

Vorteil ausgewertet werden kann, dennoch länger gebaut werden als für den Brennbeginn erforderlich, so würde Strahlablösung eintreten, die der Kavitationswirkung wegen eine korrosive Zerstörung der Düse bewirken könnte. Außerdem würde nach den Untersuchungen von Stodola ein Druckstoß entstehen (vgl. hierzu Schüle, Technische Thermodynamik, Bd. I, 4. Aufl., S. 333), der den Schub zu Beginn des Brennens außerordentlich herabdrückte.

Es besteht aber vielleicht eine andere Möglichkeit, den Sog für die Rückstoßwirkung nutzbar zu machen:

Eine Flüssigkeitsrakete braucht insbesondere beim Start einen hohen Schub, um erst einmal vom Boden wegzukommen und die genügende Führung im Abschlußgerüst zu haben. Nach Erreichung einer gewissen Geschwindigkeit darf der Rückstoß dagegen ohne Schaden etwas abfallen, wenn dadurch die Brenndauer wächst. Um dieses zu bewirken, braucht man nur den Tankdruck etwas absinken zu lassen. Dadurch nimmt die eingespritzte Treibstoffmenge G_{sec} und somit gemäß Gl. (25c) auch der Ofendruck p_i ab. Ist die Düse nun für einen Ofendruck beim Start von z. B. $p_i = 15$ ata bei einem Außendruck $p_a = 1$ ata berechnet, so stimmen die Querschnittsverhältnisse der Lavaldüse auch noch ebenso gut, wenn der Ofendruck in den letzten Brennsekunden auf 7,5 ata und der Außendruck auf 0,5 ata gesunken ist. Man könnte in diesem Falle also die gleiche Ausströmgeschwindigkeit halten, obgleich der Ofendruck auf die Hälfte abgesunken ist.

Da das Abfallenlassen des Tankdruckes keine konstruktiven Schwierigkeiten bereitet, sondern vielmehr eine Erleichterung darstellt (evtl. Fortfall der komplizierten Druckerzeugungsapparatur), so erscheint eine derartige Führung der Abschlußverhältnisse zum mindesten sehr aussichtsreich.

In der gesamten bisher erörterten Ausströmungstheorie ist nichts über die Längenverhältnisse der Düse gesagt worden. Die Ursache liegt darin, daß es auch gar nicht möglich ist, auf Grund der Kontinuitätsbedingung und ihrer Folgerungen Rückschlüsse zu ziehen, wie lang der Weg der Gasentspannung sein muß. Theoretisch ist dieses nämlich völlig gleichgültig; von Einfluß sind nur die praktischen Gründe, daß zum einen keine Strahlablösung eintreten darf, weil das Gas dem großen Öffnungswinkel der Düse nicht zu folgen vermag, und daß zum anderen die Düse auch wieder nicht so lang werden darf, daß die Reibungseinflüsse störend wirken.

Die Frage nach dem günstigsten Öffnungswinkel der Lavaldüse ist somit zuverlässig nur durch den Versuch zu beantworten. Man kann sich hier aber auf die Ergebnisse der verschiedensten Versuche stützen (Turbinenbau, Pulverraketen usw.), so daß auf die Vornahme einer speziellen Versuchsreihe im Rahmen dieser Arbeit verzichtet wurde und allen Konstruktionen ein halber Düsenwinkel von 10° zugrunde gelegt worden ist.

Eine andere Frage ist es freilich, ob die übliche konische Düse überhaupt die günstigste Form darstellt, nach der eine gute Expansionsdüse zu profilieren ist. Der bekannte Wiener Wärmefachmann Ing. Guido Frhr. v. Pirquet hat z. B. eine Düse vorgeschlagen, deren Kriterium darin besteht, daß das Gas im gesamten Expansionsverlauf mit konstanter Beschleunigung strömt. Betrachtet man nämlich die Beschleunigungsverhältnisse der normalen Lavaldüse, so zeigt es sich, daß die Geschwindigkeit des Gases im ersten Teil der Düse außerordentlich wächst, während sie zuletzt nur noch sehr wenig zunimmt (vgl. hierzu Tafel 9). Es leuchtet nun ein, daß man vielleicht ein besseres Strömungsbild erhalten kann, wenn durch geeignete Profilierung der Düse eine Konstanz der Gasbeschleunigung erzielt wird.

