11.6 Laval - Düse

11.6.1 Grundlagen

Beim Ausströmen eines gas- oder dampfförmigen Mediums aus einem Druckbehälter kann die Austrittsgeschwindigkeit höchstens den Wert der Schallgeschwindigkeit annehmen.

Soll die Expansion unter dem kritischen Druck weitergehen und die Geschwindigkeit größer als die Schallgeschwindigkeit werden, so muß die Düse nicht als einfache, konvergierende, sondern als erweiterte Düse ausgeführt werden.

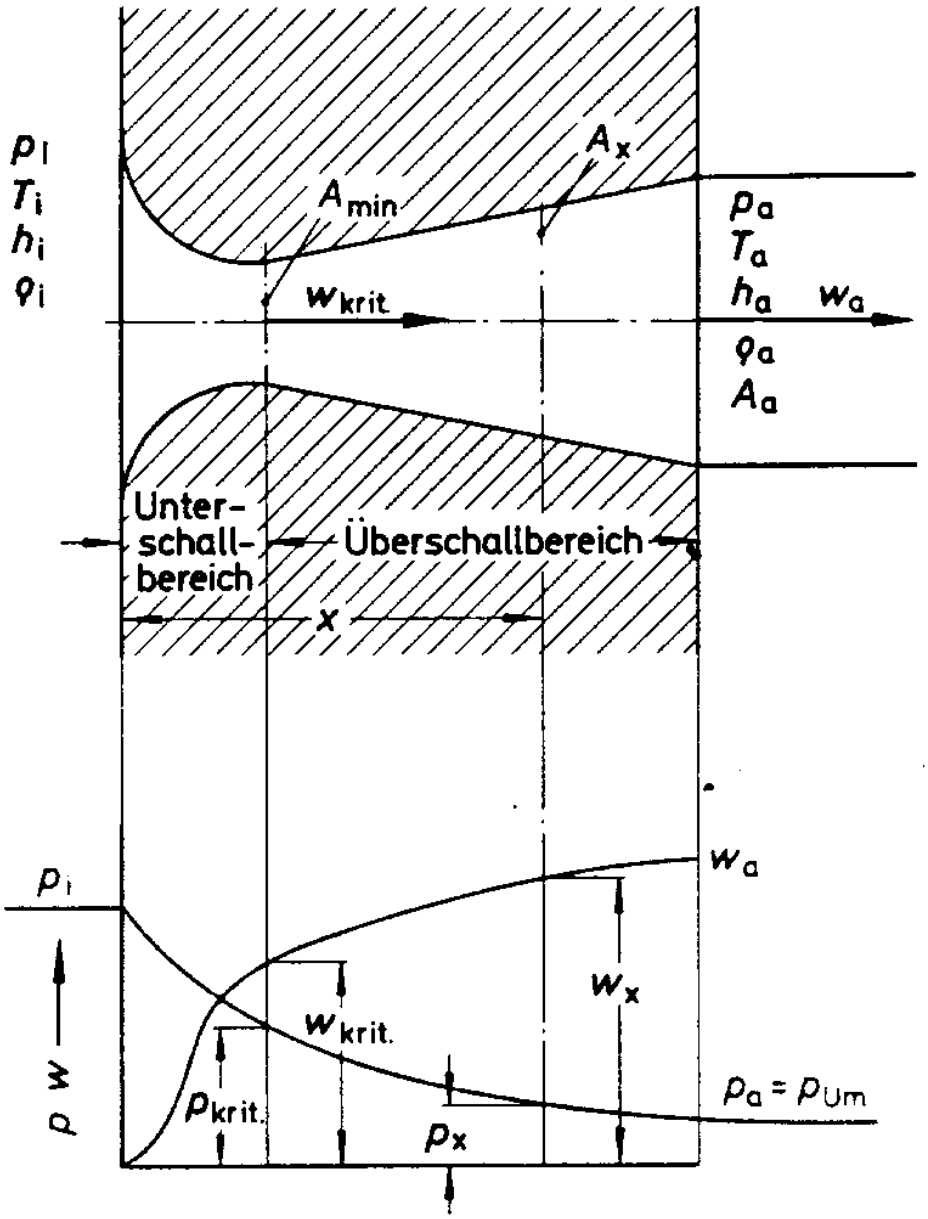

Abb. 11.6.1 Laval - Düse

Liegt der Druck p im Ausgangsquerschnitt nur wenig unter dem Kesseldruck, wird sich eine weitere Unterschallströmung wie in einem Venturi - Rohr ausbilden. An der engsten Stelle tritt dann der niedrigste Druck auf.

