C DIE VORGÄNGE IM RAKETENOFEN

1. Die grundlegenden mechanischen Beziehungen

Ein Raketenofen läßt sich vergleichen mit einem Gewehr, das imstande wäre, fortlaufend in sehr rascher Folge Geschosse abzuschleudern und das sich unter Einwirkung der dabei entstehenden Rückschläge frei fortbewegen könnte. Da nun beim Raketenofen die Größe dieser Geschosse, nämlich die Gasmoleküle, praktisch unendlich klein, ihre Zahl entsprechend unendlich groß ist, so entsteht aus allen diesen Einzelrückschlägen eine konstant wirkende Kraft. Dieser resultierende Rückstoß oder Schub läßt sich durch Integration aller Teilrückschläge bestimmen:

$$\int P \cdot dt = \int c \cdot dm$$

Wird mit m_{sec} z. B. die sekundlich ausströmende Gasmasse, $G_{sec} = m_{sec} \cdot g$ also das sekundliche Gasgewicht und mit c die konstante Ausströmgeschwindigkeit bezeichnet, so muß sein

$$P = m_{sec} \cdot c = \frac{G_{sec}}{g} \cdot c \qquad (1)$$

Denkt man sich den Vorgang der kontinuierlichen Gasabschleuderung in einen Luft- und schwerefreien Raum verlegt, so würde das Treibaggregat unter der Einwirkung des Rückstoßes einen gewissen Geschwindigkeitszuwachs entgegengesetzt der Ausströmrichtung erhalten, der gemäß Gl. (1) abhängig ist von Masseverbrauch und Ausströmgeschwindigkeit. Wie das Gesetz von der Erhaltung des Schwerpunkts lehrt, müssen nun die Bewegungsgrößen $m \cdot v$ zweier durch eigene dem Körper innewohnende Energie getrennter Körperteile stets gleich sein. Denn bei der Trennung verteilen sich auch die Impulse als Erzeugende der Bewegungsgrößen gleichmäßig.

Wird also ein Massenteilchen dm mit der Geschwindigkeit c ausgestoßen, so muß sein

$$c \cdot dm = m\, dv$$

wenn m die Masse und dv den Geschwindigkeitszuwachs des Aggregats bedeuten. Es ist also

$$dv = c \cdot \frac{dm}{m}$$

integriert

$$v_1 - v_0 = c \cdot \ln \frac{m_0}{m_L} = c \cdot \ln \frac{G_0}{G_L} \qquad (2)$$

In luft- und schwerefreien Raum wächst der Geschwindigkeitszuwachs einer Rakete also einmal direkt mit der Ausströmgeschwindigkeit, zum andern mit dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses von Anfangs- zu Endgewicht. Der überragende Wert einer Steigerung der Ausströmgeschwindigkeit wird hieraus ersichtlich.

Es ist indessen noch ein zweiter Umstand zu beachten, welcher in einem Unterschied begründet ist, der doch zwischen den Verhältnissen des Raketenofens und dem obenangeführten Beispiel eines rasch feuernden Gewehrs besteht. Während nämlich hier die einzelnen Geschosse durch eine fremde Kraft, nämlich den Druck der Pulvergase herausgeschleudert werden, ist es bei dem den Raketenofen verlassenden Gas der eigene Gasdruck. Das ist nun unter Umständen ein ungeheurer Unterschied in der Wirkung, nämlich dann, wenn das Gas nicht mit einem dem Außendruck gleichen Druck ins Freie tritt.

In diesem Falle setzt sich der effektive Rückstoß aus zwei Kraftgrößen zusammen: der aus dem Impulssatz nach Gl. (1) errechneten Reaktion und dem Überdruck in der Mündung gegenüber dem Außendruck.

