

Der zweite Versuch wurde länger ausgedehnt. Nach ca. 50 sec erfolgte ein kleiner Stoß im Ofen; einen Augenblick später schoß eine kleine Stichflamme aus der Einführungsstelle des Thermoelements heraus, so daß der Brennvorgang sofort unterbrochen werden mußte. Es ergab sich, daß das Aufnahme-röhrchen geplatzt und das Thermoelement zerstört war. Der Versuch schien ziemlich klar zu beweisen, daß die Temperatur im Ofen für den Verwendungsbereich des Platin-Platinrhodium-elementes zu hoch war. Er zeigte außerdem, daß die Verwendung keramischer Körper in der Brennkammer doch auf erhebliche Schwierigkeiten stößt, da diese dem außerordentlich raschen Temperaturanstieg nach dem Zünden nicht gewachsen sind.

Es wurde nun die Verwendung eines Iridium-rhodium-iridium-Thermoelements erwogen, das gegenüber dem Platinelement eine Erhöhung der zulässigen Betriebstemperatur von 1600° C auf über 2000° C geben sollte.

Der Gedanke mußte jedoch wieder verworfen werden, als sich bei einer Besichtigung eines solchen Elements in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zeigte, daß diese Thermo-elemente außerordentlich empfindlich gegenüber dem kleinsten mechanischen Beanspruchungen sind. In dem hiesigen Verwendungsfalle würden sie schon allein durch mechanischen Erschütterungen bei dem Brennvorgang Schaden nehmen.

Aber auch aus grundsätzlichen Erwägungen ergibt sich, wie im folgenden gezeigt werden soll, daß Messungen mit dem Thermoelement in Brennkammer und Düse mit Fehlerquellen behaftet sind, die die Ergebnisse ziemlich wertlos machen.

In der Brennkammer ist nämlich die Temperatur der das Gas umgebenden Metalloberfläche (Ofenwand) im Verhältnis zu der Eigentemperatur der Lötstelle sehr niedrig. Die Lötstelle strahlt daher hohe Energiebeträge nach außen ab, die sie aus dem umgebenden Gas wieder herausnehmen muß. Eine Wärmeabgabe des Gases an die Lötstelle ist aber nur solange möglich, wie die Lötstelle kälter bleibt als das Gas, da sonst ja kein Temperaturgefälle vorhanden ist. Die Gleichgewichtstemperatur der Lötstelle bleibt somit stets niedriger als die wahre Gastemperatur.

Die Rechnung zeigt nun, daß diese Differenz zwischen wahrer und gemessener Temperatur sehr erheblich sein kann.

Die einem Quadratcentimeter der Lötstelle zugeführte Wärmemenge ist proportional

$$W_z = \alpha [T_i - T_L] \text{ Watt/cm}^2, \quad (65)$$

wenn  $T_i$  die Gastemperatur im Ofen,  $T_L$  die Temperatur der Lötstelle,  $\alpha$  eine Wärmeübergangszahl darstellen.

Andererseits ist die von der gleichen Fläche abgestrahlte Wärme nach dem Stefan Boltzmannschen Gesetz für eine absolut schwarz strahlende Lötstelle

$$W_{s_{schw.}} = 5,32 \cdot 10^{-12} [T_L^4 - T_w^4] \text{ Watt/cm}^2,$$

wenn  $T_w$  die Temperatur der inneren Ofenwand ist. In Wirklichkeit strahlt die Lötstelle nicht so stark, es wird etwa sein

$$W_s = 5 \cdot 10^{-12} [T_L^4 - T_w^4]. \quad (66a)$$

Für den Fall des Temperaturgleichgewichts ist nun

$$W_s = W_z,$$

also

$$5 \cdot 10^{-12} [T_L^4 - T_w^4] = \alpha [T_i - T_L]$$

und

$$5 \cdot 10^{-12} T_L^4 + \alpha T_L = \alpha T_i + 5 \cdot 10^{-12} T_w^4. \quad (67)$$

Für die Wärmeübergangszahl dürfte nun ungefähr gelten  $\alpha = 0,000035 \text{ WE/cm}^2 \text{ sec}^\circ$ . Da  $1 \text{ WE/sec} = 4200 \text{ Watt}$ , wird in dem hier verwendeten Maßsystem  $\alpha = 0,147 \text{ Watt/cm}^2 \text{ }^\circ$ . Nach Gl. (67) wird somit

$$5 \cdot 10^{-12} T_L^4 + 0,147 T_L = 0,147 T_i + 5 \cdot 10^{-12} T_w^4.$$

Setzt man  $T_i = 3000^\circ \text{ abs}$ ,  $T_w = 500^\circ \text{ abs}$ , so ergibt die graphische Auflösung dieser Gleichung 4. Grades eine reelle Wurzel bei  $T_L = 2200^\circ \text{ abs}$ .

Die Temperatur der Lötstelle ist also infolge ihrer Abstrahlung an die kalte Ofenwand um volle  $800^\circ$  niedriger als die des umgebenden Gases, d. h. der gemessene Wert liegt um ca. 27% niedriger als der wahre.

