

## 6. Das Zerstäubungsproblem

Da eine Verbrennung des Brennstoffs im Sauerstoff im flüssigen Zustande unmittelbar nicht möglich ist, muß der eigentlichen Verbrennung eine Vergasung der beiden Bestandteile vorausgehen. Die Verdampfungswärme des flüssigen Sauerstoffs beträgt nun noch nicht einmal ein Drittel derjenigen des Aethylalkohols; außerdem ist für die Verdampfung des Sauerstoffs aber noch eine höhere Temperaturspanne verfügbar. Die Zerstäubung des Brennstoffs ist somit also das weit- aus schwierigere Problem.

Man darf nun bei der Entwicklung einer zweckmäßigen Brennstoffzerstäubung nicht von der Ansicht ausgehen, daß das Zerstäubungsproblem schlechthin durch die diesbezüglichen Arbeiten aus dem Dieselmotorenbau gelöst sei. Die äußeren Umstände im Dieselmotor und im Raketofen sind nämlich völlig verschieden, insofern, als dort die Flüssigkeit in ein ruhendes Gas gespritzt wird, während sie hier in einen Gasstrom von relativ hoher Geschwindigkeit eintritt. Während sich also dort das Zerstäubungsproblem ausschließlich darauf beschränkt, wie man eine möglichst feine Verteilung des Brennstoffs zuwege bringt, besteht hier noch die besondere Schwierigkeit, den Tröpfchen im Ofen auch die genügende Zeit bis zu ihrer völligen Verdampfung zu geben.

Alle frei fliegenden Raketen mit unten sitzenden Ofen („Schubraketen“) bedingen aus konstruktiven Gründen eine Einspritzung des Sauerstoffs von oben. Um zu verhindern, daß der Sauerstoff zu rasch den Ofen durchwandert, baut man dann die Sauerstoffdüse so, daß ein breiter Schleier verdampfter Sauerstoff in den Ofen tritt. Spritzt man jetzt den Brennstoff gegen diesen Sauerstoffschleier ein, so bremst das entstehende Verbrennungsgas den Treibstoffstrahl ab und zwingt jedes Teilchen an einer bestimmten Stelle zum Stillstand und zur Umkehr. Dadurch bleibt jedes Tröpfchen natürlich viel länger im Ofen, als wenn man es in entgegengesetzter Richtung einführen würde.

Die Zeit des Verweilens eines Tröpfchens im Ofen ist nun natürlich von seiner eigenen Größe und der des Ofens abhängig. Unter gewissen vereinfachenden Festsetzungen lassen sich die Zusammenhänge zwischen Ofengröße, Tröpfchengröße und Verdampfungszeit rechnerisch erfassen:

Im Ofen selbst herrsche eine mittlere Strömgeschwindigkeit  $c_i$ . Diese zerreiße die aus den Düsenbohrungen in entgegengesetzter Richtung in den Ofen tretenden Flüssigkeitsstrahlen sofort zu einer Folge von Tröpfchen eines bestimmten mittleren Durchmessers. Es ist dann zu klären, welchen Weg und welche Zeit diese Tröpfchen bis zum Umkehrpunkt und bis zum Eintritt in die Expansionsdüse benötigen und ob sie in der Zeit ihres Verweilens im Ofen imstande sind, restlos zu vergasen. Unter Voraussetzung der Gültigkeit des quadratischen Widerstandsgesetzes gilt für die Verzögerung eines Tropfens

$$\frac{dw}{dt} = -c_w F \frac{\gamma}{2g} (w + c_i)^2 \frac{1}{m} = -c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} (w + c_i)^2.$$

Hier bedeuten:  $c_w$  den Widerstandsbeiwert des Tropfens,  $F$  seine größte Widerstandsfläche,  $G$  sein Gewicht und  $\gamma$  das spez. Gewicht des Gases im Ofen.

Durch Integration erhält man daraus

$$\int \frac{dw}{(w + c_i)^2} = \frac{-1}{w + c_i} + K_1 = -c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} t.$$

Die Integrationskonstante  $K_1$  ergibt sich aus den Anfangsbedingungen  $t = 0, w = w_e$  zu  $K_1 = \frac{1}{w_e + c_i}$ . Somit wird

$$c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} t = -\frac{1}{w_e + c_i} + \frac{1}{w + c_i}$$

und

$$\frac{ds}{dt} = w = \frac{1}{\frac{1}{w_e + c_i} + c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} t} - c_i. \quad (53)$$

