

$$0,0326 \cdot 1550 + 0,0123 \cdot 3200 = 89,9 \text{ WE}$$

entzogen. Es bleiben demnach für die äußere Wärme

$$1216 - 90 = 1126 \text{ WE}$$

die der Bildung von T_i zugute kommen.

Durch Interpolation in der bereits des öfteren dargelegten Weise ergibt sich damit als hypothetische Maximaltemperatur unter Beachtung der Dissoziation

$$T_i = 2619^\circ \text{ abs.}$$

Bei der Bestimmung des Dissoziationsgrades wurde also T_i mit 2600° abs. hinreichend genau geschätzt.

Es wird nunmehr

$$\sqrt{RT_i} = \sqrt{40,4 \cdot 2619} = 325 .$$

Infolge des Gasgleichgewichtes $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ stieg $\sqrt{RT_i}$ von seinem Primärwert 328 auf 332, durch die Dissoziation sinkt er wieder auf 325 herab. Die Dissoziation bewirkt also in diesem Falle einen Verlust an Ausströmgeschwindigkeit von 2,3% gegenüber ihrem sekundären Wert, der absolute Verlust gegenüber dem Primärwert beträgt aber nur 0,92%.

Es ist also in allen praktischen Berechnungsfällen statthaft, Gasgleichgewichte und Dissoziationen völlig zu vernachlässigen, da ihre Einflüsse auf die Ausströmgeschwindigkeit, welche absolut schon gering sind, sich auch noch gegenseitig fast genau aufheben. Nur bei der Berechnung der endgültigen Gaszusammensetzung dürfen diese beiden Faktoren nicht vernachlässigt werden.

In der hier entwickelten Berechnungsmethode für Dissoziationsvorgänge sind einige Vereinfachungen gemacht worden. Zunächst sind $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ und α_{CO_2} tatsächlich nicht konstant, sondern nehmen im Sinne der Expansion etwas ab. Ihr Verlauf läßt sich m. H. der Gl. (41) und (42) an Hand der Strömungsverhältnisse des betr. Ofens sofort ermitteln und ist für einen praktischen Fall in Tafel 16 dargestellt.

Nimmt man an, daß die Dissoziationswärme bei rückgehendem Dissoziationsgrad der Ausströmgeschwindigkeit sofort wieder zugute kommt, so geht man hinreichend genau, wenn man für die Dissoziationsmenge bei der Ermittlung von T_i anstelle der Werte im Ofen diejenigen in der Düsenmündung einsetzt. Der Verlust an T_i und somit an Ausströmgeschwindigkeit als Folge der Dissoziation wird dann noch kleiner als 0,92%.

Ferner würde vernachlässigt, daß durch die Veränderung des Faktors $\sqrt{RT_i}$ bei gleichbleibender Gesamtausströmung und gleichem Düsenquerschnitt auch der Ofendruck beeinflußt wird. Die hierfür gültige Beziehung stellt Gl. (25d) dar. Ist primär errechnet bei $\sqrt{RT_i} = 328$ der Ofendruck $p_i = 10,2 \text{ ata}$ und sinkt infolge der Dissoziation unter Berücksichtigung auch des Gasgleichgewichtes $\sqrt{RT_i}$ auf 325, so wird

$$p_i = 10,2 \frac{325}{328} = 10,1 \text{ ata} .$$

Diese Veränderung ist vernachlässigbar klein.

Im Zusammenhang mit den Vernachlässigungen dieses Abschnittes sei schließlich noch einiges zu der Frage der Reaktionsgeschwindigkeit gesagt, die für alle im Raketofen auftretenden Reaktionen naturgemäß von größter Bedeutung ist. Die Geschwindigkeit einer Gleichgewichtsreaktion stellt stets die Resultierende aus den Geschwindigkeiten der beiden Reaktionsrichtungen dar. Ist der Unterschied in der Gaszusammensetzung also noch groß, so überwiegt eine Richtungskomponente stark, die Reaktion verläuft also rasch. Bei zunehmender Annäherung an das endgültige Gleichgewicht nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit ab und erreicht im Gleichgewicht selbst den Wert Null.

Die Absolutgröße der Geschwindigkeit gewöhnlicher chemischer Reaktionen hängt ab von der Temperatur, dem Druck, der Gleichgewichtsspanne und von katalytischen Einflüssen, läßt sich mithin in allgemeiner Form nicht bestimmen.

