Ü 26

Mit einem Druckverlust von 6 % (geschätzt) ergeben sich die in der Lösungsskizze, Bild 1 eingetragenen Zustandswerte:

Druckverlust:
$\Delta p_V = 0,06 \cdot p_{zu} = 0,06 \cdot 17 = 1,02 \text{ bar} \approx 1 \text{ bar}$

Turbinen-Zudampf:
$p_7 = p_{zu} - \Delta p_V = 16$ bar und $t_7 = 375$ °C. Hierzu aus (h,s)-Diagramm: $h_7 = 3203$ kJ/kg, $v_7 = 0,19 \text{ m}^3/\text{kg}$

Turbinen-Abdampf:
Bei idealer, d.h. isentroper Entspannung auf

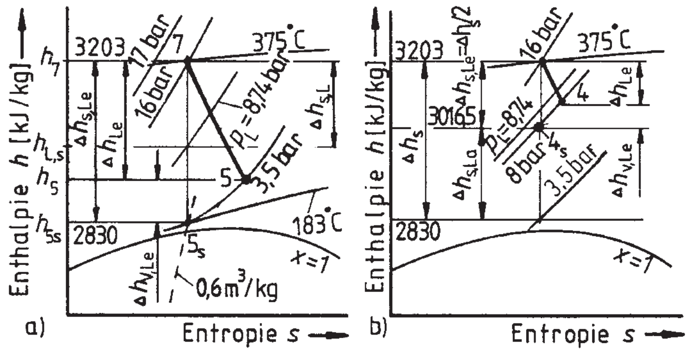

Bild 1. Lösungsskizze zu Ü 26. Ausschnitte aus (h,s)-Diagramm, a) Gleichdruck-, b) Überdruck-Wirkung.

$p_5 = 3,5$ bar werden
$h_{5,s} = 2830$ kJ/kg, $v_{5,s} = 0,6 \text{ m}^3/\text{kg}$, $t_{5,s} = 183$ °C

LAVAL-Zustand:
$p_L = P_L \cdot p_7 = 0,546 \cdot 16$ [bar] = 8,74 bar (Unterabschnitt 7.3.3.2). Hierzu aus (h,s)-Diagramm $h_{L,s} = 3035,5$ kJ/kg und $v_{L,s} = 0,3 \text{ m}^3/\text{kg}$

a) Gleichdruckwirkung, Bild 1 Teil a :
Vollständige Entspannung im Leitrad.
LAVAL-Düsen notwendig, da $p_4 < p_L$ mit $p_4 = p_5$

Zuströmgeschwindigkeit: Angenommen nach Gl. (7-157):
$c_6 \approx c_7 \approx 90$ m/s

LAVALgeschwindigkeit: Nach Gl. (7-159) mit geschätzt $\varphi_{Le,L} = 0,97$

$$c_L = \varphi_{Le,L} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta h_{L,s}} = \varphi_{Le,L} \cdot \sqrt{2 \cdot (h_7 - h_{L,s})}$$

$$c_L = 0,97 \cdot \sqrt{2 \cdot (3203 - 3035,5) \cdot 10^3} \; \left[\sqrt{J/kg}\right] = 561,43 \text{ m/s}$$

Ausströmgeschwindigkeit: Mit $\varphi_{Le} = 0,95 < \varphi_{Le,L}$ (geschätzt)

$$c_4 = c_5 = \varphi_{Le} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta h_s} = \varphi_{Le} \cdot \sqrt{2 \cdot (h_7 - h_{4,s})}$$

$$c_4 = c_5 = 0,95 \cdot \sqrt{2 \cdot (3203 - 2830) \cdot 10^3} \; \left[\sqrt{J/kg}\right] = 820,53 \text{ m/s}$$

Hinweis: Bei den folgenden Querschnittsbrechnungen sollte streng genommen, mit dem spezifischen Volumen der tatsächlichen (polytropen) Entspannung gerechnet werden . Die Abweichungen gegenüber den Werten der idealen, also isentropen Expansion sind jedoch gering und daher näherungsweise vernachlässigbar.