Für den Umkehrpunkt ist  $ds/dt = 0$ , also

$$\frac{1}{w_e + c_i} + c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} t_u = \frac{1}{c_i}$$

und

$$t_u = \frac{2}{c_w \gamma} \frac{G}{F} \left( \frac{1}{c_i} - \frac{1}{w_e + c_i} \right). \quad (54)$$

Der bis zum Umkehrpunkt zurückgelegte Weg ergibt sich dann durch erneute Integration zu

$$s_u = \int \left( \frac{1}{\frac{1}{w_e + c_i} + c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} t} - c_i \right) dt \\ = \frac{2}{c_w \gamma} \frac{G}{F} \ln \left( \frac{1}{w_e + c_i} + c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} t \right) - c_i t + K_2.$$

Anfangs ist  $s = 0, t = 0$ . Für  $K_2$  ergibt sich somit

$$K_2 = -\frac{2}{c_w \gamma} \frac{G}{F} \ln \frac{1}{w_e + c_i}.$$

Es wird dann

$$s_u = \frac{2}{c_w \gamma} \frac{G}{F} \ln \left[ 1 + (w_e + c_i) c_w \frac{F}{G} \frac{\gamma}{2} t_u \right] - c_i t_u. \quad (55)$$

In diesen Gleichungen sind nun verschiedene Größen innerhalb gewisser Grenzen der Genauigkeit bestimmbar:

Die Einspritzgeschwindigkeit  $w_e$

Sie soll möglichst hoch sein, um auch kleinen Tropfen noch eine genügende Durchschlagskraft zu geben, kann aber ihren derzeitigen Erfahrungswert kaum übersteigen, solange nicht die Druckdifferenz zwischen Tank und Ofen vergrößert wird. Bei Aggregaten der bisherigen Bauart ist aber eine Erhöhung des Tankdrucks stets mit einer linearen Wandstärken- und Gewichtszunahme verbunden. Nur bei sehr großen Raketen, die mit pumpenähnlichen Druckerzeugern ausgestattet werden können, kann diese Druckdifferenz nötigenfalls ohne erhebliche Gewichtszunahme erhöht werden.

Der effektive Wert von  $w_e$  kann aus den Entleerungsschaubildern entnommen werden.

Aus dem Versuch Fl. P. 29 ergibt sich z. B. Druckdifferenz zwischen Tank und Ofen  $15 - 8 = 7$  at, 22 Düsen von je 1,2 mm  $\phi$ , sekundl. Brennstoffmenge  $G_B = 0,634$  kg/sec, spez. Gewicht  $\sigma_B = 0,00086$  kg/cm<sup>3</sup>, also

$$w_e = \frac{V_{\text{sec}}}{\Sigma f} = \frac{f_B}{\sigma_B \Sigma f} = 29,7 \text{ m/sec.}$$

Aus Fl. P. 12 ergibt sich: Druckdifferenz  $15 - 9,8 = 5,2$  at, 20 Düsen von je 1,2 mm  $\phi$ ,  $\sigma_B = 0,550$  kg/sec

$$w_e = 28,3 \text{ m/sec.}$$

In diesen Grenzen hält sich  $w_e$  bei allen Versuchen.

Die mittlere Strömgeschwindigkeit im Ofen  $c_i$

Sie kann nur näherungsweise ermittelt werden. Wegen der Kontinuität der Strömung muß für Ofen- und Halsquerschnitt gelten

$$\frac{f_i}{f_m} = \frac{c_m}{c'_i} \frac{v_i}{v_m}.$$

Mit der Zustandsgleichung  $p \cdot v = R \cdot T$  muß auch sein

$$\frac{f_i}{f_m} = \frac{c_m}{c'_i} \frac{p_m}{p_i} \frac{T_i}{T_m} = 0,62 \frac{c_m}{c'_i}.$$

Daraus errechnet sich

$$c'_i = 0,62 c_m \frac{f_m}{f_i}. \quad (56a)$$

Diese Geschwindigkeit hätte das Gas, wenn zwischen der betreffenden Stelle und dem Düsenhals die Strömung adiabatisch verlief. Bei sehr langen Ofen etwa würde dieser Wert  $c'_i$  kurz vor dem Einlauf in den Düsenhals erreicht werden.

In demjenigen Ofenbereich, in den der zerstäubende Brennstoff einspritzt, entsteht aber sinngemäß diese Geschwindigkeit erst. Als Mittelwert zwischen Null und  $c'_i$  dürfte in diesem Bereich also als Geschwindigkeit gelten

$$c_i = \frac{c'_i}{2} \cong 0,3 c_m \frac{f_m}{f_i}. \quad (56b)$$