{N_2/L} \cdot \lambda \cdot l_{min}$

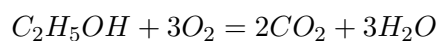
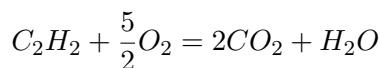
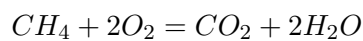
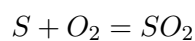
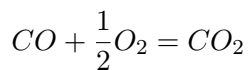
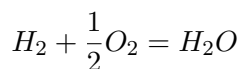
Tabelle 1.7: Massenzusammensetzung des Verbrennungsgases

Anteile des Verbrennungsgases	Anteile aus dem Brennstoff	Anteile aus der Brennluft
$\frac{n_{i/V}}{m_B}$	$\frac{n_{i/R}}{m_B}$	$\frac{n_{i/L}}{m_B}$
$\frac{n_{CO_2/V}}{m_B} =$	$\frac{1}{12} c \frac{kmolCO_2}{kgB}$	
$\frac{n_{H_2O/V}}{m_B} =$	$(\frac{1}{2}h + \frac{1}{18}w) \frac{kmolH_2O}{kgB}$	$+\psi_{H_2O/L} \cdot \lambda \cdot (l_m)_{min}$
$\frac{n_{SO_2/V}}{m_B} =$	$\frac{1}{32} s \frac{kmolSO_2}{kgB}$	
$\frac{n_{O_2/V}}{m_B} =$		$\psi_{O_2/L} \cdot (\lambda - 1) \cdot (l_m)_{min}$
$\frac{n_{N_2/V}}{m_B} =$	$\frac{1}{28} n \frac{kmolN_2}{kgB}$	$+\psi_{N_2/L} \cdot \lambda \cdot (l_m)_{min}$

Tabelle 1.8: Molmengen­zusammensetzung des Verbrennungsgases

1.2.3 Gasförmige Brennstoffe

Verbrennungsgleichungen



Um zu ermitteln, wie viel Sauerstoff gebraucht wird und wieviel Reaktionsgas entsteht, wird die Verbrennungsgleichung mit den Molanteilen des Brennstoffes multipliziert.

$$1kmolH_2 + \frac{1}{2}kmolO_2 = 1kmolH_2O \quad (1.43)$$

$$\{\psi_{H_2/B}\} \frac{kmolH_2}{kmolB} + \frac{1}{2} \{\psi_{H_2/B}\} \frac{kmolO_2}{kmolB} = \{\psi_{H_2/B}\} \frac{kmolH_2O}{kmolB} \quad (1.44)$$

$$1kmolCO + \frac{1}{2}kmolO_2 = 1kmolCO_2 \quad (1.45)$$

$$\{\psi_{CO/B}\} \frac{\text{kmol}CO}{\text{kmol}B} + \frac{1}{2} \{\psi_{CO/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B} = \{\psi_{CO/B}\} \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B} \quad (1.46)$$

$$1\text{kmol}CH_4 + 2\text{kmol}O_2 = 1\text{kmol}CO_2 + 2\text{kmol}H_2O \quad (1.47)$$

$$\{\psi_{CH_4/B}\} \frac{\text{kmol}CH_4}{\text{kmol}B} + 2\{\psi_{CH_4/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B} = \{\psi_{CH_4/B}\} \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B} + 2\{\psi_{CH_4/B}\} \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B} \quad (1.48)$$

$$1\text{kmol}C_xH_yO_z + \left[x + \frac{1}{4}y - \frac{1}{2}z \right] \text{kmol}O_2 = x\text{kmol}CO_2 + \frac{1}{2}y\text{kmol}H_2O \quad (1.49)$$

$$\begin{aligned} \{\psi_{C_xH_yO_z/B}\} \frac{\text{kmol}C_xH_yO_z}{\text{kmol}B} + \left[x + \frac{1}{4}y - \frac{1}{2}z \right] \{\psi_{C_xH_yO_z/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B} \\ = \{\psi_{C_xH_yO_z/B}\} \left[x \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B} + \frac{1}{2}y \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B} \right] \end{aligned} \quad (1.50)$$

