

Strömung herrscht, tritt dann ein „Staufehler“ auf. Liegt die Bohrung um ein geringes der Strömung entgegen, so ist diese Staudruckkomponente positiv, der gemessene Druck wird also zu hoch. Im gegenteiligen Falle entsteht an der Abnahmestelle ein Sog, die Staudruckkomponente ist dann negativ, der gemessene Druck somit zu klein.

Rechnerisch ist der entstehende Fehler nicht genau anzugeben, da hier zu viele Nebenfaktoren mitsprechen. Für den Grenzfall, der völlig parallelen Lage der Meßbohrung zur Strömungsachse würde man den rein dynamischen Druck („Staudruck“) messen. Dieser beträgt, wenn p den statischen Druck c die Strömungsgeschwindigkeit an der betreffenden Stelle darstellen, nach dem Bernoullischen Gesetz

$$p_s = p + c^2 \frac{\gamma}{2g} \quad (63)$$

Gilt z. B. für den Mündungsquerschnitt

$$c_{a_{\text{eff}}} = 1600 \text{ m/sec} ; \quad p_{a_{\text{eff}}} = 1 \text{ ata} ; \quad \gamma_a = \frac{p_a}{R_a T_a} = 0,294 ,$$

so wird

$$p_s = 10000 + \frac{1600^2 \cdot 0,294}{2 \cdot 9,81} = 4,84 \text{ ata} .$$

Die Differenz gegenüber dem statischen Druck (1 ata) ist hier also bereits außerordentlich hoch.

Prinzipiell läßt diese Differenz sich übrigens zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit benutzen. Es ist nämlich nach Gl. (63) an jeder Stelle des Strömbereiches

$$c = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_s - p)} \quad (64a)$$

Insbesondere ist für die Düsenmündung

$$c_{a_{\text{eff}}} = \sqrt{2g \frac{R T_{a_{\text{eff}}}}{p_{a_{\text{eff}}}} (p_{a_s} - p_{a_{\text{eff}}})} \quad (64b)$$

Praktisch dürften sich vorerst derartige Messungen freilich nicht ausführen lassen, da kein Material bekannt ist, das derartig hohen Beanspruchungen, wie sie insbesondere in der Düsenmündung durch die Gasreibung auftreten, standhielte (vgl. hierzu den nächsten Abschnitt). Bei größeren Rückstoßöfen wird indessen die Durchführung dieser Messung vielleicht mit einer flüssigkeitsgekühlten Sonde möglich werden. Sie hätte bei großen Aggregaten den nicht zu unterschätzenden Vorteil, daß die Anflanschung derartiger Geräte an einem beweglichen Meßsystem überflüssig würde; der Rückstoß wäre dann auf diese Weise bestimmbar.

Neben dem Staufehler, der im Ofen selbst natürlich unter allen Umständen Null bleibt, ist ein „Einrundungsfehler“ zu berücksichtigen. Stößt die Abnahmebohrung völlig unabgerundet in die Ausströmdüse, so können minimale Unsymmetrien durch Bohrgrad erhebliche Staufehler verursachen. Bei den in der Fliegerei zur Geschwindigkeitsmessung verwendeten Prandtlischen Staurohren werden daher die Abnahmestellen für den statischen Druck mit 0,3 des Bohrungsdurchmessers eingerundet. Unsymmetrien in dieser Einrundung erzeugen auch noch gewisse Fehler; diese bleiben aber erfahrungsgemäß erheblich kleiner, als wenn überhaupt keine Einrundung vorhanden wäre.

Um auch die letzten Einrundungsfehler noch zu eliminieren, werden bei den Prandtl-Rohr mehrere statische Druckabnahmestellen parallel geschaltet, und in einer gemeinsamen Zuleitung vereinigt. Diese Methode läßt sich an der Raketendüse gleichfalls durchführen, wenn ein hoher Genauigkeitsgrad erreicht werden soll. In dieser Arbeit wurde aus Gründen der konstruktiven Einfachheit jedoch stets nur eine Abnahmestelle auf dem gleichen Querschnitt verwendet.