Da aber wegen der Unmöglichkeit einer genauen Bestimmung der Wärmeübergangszahl eine nachträgliche rechnerische Rektifizierung des Meßergebnisses nicht durchführbar ist, verliert die Thermoelementmessung im Ofen somit ihren praktischen Wert.

Bei der praktischen Durchführung thermoelektrischer Messung pflegt man nun die Lötstelle der Thermoelemente mit einem keramischen Schutzmantel zu umgeben. Wenn dadurch auch die effektive Abstrahlung kleiner wird, so darf man doch nicht vergessen, daß dafür auch die Wärmeableitung an die Ofenwand vergrößert wird.

Bei den meisten technischen Temperaturmessungen ist übrigens der Abstrahlungsfehler viel geringer als in der Raketenbrennkammer, da dort die den Flammraum umgebenden Wände meist aus glühendem Mauerwerk bestehen.

Die beiden in dieser Arbeit durchgeführten thermoelektrischen Messungen zeigten im übrigen, daß die keramische Kapselung der Lötstelle eine derart hohe thermische Trägheit des Meßsystems mit sich bringt, daß praktisch brauchbare Ergebnisse schon deshalb hiermit nicht zu erzielen wären.

Noch problematischer als im Ofeninnern erscheint die thermoelektrische Messung der Temperatur in der Ausströmdüse. Neben der oben geschilderten Abstrahlung der Lötstelle wirkt hier noch ein weiterer Faktor mit, nämlich die durch den kontinuierlichen Aufprall der strömenden Gasmoleküle erzeugte Reibungswärme.

Nach der Vorstellung der kinetischen Gastheorie wird die Wärmeabgabe eines warmen Gases an einen kälteren Körper ohnehin durch ständigen Aufprall bewegter Moleküle erklärt. Während aber bei ruhendem Gas dieser Aufprall allseitig gleichmäßig erfolgt, wird er im Strömungsfeld auf vorwiegend eine Richtung verschoben. Überschreitet dabei die Strömungsgeschwindigkeit gar, wie im vorliegenden Falle, die Größenordnung der mittleren Molekulargeschwindigkeit, so tritt auf der Rückseite der Lötstelle überhaupt kein Aufprall mehr ein, auf der Vorderseite wächst er dafür außerordentlich.

Der folgende Rechnungsgang soll nun die ungefähre Größenordnung der Meßfehler ergeben. Wegen der Vielfältigkeit der mitwirkenden Einflüsse kann er keinen Anspruch auf größere Genauigkeit erheben.

W sei der Reibungswiderstand der Lötstelle im Gasstrom,  $c$  sei die Strömungsgeschwindigkeit an dieser Stelle. Es ist dann

$$N = W c$$

die sekundlich von Gas geleistete und in Wärme überführte Arbeit. Unter Annahme der Gültigkeit des quadratischen Luftwiderstandsgesetzes ist dann

$$N = W c = 1,5 c_w F \frac{\gamma}{2g} c^2 c.$$

Da es sich um Überschallströmung handelt, mußte hier  $c_w = 1,5 c_{w0}$  gesetzt werden. Betrachtet man die Verhältnisse für  $F = \text{cm}^2$ , so wird der Leistungsübergang an die Lötstelle für den Mündungsquerschnitt bei  $c = 1300 \text{ m/sec}$ ,  $\gamma_a = 0,16 \text{ kg/m}^3$ ,  $p_a = 1 \text{ ata}$ ,  $T_a = 1000^\circ \text{ abs}$

$$N = 0,0165 \cdot 0,16 \cdot 169 \cdot 1300 = 578 \text{ mkg/sec cm}^2 = 5670 \text{ Watt/cm}^2.$$

Dieser Leistungsaufnahme der Lötstelle steht eine Abgabe durch Leitung und Strahlung gegenüber. Außerdem geht eine gewisse Energie als Wellenenergie in die sog. Machsche Welle, die sich bei jeder Überschallströmung ausbildet; diese Wellenenergie soll aber im folgenden vernachlässigt bleiben.

Für die Strahlungsabgabe gilt wieder Gl. (66a)

$$W_s = 5 \cdot 10^{-12} [T_L^4 - T_u^4] \text{ (Watt/cm}^2), \quad (66b)$$

wobei  $T_u$  jetzt die Absoluttemperatur der umgebenden Luft darstellt.

Für die Abgabe durch Leitung kann ungefähr gelten

$$W_L = 3,5 \cdot 10^{-4} [T_L - (T_a + \Delta T)] \text{ (Watt/cm}^2), \quad (68)$$

dabei ist  $T_a$  die effektive Temperatur des Gases im Mündungsquerschnitt und  $\Delta T$  ein Betrag, um den die Temperatur des Gases infolge seines höheren Energiepotentials gegenüber der ruhenden Lötstelle größer erscheint.

Um nämlich eine Masseneinheit = 9,81 kg um  $1^\circ$  zu erwärmen, werden