$$1\text{kmol}S + 1\text{kmol}O_2 = 1\text{kmol}SO_2 \quad (1.51)$$

$$\{\psi_{S/B}\} \frac{\text{kmol}S}{\text{kmol}B} + \{\psi_{S/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B} = \{\psi_{S/B}\} \frac{\text{kmol}SO_2}{\text{kmol}B} \quad (1.52)$$

$$1\text{kmol}N_2 = 1\text{kmol}N_2 \quad (1.53)$$

$$\{\psi_{N_2/B}\} \frac{\text{kmol}N_2}{\text{kmol}B} = \{\psi_{N_2/B}\} \frac{\text{kmol}N_2}{\text{kmol}B} \quad (1.54)$$

$$1\text{kmol}H_2O = 1\text{kmol}H_2O \quad (1.55)$$

$$\{\psi_{W/B}\} \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B} = \{\psi_{W/B}\} \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B} \quad (1.56)$$

$$1\text{kmol}CO_2 = 1\text{kmol}CO_2 \quad (1.57)$$

$$\{\psi_{CO_2/B}\} \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B} = \{\psi_{CO_2/B}\} \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B} \quad (1.58)$$

Der molare Mindestsauerstoffbedarf O_{min} ergibt sich insgesamt aus dem Sauerstoffbedarf für die Verbrennung des Kohlenstoffes C , des Wasserstoffes H und des Schwefels S , abzüglich des im Brennstoff vorhandenen Sauerstoffes O .

Allgemein setzt sich der molare Mindestsauerstoffbedarf aus dem der einzelnen Verbindungen zusammen.

$$O_{min} = \left(\frac{n_{O_2}}{n_B} \right)_{min} = \sum (O_i)_{min} = \sum \left(\frac{n_{O_2/i}}{n_B} \right)_{min} \quad (1.59)$$

Die Verbrennungsprodukte und die Inertgase summieren sich zur gesamten Reaktionsgasmenge.

$$\frac{n_R}{n_B} = \sum \left(\frac{n_{i/R}}{n_B} \right) \quad (1.60)$$

In der Tabelle 1.9 sind der Mindestsauerstoffbedarf sowie der Anfall von Reaktions- und Inertgasen zusammengestellt, die sich bei stöchiometrischer Verbrennung mit Sauerstoff aus den einzelnen Komponenten dieser Gruppe ergeben.

Brennstoff	Mindestsauerstoffbedarf	Anfall von Reaktions- und Inertgas
$\psi_{i/B}$	$\left(\frac{n_{O_2/i}}{n_B} \right)_{min}$	$\frac{n_{i/R}}{n_B}$
$\psi_{CO/B}$	$\frac{1}{2} \{\psi_{CO/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B}$	$\{\psi_{CO/B}\} \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B}$
$\psi_{H_2/B}$	$\frac{1}{2} \{\psi_{H_2/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B}$	$\{\psi_{H_2/B}\} \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B}$
$\psi_{CH_4/B}$	$2 \{\psi_{CH_4/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B}$	$\{\psi_{CH_4/B}\} \left[1 \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B} + 2 \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B} \right]$
$\psi_{C_xH_yO_z/B}$	$\left[x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right] \{\psi_{C_xH_yO_z/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B}$	$\{\psi_{C_xH_yO_z/B}\} \left[x \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B} + \frac{y}{2} \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B} \right]$
$\psi_{S/B}$	$\{\psi_{S/B}\} \frac{\text{kmol}O_2}{\text{kmol}B}$	$\{\psi_{S/B}\} \frac{\text{kmol}SO_2}{\text{kmol}B}$
$\psi_{N_2/B}$		$\{\psi_{N_2/B}\} \frac{\text{kmol}N_2}{\text{kmol}B}$
$\psi_{W/B}$		$\{\psi_{W/B}\} \frac{\text{kmol}H_2O}{\text{kmol}B}$
$\psi_{CO_2/B}$		$\{\psi_{CO_2/B}\} \frac{\text{kmol}CO_2}{\text{kmol}B}$

