

Das Verbrennungsprodukt besteht also aus den Gewichtsanteilen

35,4% H₂O 45,0% CO₂ 19,6% O₂

Der Heizwertanteil an 1 kg Gemisch ist

$$E_{\text{neff}} = 1500 \text{ WE/kg Gemisch}$$

Davon gehen an latenten Verlusten u. dgl. ab:

Verdampfungswärme C₂H₆O 0,235 · 180 = 42 WE/kg Gemisch

Verdampfungswärme H₂O 0,078 · 560 = 44 WE/kg Gemisch

Verdampfungswärme O₂ 0,687 · 51 = 35 WE/kg Gemisch

ferner spez. Erwärmung des

O₂-Gas von -147° C auf 0° C 0,687 · 35 = 24 WE/kg Gemisch

Zusammen also 145 WE/kg Gemisch

Der nutzbare Heizwert beträgt also

$$E_{\text{neff}} = 1500 - 145 = 1355 \text{ WE/kg Gemisch}$$

Dem stehen in der Wärmebilanz gegenüber

	100%	x%	100%	x%	100%	x%
35,4% H ₂ O	1610	570	2125	752	2710	960
45,0% CO ₂	735	331	895	403	1060	477
19,6% O ₂	600	117	735	144	870	170
bisher WE		1018		1299		1607
bis	2500° C		3000° C		3500° C	

Die Temperatur liegt also in erster Annäherung zwischen 3000 und 3500° C. Die dazwischen liegenden 500° binden 308 WE, also ist 0,617 WE/° C oder 1,62° C/WE. Die genaue Temperatur ist also

$$t_{ih} = 3000 + 56 \cdot 1,62 = 3091^\circ \text{ C}$$

$$T_{ih} = 3364^\circ \text{ abs.}$$

Mit der auf diese Weise ermittelten hypothetischen Ofentemperatur T_{ih} , der übrigens, wie später gezeigt wird, auch in dieser Form nur eine sehr bedingte Gültigkeit zukommt, beginnt nun die zweite Energieumsetzung, die Expansion. Da nach Annahme bereits die gesamte chemische Energie in Wärme umgesetzt sein soll und die Wärmeabgabe durch Kühlung praktisch vernachlässigbar ist, liegt eine Expansion ohne Zu- oder Abführung von Wärme vor. Die Berechnung des Strömungsvorganges darf also nach dem adiabatischen Gesetz

$$p v^\kappa = \text{const} \quad (11)$$

erfolgen. Der Exponent $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ bedeutet hierin das Verhältnis

der spezifischen Wärmen. Für alle zweiatomigen Gase, also z. B. O₂, CO, N₂ usw. ist unter normalen Umständen $\kappa_{\text{atom.}} = 1,4$, für mehratomige Gase ist es kleiner, z. B. für H₂O ist $\kappa_{\text{H}_2\text{O}} = 1,31$, für CO₂ ist $\kappa_{\text{CO}_2} = 1,30$.

Bei allen Gasen sinkt der Wert von κ jedoch erheblich mit steigender Temperatur. Die Funktion $\kappa = f(t)$ für die hier interessierten Gase ist in Tafel 3 dargestellt. Da die Temperaturen im Verlauf des Ausströmungsvorganges nun sinken, nimmt also der tatsächliche Wert von κ im Sinne der Expansion zu. Man kann jedoch, ohne einen wesentlichen Fehler zu begehen, für den gesamten Strömungsvorgang ein mittleres κ einsetzen, das sich als Durchschnittswert zwischen Anfangs- und Endzustand ergibt.

BEISPIEL:

Die hypothetische Ofentemperatur ergab sich im vorigen Beispiel zu $T_{ih} = 3364^\circ \text{ abs.}$ Bei einem Innendruck von 10 ata entspricht das einer Endtemperatur im Mündungsquerschnitt von

$$T_a = T_{ih} \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 3364 \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{0,2}{1,2}} = 2290^\circ \text{ abs.}$$

(Hierbei wurde κ zunächst mit 1,2 geschätzt, ohne daß dadurch ein wesentlicher Fehler entsteht.)

Die mittlere Temperatur während der Expansion beträgt also 2827° abs. = 2554° C.