Ob also das errechnete endgültige Gleichgewicht der Reaktion $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ in der kurzen zur Verfügung

stehenden Zeit überhaupt erreicht werden kann, ist eine Frage, die theoretisch kaum zu beantworten ist.

Es besteht jedoch Aussicht, hier auf dem Versuchswege der Gasanalyse weiter zu kommen. Vorschläge zu diesem Problem sollen an anderer Stelle dieser Arbeit gebracht werden.

Bei den Dissoziationsvorgängen liegen die Verhältnisse anders. Hier kann man nicht eigentlich von einer Sekundärreaktion sprechen, die nach erfolgter Verbrennung sich vollzieht.

Die Dissoziation ist vielmehr ein Nichtvereinigenkönnen eines gewissen Prozentsatzes der hochreaktionsfähigen Verbrennungspartner, deren Verbindung bei absinkender Temperatur dann aber ohne nennenswerte Verzögerung erfolgen kann.

Es ist also anzunehmen, daß der Dissoziationsgrad α mit ziemlicher Genauigkeit an jeder Stelle der Düse demjenigen Wert entspricht, der sich aus dem dortigen Gaszustand errechnet. Sowohl durch die endliche Zeitdauer der Gleichgewichtsreaktion $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ als auch durch den Rückgang der Dissoziationsgrade $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ und α_{CO_2} wird innerhalb des Expansionsgebietes wieder Wärme frei. Welchen Einfluß diese Tatsache im Verein mit anderen Umständen auf den Strömungsvorgang hat, soll im nächsten Abschnitt untersucht werden.

Der Vollständigkeit halber sei endlich noch darauf hingewiesen, daß im Bereich hohen Brennstoffüberschusses neben den Dissoziationen des Wasserdampfes und der Kohlensäure auch noch eine Dissoziation des unverbrannten Alkohols stattfinden dürfte. Von dieser weiß man nur allgemein, daß sie einen Zerfall in niedere Homologe darstellt; es würden sich demnach gasförmige Bestandteile an Methan, Äthan, Methylalkohol und dgl. bilden. Diese unterliegen aber alle einem weiteren Abbau durch Oxydation.

Die Dissoziation des unverbrannten Alkohols läßt sich unmittelbar schon aus dem Grunde nicht rechnerisch erfassen, als die unverbrannt bleibenden Mengen selbst nicht bestimmbar sind. Es ist aber aus obigem ersichtlich, daß ihre Kenntnis auch nicht von praktischem Interesse wäre, da die Gaszusammensetzung doch wieder von dem Gleichgewicht $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$ sowie den Dissoziationen des Wasserdampfes und der Kohlensäure abhängt.

5. Der wahre Verlauf der Verbrennungsströmung

Es wurde schon darauf hingewiesen, daß durch die Endlichkeit der Reaktionsdauer eine Überlagerung des Verbrennungsvorganges mit der Expansion auftritt. Dadurch verliert die Strömung natürlich ihren rein adiabatischen Charakter, denn es findet nunmehr eine Energiezufuhr während der Expansion statt.

Man kann nun einen von dem adiabatischen abweichenden Strömungsvorgang am einfachsten dadurch rechnerisch erfassen, daß man anstelle des Exponenten κ eine allgemeine Zahl n einführt. Das Gesetz einer solchen allgemeinen oder „polytropischen“ Zustandsänderung heißt dann

$$p v^n = \text{const} \quad (43)$$

Für den Spezialfall der adiabatischen Strömung ist natürlich $n = \kappa$. Wird dagegen durch Nachverbrennung während der Strömung gerade soviel Wärme frei, daß trotz fortschreitender Expansion die Temperatur des Gases konstant bleibt, so geht die Strömung in eine isotherme über. Hierfür gilt

$$p v = \text{const}$$

Bei isothermer Strömung wird also $n = 1$.

Man kann nun sinngemäß weiter folgern: Wird mehr Wärme durch Nachverbrennung frei, als zur Konstanterhaltung der Temperatur erforderlich ist, so wird $n < 1$. In diesem Falle nimmt trotz fortschreitender Expansion die Temperatur im Gasstrahl zu. Liegt andererseits $1 < n < \kappa$, so liegt auch die Zustandsänderung zwischen Adiabate und Isotherme.