Tabelle 1.9: Sauerstoffbedarf, Reaktionsgas- und Inertgasanfall

Der molare Mindestluftbedarf L_{min} und der molare Luftbedarf L werden analog wie bei der ersten Brennstoffgruppe bestimmt.

$$L_{min} = \frac{O_{min}}{\psi_{O_2/L}} \quad (1.61)$$

$$L = \lambda \cdot L_{min} \quad (1.62)$$

Die auf die Stoffmenge n_B des Brennstoffes bezogene Menge n_V des Verbrennungsgases setzt sich aus den Anteilen des Brennstoffes und der Brennluft zusammen.

$$\frac{n_V}{n_B} = \sum \left(\frac{n_{i/V}}{n_B} \right) = \sum \left(\frac{n_{i/R}}{n_B} \right) + \sum \left(\frac{n_{i/L}}{n_B} \right) \quad (1.63)$$

Anteile des Verbren- nungsgases	Anteile aus dem Brennstoff
$\frac{n_{i/V}}{n_B}$	$\frac{n_{i/R}}{n_B}$
$\frac{n_{CO_2/V}}{n_B}$	$\left[\{\psi_{CO/B}\} + \{\psi_{CH_4/B}\} + \{\psi_{CO_2/B}\} + x \cdot \{\psi_{C_xH_yO_z/B}\} \right] \frac{kmolCO_2}{kmolB}$
$\frac{n_{H_2O/V}}{n_B}$	$\left[\{\psi_{H_2/B}\} + 2 \cdot \{\psi_{CH_4/B}\} + \frac{1}{2}y \cdot \{\psi_{C_xH_yO_z/B}\} + \{\psi_{W/B}\} \right] \frac{kmolH_2O}{kmolB}$
$\frac{n_{SO_2/V}}{n_B}$	$\{\psi_{S/B}\} \frac{kmolSO_2}{kmolB}$
$\frac{n_{O_2/V}}{n_B}$	
$\frac{n_{N_2/V}}{n_B}$	$\{\psi_{N_2/B}\} \frac{kmolN_2}{kmolB}$

Tabelle 1.10: Zusammensetzung des Verbrennungsgas aus dem Brennstoff

Anteile des Ver- brennungsgases	Anteile aus der Brennluft
$\frac{n_{i/V}}{n_B}$	$\frac{n_{i/L}}{n_B}$
$\frac{n_{CO_2/V}}{n_B}$	
$\frac{n_{H_2O/V}}{n_B}$	$\psi_{H_2O/L} \cdot \lambda \cdot L_{min}$
$\frac{n_{SO_2/V}}{n_B}$	
$\frac{n_{O_2/V}}{n_B}$	$\psi_{O_2/L} \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{min}$
$\frac{n_{N_2/V}}{n_B}$	$\psi_{N_2/L} \cdot \lambda \cdot L_{min}$

Tabelle 1.11: Zusammensetzung des Verbrennungsgas aus der Brennluft

Daraus ergibt sich für die Molanteile des Verbrennungsgases folgender Zusammenhang.

$$\psi_{i/V} = \frac{\frac{n_{i/V}}{n_B}}{\frac{n_V}{n_B}} = \frac{n_{i/V}}{n_V} \quad (1.64)$$

Das Normvolumen des Verbrennungsgases folgt daraus:

$$\frac{V_{Vn}}{n_B} = \frac{n_V}{n_B} \cdot V_{mn} \quad (1.65)$$

Die Komponentenmassen und die Massenanteile bestimmen sich folgendermaßen.

$$\frac{n_{i/V}}{n_B} \cdot M_i = \frac{m_{i/V}}{n_B} \quad (1.66)$$

$$\frac{m_V}{n_B} = \sum \frac{m_{i/V}}{n_B} \quad (1.67)$$

$$\xi_{i/V} = \frac{\frac{m_{i/V}}{n_B}}{\frac{m_V}{n_B}} = \frac{m_{i/V}}{m_V} \quad (1.68)$$

1.3 Heizwert, Brennwert

Der Heizwert ist die bei einer Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, bei der es nicht zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kommt, bezogen auf die Menge des eingesetzten Brennstoffs.