Liegt der Druck p weit unter dem Kesseldruck und wird an der engsten Stelle der kritische Druck erreicht, liegt im Ausgang durch die Geometrie der Düse festgelegt eine, eine Überschallströmung vor.

Heute werden Lavaldüsen in Dampfturbinen, Strahltriebwerken, Strahlapparaten, Raketentriebwerken und in Überschallwindkanälen eingebaut.

11.6.2 Konstruktive Gestaltung von Lavaldüsen

Lavaldüsen in Strahlapparaten, Strahltriebwerken und kleinen Dampfturbinen werden meistens kegelförmig mit kreisquerschnitten ausgeführt, wobei der Erweiterungswinkel α mit Rücksicht auf eine ablösungsfreie Strömung normalerweise unter 10° leigen sollte.

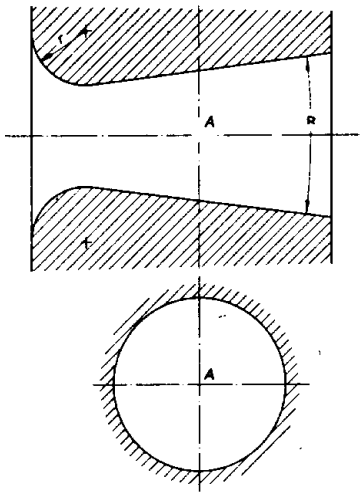

Abb. 11.6.2 Lavaldüse im Strahltriebwerk

Lavaldüsen in Raketenmotoren und sehr schnell fliegenden Überschallausstrahltriebwerken haben mit Rücksicht auf einen guten Wirkungsgrad oft etwas glockenförmige Gestalt. Mit derartigen Düsen werden besonders hohe Überschallgeschwindigkeiten erzielt.

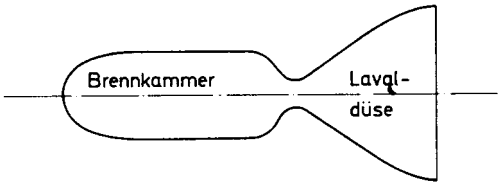

Abb. 11.6.3 Lavaldüse im Überschalltriebwerk

In den Leiträdern der Regelstufen von Dampfturbinen werden die Konturen der Lavaldüsenkanäle durch die Druck- und Saugseitevon geeignet ausgebildeten Profilen gebildet. Der Erweiterungswinkel α sollte den Wert 10° nach Möglichkeit nicht überschreiten.

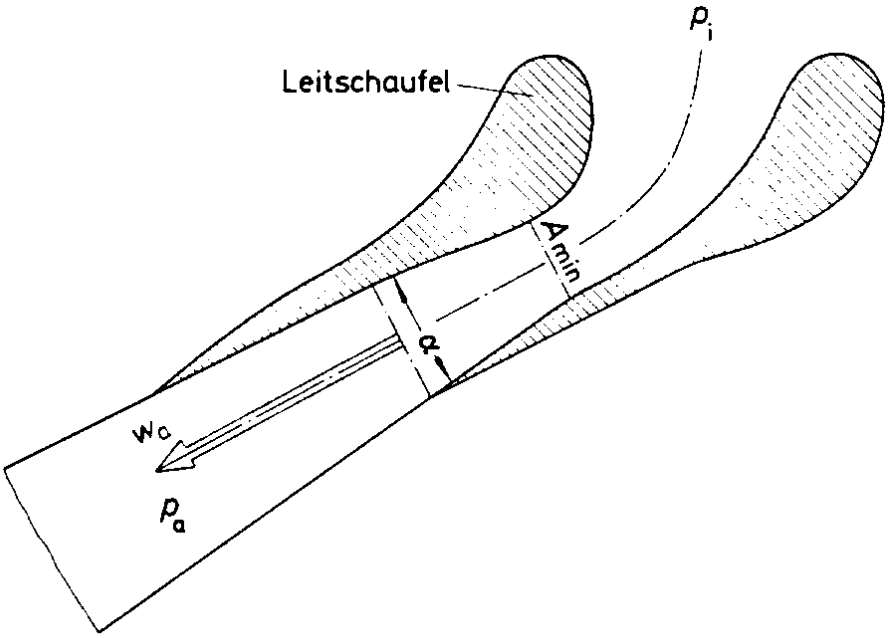

Abb. 11.6.4 Lavaldüse im Leitrad

11.6.3 Vergleich einer Gasströmung durch eine Lavaldüse und durch eine Kesselöffnung

Ein großer Druckluftkessel mit Kesseldruck p_0, und Kesseltemperatur T_0 besitzt eine Ablaßöffnung mit der Austrittsquerschnittsfläche A_1.