Durch eine einfache thermodynamische Betrachtung lassen sich die Koordinaten des Profilvermeridians einer derartigen Düse sofort ermitteln. Da

$$c_a^2 = 2 b x_0$$

sein muß, ergibt sich für eine bestimmte (empirisch) erwünschte Düsenlänge x_0 die erforderliche Beschleunigung zu b . An jeder anderen Stelle x der Düse ist dann die Strömgeschwindigkeit entsprechend

$$c_x^2 = 2 b x$$

Nennt man nun $c_h = 91,3 \sqrt{E_n}$ wieder die hypothetische Ausströmgeschwindigkeit (vgl. S. 18), so ist hinreichend genau

$$c_x^2 = c_h^2 \left(1 - \frac{T_x}{T_i} \right)$$

und somit

$$x = \frac{91,3^2 E_n}{2 b} \left(1 - \frac{T_x}{T_i} \right). \quad (28a)$$

Andererseits muß wegen der Kontinuitätsbedingung

$$\frac{f_x}{f_a} = \frac{c_a}{c_x} \frac{v_x}{v_a}$$

für zwei Querschnitte gelten

$$\frac{f_x}{f_a} = \frac{y_x^2}{y_a^2} = \frac{v_x}{v_a} \sqrt{\frac{1 - T_a/T_i}{1 - T_x/T_i}}$$

Da sich f_a und somit y_a nach früherem sofort errechnen lassen, ist die zu x gehörige Ordinate des Profilvermeridians

$$y_x = y_a \sqrt{\frac{v_x}{v_a} \sqrt{\frac{1 - T_a/T_i}{1 - T_x/T_i}}}. \quad (28b)$$

Ob dieses Profil konstanter Beschleunigung wirklich den Erwartungen entspricht, kann natürlich erst eine Reihe von Versuchen entscheiden, die aus dem Rahmen dieser Arbeit herausführen würden, zumal diese Frage besonders für den Turbinenbau von weit größerer Bedeutung sein kann.

Alles in allem zeigen die Untersuchungen zu den Strömungsvorgängen in der Düse, daß das Düsenproblem in der Raketenliteratur weitaus überschätzt wird. Für die Aktionswirkung eines Gasstrahles, die z. B. in der Dampfturbine ausgenutzt wird, ist es freilich von allergrößter Bedeutung, ob die Düse es ermöglicht, daß das Gas die Schallgeschwindigkeit übersteigt. Für die Reaktionswirkung wird indes auch bei einfachen Mündungen das Überdruckgefälle gemäß Gl. (3) nutzbar. Die Düse ermöglicht nur mehr die restliche Ausbeute des Wärmegefälles zwischen Hals- und Mündungstemperatur, das bei einfachen Mündungen verlorengelht. Nur, wenn der Außendruck sehr erheblich unter 1 ata sinkt, nimmt der Düsen Gewinn rasch zu. Dieses erklärt sich dadurch, daß das Druck- und Temperaturgefälle für den Grenzfall $p_a = 0$ ata, $T_a = 0^\circ$ abs. unendlich würde.

4. Gasgleichgewichte und Dissoziationen

Zwei grundsätzliche Fragengruppen wurden bei den Ableitungen und Betrachtungen der letzten beiden Abschnitte übergegangen, die für den tatsächlichen Ablauf der Vorgänge von Wichtigkeit sind.

Die eine umfaßt das Problem des qualitativen Ablaufes der Verbrennung. Denn diese stellt in Wahrheit keinen zeitlosen Übergang des Brennstoffes in seine Oxydationsprodukte dar, sondern sie führt über gewisse Zwischenprodukte, die wegen der Endlichkeit der Reaktionszeit den Gesamtvorgang beeinflussen können.

Die andere Fragengruppe berührt die Besonderheiten der Verbrennungsströmung, bei welcher stets eine gewisse Überschneidung von Verbrennungs- und Expansionsverlauf stattfindet, welche sich ebenfalls auf den wahren Verlauf des Strömungsvorganges auswirkt.

Es ist also ersichtlich, daß ein bestimmter „Zustand im Ofen“ schlechthin nicht besteht, für den man Gaszusammensetzung und Temperatur eindeutig angeben könnte. Das Ofeninnere ist vielmehr, ebenso wie die anschließende Düse, erfüllt von reagierenden Stoffen, deren physikalischer und chemischer Zustand in kontinuierlicher Entwicklung begriffen ist. Wie die