Endlich ist eine Fehlerquelle zu suchen in der ungenauen Lage der Meßstellen in der Düse. Bei der Mündungsdruckabnahme läßt sich dieser Fehler rechnerisch kompensieren, indem man mit Lehdorn den genauen Querschnitt der Düse an der Meßstelle ermittelt und diesen anstelle des Sollquerschnitts bei der Auswertung des Meßergebnisses einsetzt.

Im Düsenhals ist eine derartige Methode nicht anwendbar. Fällt hier die Meßstelle nicht genau in den engsten Querschnitt, so können unter Umständen erhebliche Meßfehler auftreten. Diese bleiben nun naturgemäß um so kleiner, je geringer die Krümmung im Düsenhals ist. Aus verbrennungstechnischen Gründen ist aber ein genügend langer konvergenter („Unterschall“-)Düsenteil ebenfalls erwünscht (vgl. z. B. Tafel 9 a, Piquet-Düsenprofil). Die hier entwickelten Öfen tragen nun unserer Forderung weitgehend Rechnung. Der mögliche Meßfehler bei der Halsdruckbestimmung bleibt also auch relativ klein.

Eine Fehlmessung von p_{meff} läßt sich übrigens rechnerisch nachweisen, sofern $p_{a_{\text{eff}}}$, $p_{i_{\text{eff}}}$ und G_{sec} nur richtig gemessen sind. Man ermittelt mit Gl. (44) T_{i_p} und mit Gl. (52) die Auströmsziffer b . Nun entnimmt man Tafel 19 den zugehörigen Wert n_m und ermittelt aus Tafel 17 das hierzu gehörige kritische Druckverhältnis $p_{\text{meff}}/p_{i_{\text{eff}}}$. Da $p_{i_{\text{eff}}}$ richtig gemessen sein soll, ist p_{meff} somit bestimmt.

Voraussetzung für diese Schlüsse ist die Genauigkeit der Bestimmung der Gaskonstante R . Verschiedene Versuche zeigten jedoch, daß hier im allgemeinen keine merklichen Divergenzen zwischen Theorie und Praxis entstehen.

Im Versuchsbetriebe wurde die Ofendruckmeßstelle mit einem Druckschreiber und einem parallelgeschalteten Ablesemanometer verbunden. Es erwies sich als zweckmäßig für die Dämpfung kleiner Druckstöße, insbesondere im Augenblick des Zündens, in die Zuleitung Querschnitte von nur 1 mm lichtigem Durchmesser einzuschalten. Da der Zustand im Ofen während der Brennzeit stationär ist, spielt die durch diese Dämpfung hineingebrachte zeitliche Verzögerung für die Meßergebnisse keine Rolle.

Die Halsdruckmeßstelle wurde nur mit einem gewöhnlichen Ablesemanometer verbunden.

Mündungsdruckmessungen erfolgte an einem Quecksilbermanometer.

Über die Ergebnisse der in dieser Arbeit vorgenommenen systematischen Untersuchungen zu dem Druckablauf in der Raketendüse wurde bereits in dem Abschnitt C 5 berichtet.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Durchführung zuverlässiger Druckmessungen in Ofen und Düse im derzeitigen Stand der Entwicklung keinerlei Schwierigkeiten mehr bereiten.

3. Temperaturmessungen

Zur Erhärtung der Daten, die sich aus den Druckmessungen ergaben, war es erwünscht, auch unmittelbare Meßwerte für die Gastemperaturen in Ofen und Düse zu erhalten. Die Lösung dieser Aufgabe erwies sich als außerordentlich schwierig und gelang erst nach verschiedenen Fehlschlägen und Mißgriffen.

Zunächst wurde der Gedanke einer Messung der Ofentemperatur mit einem Thermolement erwogen und erprobt.

Ein Platin-Platinrhodium + Element wurde in einem Sinterkorundröhrchen gasdicht in die Brennkammer eingeführt. Die Außendichtung am Kühlmantel erfolgte durch eine Stopfbüchse. Die beiden Drahtenden wurden mit einem im Beobachtungsraum stehenden Millivoltmeter verbunden.

Bei dem ersten Versuch erfolgte ein allmählicher dauernder Anstieg der Thermospannung, der darauf schließen ließ, daß die Durchwärmung des Schutzzöhrchens und der Lötstelle sehr langsam vor sich ging. Am Schluß des Brennens nach ca. 30 sec, zeigte das Instrument ca. 1300° C und war noch immer im Steigen begriffen.