Düsen-Ausführung: Rechteckquerschnitt, gefräst.

LAVAL-Querschnitt: Ist als engster Querschnitt Ausgangspunkt für die Querschnittsauslegung.

$$A_{L,ges} = \frac{\dot{m} \cdot v_{L,s}}{c_L} = \frac{10500/3600 \cdot 0,3}{561,43} \left[\frac{kg/s \cdot m^3/kg}{m/s}\right]$$

$$A_{L,ges} = 1,559 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 1559 \text{ mm}^2$$

Ausführbar je Düse $A_{min} \geq 45 \text{ mm}^2$ (Abschnitt 7.3.3.2)

Düsenzahl: Bei ausgeführt Quadratquerschnitt (b_{min} = 7...10 mm) mit $b_L = 8$ mm Kantenlänge, also $A_L = 64 \text{ mm}^2$, ergibt sich:

$z_{Dü} = A_{L,ges}/A_L = 1559/64 = 24,36$

Ausgeführt: $z_{Dü} = 24$ Düsen Ergibt:

$A_L \equiv A_{L,Dü} = A_{L,ges}/z_{Dü} = 1559/24 = 64,96 \text{ mm}^2$

Bei $b_L = 8$ mm wird $a_L = 64,96/8 = 8,12$ mm

Zuströmquerschnitt

$$A_{6,ges} = \frac{\dot{m} \cdot v_{7,s}}{c_7} = \frac{10500/3600 \cdot 0,19}{90} \left[\frac{kg/s \cdot m^3/kg}{m/s}\right]$$

$$A_{6,ges} = 6,157 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 6157 \text{ mm}^2$$

$$A_{6,Dü} = A_{6,ges}/z_{Dü} = 6157/24 = 256,54 \text{ mm}^2$$

Bei $b_6 = b_L$ wird

$a_6 = A_{6,Dü}/b_6 = 256,54/8 = 32,07$ mm

Zuströmwinkel: $\alpha_6 = 90$ °

Abströmquerschnitt:

$$A_{5,ges} = \frac{\dot{m} \cdot v_{5,s}}{c_5} = \frac{10500/3600 \cdot 0,6}{820,53} \left[\frac{kg/s \cdot m^3/kg}{m/s}\right]$$

$$A_{5,ges} = 2,133 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 2133 \text{ mm}^2$$

$$A_{5,Dü} = A_{5,ges}/z_{Dü} = 2133/24 = 88,88 \text{ mm}^2$$

Bei $b_5 = b_L$: $a_5 = A_{5,Dü}/b_5 = 88,88/8 = 11,11$ mm

Länge der LAVALerweiterung bei Öffnungswinkel $\delta = 10°$ nach Gl. (7-163):

$$L_E = \frac{(a_5 - a_L)/2}{\tan(\delta/2)} = \frac{(11,11 - 8)/2}{\tan 5°} \; [mm] = 17,77 \text{ mm}$$

Düsenteilung: Nach Gl. (7-162) bei $\sigma_5 = s_5/\sin\alpha_5$ und $s_5 \geq 0,5$ mm sowie $\alpha_5 = 14...20°(...22°)$.

Ausgeführt: $s_5 = 1,0$ mm und $\alpha_5 = 18$ °. Damit

$t_{Le} = (a_5 + s_5)/\sin\alpha_5 = (11,11 + 1,0)/\sin 18$ °

$t_{Le} = 39,19 \text{ mm} \approx 39,2$ mm

Düsenbogen: $B_{Le} = t_{Le} \cdot z_{Dü} = 39,2 \cdot 24$ [mm] = 940,8 mm

Beaufschlagungsgrad: nach Gl. (7-152)

$$\varepsilon = \frac{z_{Dü} \cdot t_{Le}}{\pi \cdot D_{Le}} = \frac{940{,}8}{\pi \cdot 700} = 0{,}428 \mathrel{\hat{=}} 42{,}8\,\%$$

Strahlablenkung: Da vollständige Dampfentspannung in den Düsen, tritt keine Strahlablenkung auf.