Läßt man aus einem unter Druck stehenden Behälter Gas durch eine einfache zylindrische Öffnung ins Freie treten, so stellt sich in der Mündung ein ganz bestimmter Druck ein. Wie später noch gezeigt wird, beginnt nun dieser Mündungsdruck von einem ganz bestimmten Behälter-Innendruck an über den Außendruck zu steigen und bleibt von diesem Bereich an ständig in einem ganz bestimmten (dem sog. „kritischen") Verhältnis zum Innendruck. Bei einem Innendruck $p_i = 10$ ata beträgt bei gewöhnlichen Gasen der Mündungsdruck z. B. $p_m = 5{,}3$ ata. Die Strömgeschwindigkeit auf einer solchen zylindrischen Mündung ist nun, wie ebenfalls noch bewiesen wird, gleich der Schallgeschwindigkeit c_m des dortigen Zustandes. Der Gesamtschub betrüge in diesem Falle also

$$P_1 = \frac{G_{sec}}{g} \cdot c_m + p_m \cdot f_m \qquad (3)$$

wenn f_m der Querschnitt der Mündung ist und p_m in atü angegeben wird.

Man kann nun die Strömgeschwindigkeit wesentlich über die Schallgeschwindigkeit hinaus steigern, wenn man mit Hilfe einer sich erweiternden Düse auch noch das Druckgefälle zwischen Mündungsdruck und Außendruck in Gasbewegungsenergie überführt. Die Ausströmgeschwindigkeit wird dann c_a, der Mündungsdruck p_m gleich dem Außendruck $p_a = 0$ atü, der Schub somit

$$P_2 = \frac{G_{sec}}{g} \cdot c_a \qquad (4)$$

Aus dieser Betrachtung ist zu ersehen, daß die Ausströmgeschwindigkeit im Verein mit dem Treibstoffverbrauch keineswegs ein eindeutiges Maß für den erzielbaren Rückstoß darstellt, sondern daß als wesentliche Voraussetzung zur Gültigkeit der Gl. (1) und (4) gehört, daß das Gas mit einem dem Außendruck gleichen Druck ins Freie tritt.

Der Gewinn an Schub, der sich im Raketenofen durch Anbringung einer divergenten Expansionsdüse erzielen läßt, ist also nicht dem Gewinn $c_a - c_m$ proportional, sondern nur dem Wert

$$P_2 - P_1 = \frac{G_{sec}}{g} (c_a - c_m) - f_m \cdot p_m \qquad (5)$$

Dieser Gewinn liegt erfahrungsgemäß in der Größenordnung um 10%, einem Wert, der übrigens mit der Theorie bestens übereinstimmt.

Bei sehr niedrigen Brenndrücken, unter $p_i = 1{,}9$ ata sinkt der Mündungsdruck p_m auf den Außendruck herab. In Gl. (3) wird dann $p_m = 0$ atü,

$$P_1' = \frac{G_{sec}}{g} \cdot c_m ,$$

d. h. die Ausströmgeschwindigkeit kann bei einem Innendruck unter 1,9 ata die Schallgeschwindigkeit des Austrittszustandes nicht überschreiten.

In welcher Weise die Gestaltung der Düse zweckmäßig auszuführen ist, soll im Abschnitt 3 untersucht werden; das Ziel dabei muß nur sein, eine völlige Entspannung des Gases auf den Außendruck p_a herbeizuführen und ihm dabei eine möglichst hohe Geschwindigkeit mitzuteilen.

Wie bei allen Umsetzungen von Wärmeenergien in mechanische Bewegungen, so sind auch die Verhältnisse bei der Rakete mit Verlusten verbunden, die die Einführung gewisser Wirkungsziffern zweckmäßig erscheinen lassen.

Zunächst ist im Ofen selbst die Umsetzung des Heizwertes in kinetische Strömenergie keine hundertprozentige. Der Anteil des Heizwertes E_n, der pro kg Gas zur Verfügung steht, läßt sich errechnen aus dem Produkt des unteren Heizwertes des verwendeten Brennstoffes und dem Gewichtsanteil, den dieser an 1 kg Gesamtgemisch hat. Mit Hilfe des mechanischen Wärmeäquivalents A = 1/427 WE/mkg läßt sich hieraus eine „hypothetische Ausströmgeschwindigkeit"

$$c_h = \sqrt{2g \cdot 427 \cdot E_n} = \sqrt{8380\, E_n} = 91{,}3 \sqrt{E_n}$$

ermitteln. Das Verhältnis