$$H_u = \frac{|\Delta H|}{m_B} = \frac{|Q|}{m_B} \quad (1.69)$$

Vielfach wird der auf die Stoffmenge des Brennstoffes n_B bezogene molare Heizwert H_{um} oder der auf das Normvolumen des Brennstoffes $V_{Bn}(t_n, p_n)$ bezogene (volumetrische) Heizwert H_{uV} angegeben.

$$H_{um} = \frac{|Q|}{n_B} = M_B \cdot H_u \quad (1.70)$$

$$H_{uV} = \frac{|Q|}{V_{Bn}} = \frac{H_{um}}{V_{mn}} \quad (1.71)$$

Wenn der im Reaktionsgas enthaltene Wasserdampf kondensiert, erhöht sich die abgegebene Energie um die Verdampfungsenthalpie. Der so freiwerdende Brennwert H_o ist mit der spezifischen Verdampfungsenthalpie $\Delta h_{d,25Celsius} = 2.445 \frac{MJ}{kg}$ des Wassers bei der Bezugstemperatur t_0 .

$$H_o = H_u + \frac{m_{H_2O/R}}{m_B} \cdot \Delta h_d \quad (1.72)$$

Durch das Einführen der Molmassen M_B des Brennstoffes und M_W des Wasserdampfes sowie des Normvolumens V_{mn} erhält man die molare Brennwert H_{om} und den volumetrischen Brennwert H_{ov} .

$$M_B \cdot H_o = M_B \cdot H_u + M_B \cdot \frac{m_{H_2O/R}}{m_B} \cdot M_W \Delta h_d \quad (1.73)$$

$$H_{om} = H_{um} + M_B \cdot \frac{n_{H_2O/R}}{n_B} \cdot M_W \Delta h_d \quad (1.74)$$

$$H_{ov} = \frac{H_{om}}{V_{mn}} \quad (1.75)$$

Die beschriebenen Heizwerte gelten streng genommen nur für isobare Verbrennung, sind aber wegen der geringen Druckabhängigkeit der Enthalpien auch für isochore Prozesse verwendbar. Streng genommen müssten Differenzen der Inneren Energie eingesetzt werden. Für feste und flüssige Brennstoffe lässt sich der Heizwert mit guter Näherung aus der Elementaranalyse berechnen.

$$H_u = \sum (H_{ui} \cdot \xi_{i/B}) = [33.9c + 121.4h + 10.5s - 15.2o - 2.44w] \frac{MJ}{kgB} \quad (1.76)$$

Für gasförmige Brennstoffe ergibt sich der Heizwert aus den chemischen Verbindungen.

$$\begin{aligned}
 H_{um} &= \sum (H_{umi} \cdot \psi_{i/B}) \\
 &= \left[283\psi_{CO/B} + 242\psi_{H_2/B} + 802\psi_{CH_4/B} + 1428\psi_{C_2H_6/B} + 2044\psi_{C_3H_8/B} + \dots \right] \frac{MJ}{kmolB} \quad (1.77)
 \end{aligned}$$

Tabellenverzeichnis

1.1	Massenanteile von Brennstoffen	2
1.2	Molanteile von Brennstoffen	2
1.3	Stoffwerte von trockener Luft	3
1.4	Molare Massen	3
1.5	Sauerstoffbedarf, Reaktionsgas- und Inertgasanfall bezogen auf die Brennstoffmasse m_B	9
1.6	Molarer Sauerstoffbedarf, Reaktionsgas- und Inertgasanfall bezogen auf die Brennstoff- masse m_B	9
1.7	Massenzusammensetzung des Verbrennungsgases	11
1.8	Molmengen- und Molmengen- und Molmengen- und Molmengen- und Molmengen- und Molmengen- zusammensetzung des Verbrennungsgases	11
1.9	Sauerstoffbedarf, Reaktionsgas- und Inertgasanfall	13
1.10	Zusammensetzung des Verbrennungsgases aus dem Brennstoff	14
1.11	Zusammensetzung des Verbrennungsgases aus der Brennluft	14