Drehzahl: Aus Laufzahl $Lz = u/c_5 = 0{,}4 \ldots 0{,}5$

$u = (0{,}4 \ldots 0{,}5) \cdot c_5 = (0{,}4 \ldots 0{,}5) \cdot 820{,}53\ [m/s]$

$u = 328{,}2 \ldots 410{,}3$ m/s. Hieraus mit $D_{La} = D_{Le}$

$n = u/(D_{La} \cdot \pi) = 328 \ldots 410)/(0{,}7 \cdot \pi)\ [1/s]$

$\underline{n = 149 \ldots 186\ s^{-1}} = 8940 \ldots 11160\ min^{-1}$

b) Überdruckwirkung, Bild 16-11, Teil b :

Ausgeführt $r = 0{,}5$, weshalb Enthalpiegefälle zur Hälfte im Leitrad in Geschwindigkeit umgesetzt wird.

Aus (h,s)-Diagramm nach halbem Gefälle:

$p_5 = 8$ bar; $t_{5,s} = 280°$ C; $v_{5,s} = 0{,}34\ m^3/kg$;

$h_{5,s} = 3016{,}5$ kJ/kg

Da p_5 auch hier kleiner als p_L ist, wären ebenfalls LAVALdüsen notwendig. Der Unterschied ist jedoch gering, weshalb ZOELLYdüsen ausreichen - allerdings tritt Strahlablenkung auf.

Ausströmgeschwindigkeit: Nach Gl.(7-172) mit

$\Delta h_{s,Le} = h_7 - h_{4,s} = 3203 - 3016{,}5 = 186{,}5$ kJ/kg, bei

$c_7 = 90$ m/s $\quad c_{4,s} = \sqrt{2 \cdot 186{,}5 \cdot 10^3 + 90^2}\ [m/s] = 617{,}33$ m/s

$c_7 \approx 0 \quad c_{4,s} = \sqrt{2 \cdot 186{,}5 \cdot 10^3}\ [m/s] = 610{,}74$ m/s

Unterschied also gering und deshalb meist vernachlässigbar.

Bei geschätzt $\varphi_{Le} = 0{,}97$ wird $c_4 = \varphi_{Le} \cdot c_{4s}$ für

$c_7 = 90$ m/s $\quad c_4 = 0{,}97 \cdot 617{,}33 = 598{,}8$ m/s

$c_7 \approx 0 \quad c_4 = 0{,}97 \cdot 610{,}74 = 592{,}5$ m/s

Da bis zum Düsenende nur Entspannung auf p_L erfolgt, ist:

$$c_{5,s} = \sqrt{2 \cdot (h_7 - h_L) + c_7^2} = \sqrt{2 \cdot (3203 - 3035{,}5) \cdot 10^3 + c_7^2}\ [m/s]$$

bei $c_7 = 90$ m/s $\quad c_{5,s} = \sqrt{2 \cdot 167{,}5 \cdot 10^3 + 90^2} = 585{,}8$ m/s

$c_7 = 0 \quad c_{5,s} = \sqrt{2 \cdot 167{,}5 \cdot 10^3} = 578{,}8$ m/s

wieder mit $\varphi_{Le} = 0{,}97$ bei

$c_7 = 90$ m/s $\quad c_5 = 0{,}97 \cdot 585{,}8 = 568{,}2$ m/s

$c_7 \approx 0 \quad c_5 = 0{,}97 \cdot 578{,}8 = 561{,}4$ m/s

Austrittsquerschnitt: Mit $v_5 \approx v_{5,s} = v_{L,s}$:

$$A_{5,ges} = \frac{\dot{m} \cdot v_5}{c_5} = \frac{10500/3600 \cdot 0{,}3}{561{,}4} \left[\frac{kg/s \cdot m^3/kg}{m/s}\right]$$

$A_{5,ges} = 1{,}559 \cdot 10^{-3}\ m^2 = 1559\ mm^2$

Düsenzahl: Bei quadratischem Austrittsquerschnitt von $A_{5,Dü} = a_5 \cdot b_5 = 7 \cdot 7 = 49\ mm^2$