Es soll der sekündlich in die Atmosphäre (Atmosphärendruck p_u) ausfließende Massenstrom $\dot{m}$ berechnet werden.

Es werden zwei Fälle betrachtet:

I - reibungslose und inkompressible Strömung,

II - isentrope und kompressible Strömung.

Danach wird vor die Ablaßöffnung mit der Querschnittsfläche A_1 ein Erweiterungsstück mit der Austrittsquerschnittsfläche A_2 gesetzt (siehe Abb. ???). Es werden die gleichen Fälle betrachtet:

III - reibungslose und inkompressible Strömung,

IV - isentrope und kompressible Strömung.

Folgende Zahlenwerte sind für die Rechnung gegeben:

$p_0 = 3{,}7$ bar $\quad T_0 = 300$ K $\quad A_1 = 17$ cm^2

$p = 1$ bar $\quad A_2 = 20$ cm^2

$R = 287 \dfrac{Nm}{kgK}$ $\quad \kappa = 1{,}4$

Gasströmung durch Kesselöffnung

I Massenstrom durch die Kesselöffnung bei reibungsloser und inkompressibler Strömung

Massenstrom:

$$\dot{m} = r_0 \cdot w_{A_1} \cdot A_1 \qquad (11.6.1)$$

Dichte im Kessel:

Geschwindigkeit des Gases: (Kontinuitätsgleichung zwischen ⓪ und ①)

(Auf beiden Seiten ist ρ_0, da $\rho_{A1} = \rho_0$ - inkompressibel)

Massenstrom:

II Massenstrom bei isentroper und kompressibler Strömung

Es muß zunächst geprüft werden, ob in der Austrittsquerschnittsfläche die Schallgeschwindigkeit erreicht wird. Es ist die maximale Geschwindigkeit, die bei dem Austritt aus einem Kessel erreicht werden kann.

Das Druckverhältnis zwischen Kessel und Auslaßöffnung beträgt:

und ist kleiner als das kritische Druckverhältnis

d.h. im engsten Querschnitt mit der Fläche A_1 wird die Schallgeschwindigkeit erreicht.

Der Massenstrom $\dot{m}$ bestimmt sich aus der Kontinuitätsgleichung zu:

ρ^* und w^* bedeuten die kritischen Werte in A_1 und sind unbekannt

Aus der Tabelle 11.4.1 Kap.11.4.6 geht hervor:

ρ_0 aus Punkt I

Massenstrom $\dot{m}_{II}$:

Gasströmung durch die Lavaldüse

III Massenstrom $\dot{m}$ bei reibungsloser und inkompressibler Strömung, wenn ein Erweiterungsstück mit der Fläche A_2 gesetzt wird.

ρ_0 bleibt gleich

Durch die Vergrößerung der Austrittsquerschnittsfläche kann der Massenstrom bei einer inkompressiblen Strömung erhöht werden.

$$\dot{m}_{III} > \dot{m}_I$$

IV Massenstrom bei isentroper und kompressibler Strömung mit Erweiterungsstück (Lavaldüse)

Aus der Kontinuitätsgleichung geht hervor:

Der Massenstrom an der engsten Stelle (*) wurde bei isentroper und kompressibler Strömung im Punkt II berechnet. Alle Größen gelten auch hier. Der Massenstrom wird durch die engste Stelle begrenzt. Die Größe des Massenstromes bleibt also durch das Erweiterungsstück unverändert.

Dichte des Gases im Querschnitt A_2:

$$p_2 = 1\,bar \qquad R = 287\,\frac{Nm}{kgK}$$

$$r_2 = \frac{10^5\,\frac{N}{m^2}}{287\,\frac{Nm}{kgK}\cdot 206{,}43\,K} = 1{,}688\,\frac{kg}{m^3}$$

Geschwindigkeit des Gases im Querschnitt A_2:

Energiesatz zwischen ⓪ und ②:

Massenstrom im Querschnitt A_2:

$$\dot{m}_{IV} = 1{,}46\,\frac{kg}{s} \qquad = \qquad \dot{m}_{IV} = 1{,}47\,\frac{kg}{s}$$