Der prozentuale Gewichtsanteil der einzelnen Verbrennungsgase ergab sich aus der chemischen Reaktionsgleichung zu

54% H₂O 6,9% CO₂ 39,1% CO

Aus Tafel 3 werden für diese Gase bei 2554° C die Einzelwerte entnommen:

H ₂ O	CO ₂	CO
1,128	1,159	1,311

entsprechend den Prozentgehalten ergibt sich demnach für das Gemisch

$$\kappa = 0,54 \cdot 1,128 + 0,07 \cdot 1,159 + 0,39 \cdot 1,311 = 1,201.$$

Dieser Wert wäre für das im Beispiel angeführte Treibstoffgemisch in die Expansionsrechnung einzuführen. Aus dem folgenden geht aber hervor, daß nicht allzu große Fehler in der Wahl von κ kaum zu Abweichungen führen. Es ist daher hinreichend genau, auch bei anderen Gemischen mit einem mittleren $\kappa = 1,2$ zu rechnen.

Das Arbeitsgefälle der Adiabate ist nun

$$L = \kappa L_{\text{abs.}}$$

wenn $L_{\text{abs.}}$ die absolute Expansionsarbeit darstellt. Es ist also

$$L = \frac{\kappa}{\kappa - 1} (p_i v_i - p_a v_a)$$

Wegen $p_i v_i^\kappa = p_a v_a^\kappa$ auch

$$L = \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_i v_i \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

Setzt man das Arbeitsgefälle gleich der kinetischen Gasenergie

$$L = \frac{m c_a^2}{2} = \frac{G c_a^2}{2g}$$

so bekommt man, wenn v_i anstelle des Gesamtvolumens das spezifische Volumen darstellt,

$$c_a = \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa - 1} p_i v_i \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (12a)$$

Dieser Wert stellt die theoretisch erreichbare Ausströmungsgeschwindigkeit dar, wenn das Gas von dem Innendruck p_i bis auf den Außendruck p_a herab nutzbar entspannt werden kann. Wegen verschiedener Verluste kann dieser Wert freilich niemals völlig erreicht werden. Alle in Betracht kommenden Verluste sind aber (sofern von der später behandelten Dissoziation abgesehen wird) auf Unvollkommenheiten des praktischen Vorganges zurückzuführen (Reibung, unvollkommene Verbrennung u. dgl.). Die im vorigen Abschnitt Gl. (7) eingeführte Ofenverlustziffer ist also tatsächlich ein guter Anhaltspunkt für den Gütegrad der technischen Durchbildung von Ofen, Zerstäubung und Ausströmdüse.

Da Gl. (12a) unter der Annahme der Gültigkeit der Zustandsgleichung $p v = R T$ vollkommener Gase entstanden ist, läßt sich $p_i v_i$ durch $R T_i$ ersetzen. Man erhält dann

$$c_a = \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \sqrt{R T_i}} \quad (12b)$$

Die Ausströmgeschwindigkeit wächst also mit der Gaskonstante und der Anfangstemperatur. Und zwar ist eine Steigerung von R oder T_i nur dann nutzbringend, wenn damit auch eine Steigerung des Produktes $\sqrt{R T_i}$ verbunden ist.

Diese Erkenntnis ist von großer Wichtigkeit für die Frage der zu verwendenden Treibstoffgemische. Bei dem stöchiometrischen Verhältnis von Brennstoff zu Sauerstoff, bei welchem gerade der gesamte Sauerstoff zur Oxydation verbraucht wird und weder O₂ noch unverbranntes CO übrig bleibt, wird nämlich die hypothetische Maximaltemperatur T_{ih} der großen zur Verfügung stehenden Verbrennungswärme wegen weitaus am höchsten. Man darf deshalb aber nicht folgern, daß auch der Wert $\sqrt{R T_i}$ sein Optimum bei diesem Mischungsverhältnis erreicht. Denn die Gaskonstante

$$R = \frac{848}{\mu} \quad (13)$$

wird des hohen Molekulargewichtes μ des in großen Mengen entstehenden CO₂ ($\mu_{\text{CO}_2} = 44$) wegen sehr gering. Nimmt man nun dagegen z. B. Brennstoff im Überschuß, so behält man im