$z_{Dü} = A_{5,ges}/A_{5,Dü} = 1559/49 = 31{,}8$

Ausgeführt: $\underline{z_{Dü} = 32}$

Teilung: Bei $\alpha_5 = 20 \ldots 35°$ und $s_5 \geq 0{,}5$ mm und ausgeführt $\alpha_5 = 25°$ sowie $s_5 = 1$ mm

$t_{Le} = (a_5 + s_5)/\sin\alpha_5 = (7 + 1)/\sin 25° = 18{,}93$ mm

Düsenbogen: $b_{Le} = t_{Le} \cdot z_{Dü} = 18{,}93 \cdot 32 = 605{,}93$ mm

Da bei Überdruckwirkung Vollbeaufschlagung nowendig, muß der gesamte Leitradumfang mit Düsen belegt sein, also $b_{Le} = U_{Le} = D_{Le} \cdot \pi$. Hieraus folgt der mittlere Beaufschlagungsdurchmesser

$D_{Le} = b_{Le}/\pi = 605{,}76/\pi = 192{,}8$ mm ≈ 193 mm

Bei Überdurckwirkung kann somit der in der Aufgabenstellung vorgesehene Laufraddurchmesser nicht ausgeführt werden.

Drehzahl: Mit $Lz = u/c_4 = 0{,}65 \ldots 0{,}95$ wird

$u = (0{,}65 \ldots 0{,}95) \cdot c_4 = (0{,}65 \ldots 0{,}95) \cdot 592\ [m/s]$

$u = 348 \ldots 562$ m/s $\quad$ Hieraus mit $D_{La} = D_{Le}$

$n = u/(D_{La} \cdot \pi) = (348 \ldots 562)/(0{,}193 \cdot \pi)\ [1/s]$

$n = 574 \ldots 926{,}9\ s^{-1} = 34436 \ldots 55620\ min^{-1}$

Wertebereich nicht sinnvoll (Radreibung) und technisch kaum verwirklichbar (Fliehkraft). Deshalb werden einstufige Überdruckturbinen solch kleiner Leistung nicht ausgeführt.

Strahlablenkung:

Mit $v_5 \approx v_{5,s}$

$$\cos\Delta\alpha_{5-4} = (c_5/c_4) \cdot \left[1 + (p_5 - p_4) \cdot v_5/c_5^2\right]$$

$$= \frac{561{,}4}{592{,}5} \cdot \left[1 + \frac{(8{,}74 - 8) \cdot 10^5 \cdot 0{,}3}{561{,}4^2}\right] \left[\frac{Pa \cdot m^3/kg}{m^2/s^2}\right]$$

$= 1{,}014 > 1$ da bedeutet, Gleichung nicht anwendbar!

Nach Gl.(7-165) mit $v_4 \approx v_{4,s}$ und $v_5 \approx v_{5,s}$

$$\sin\alpha_4 = \sin\alpha_5 \cdot \frac{c_5}{c_4} \cdot \frac{v_4}{v_5} = \sin 25° \cdot \frac{561{,}4}{592{,}5} \cdot \frac{0{,}34}{0{,}3}$$

$= 1{,}074 \cdot \sin\alpha_5 = 1{,}074 \cdot \sin 25° = 0{,}4538$

$\rightarrow \alpha_4 = 26{,}99° \approx 27°$ Damit

Strahlablenkung $\Delta\alpha_{5-4} = \alpha_4 - \alpha_5 = 27° - 25° = \underline{2°}$

Wirkungsgrad: $\eta_e = P_e/P_{th}$ Mit

$P_{th} = \dot{m} \cdot Y_{th} = \dot{m} \cdot \Delta h_s = \dot{m} \cdot (h_7 - h_{4,s})$

$$P_{th} = \frac{10500}{3600} \cdot (3203 - 2830)\ [kg/s \cdot kJ/kg] = 1088\ kW$$

$\eta_e = 540/1088 = 0{,}496 \approx \underline{0{,}5}$