Ü 63

Für die bei Gasturbinen immer angewendete Überdruckwirkung ($r = 0{,}5$) gelten die gleichen Richtwerte wie bei Dampfturbinen. Nach Unterabschnitt 6.2.5.3 ausgeführt:

Laufzahl $Lz = u/c_2 = 0{,}8$

Beschauflungswinkel $\alpha_5 = \alpha_2 = \beta_1 = 18^\circ$

Geschätzt: Geschwindigkeitsbeiwert von Leit- und Laufbeschauflung je 0,97

a) Leitrad

Bei Vernachlässigen der Zuströmgeschwindigkeit, $c_7 \approx 0$

$\Delta h_{Le} = c_5^2/2$ mit $c_5 \approx c_2$

$c_2 = u/Lz = 220/0{,}8\ [m/s] = 275\ m/s$

$\Delta h_{Le} = 275^2/2\ [m^2/s^2] = 37812{,}5\ m^2/s^2 \approx 37{,}8\ kJ/kg$

$\Delta h_{Le,s} = c_{5,s}^2/2$ wobei

$c_{5,s} = c_5/\varphi_{Le} = 275/0{,}97 = 283{,}51\ m/s$

$\Delta h_{Le,s} = 283{,}5^2/2 = 40187{,}6\ m^2/s^2 \approx 40{,}2\ kJ/kg$ Oder

$\Delta h_{Le,s} = \Delta h_{Le}/\eta_{Sch,Le}$ mit

$\eta_{Sch,Le} = \varphi_{Le}^2 = 0{,}97^2 = 0{,}94$

$\Delta h_{Le,s} = 37{,}8/0{,}94 = 40{,}2\ kJ/kg$ (wie zuvor!)

$\Delta h_{V,Le} = \Delta h_{Le,s} - \Delta h_{Le} = \Delta h_{Le,s} \cdot (1 - \eta_{Sch,Le})$

$\Delta h_{V,Le} = 40{,}2 \cdot (1 - 0{,}94)\ [kJ/kg] = 2{,}41\ kJ/kg$

Stufengefälle aus $\Delta h_{Le,s} = (1 - r) \cdot \Delta h_{St,s}$

$\Delta h_{St,s} = \Delta h_{Le,s}/(1 - r) = 2 \cdot \Delta h_{Le,s}$ da $r = 0{,}5$

$\underline{\Delta h_{St,s} = 2 \cdot 40{,}2 = 80{,}4\ kJ/kg}$

b) Laufrad

$\Delta h_{La,s} = r \cdot \Delta h_{St,s} = \Delta h_{Le,s} = 40{,}2\ kJ/kg$

$\Delta h_{La} = \Delta h_{La,s} - \Delta h_{V,La}$ wobei nach Gl. (7-179)

$\Delta h_{V,La} = (\Delta h_{La,s} + w_2^2/2) \cdot (1 - \varphi_{La}^2)$

Da Relativgeschwindigkeit $w_2$ für Berechnung notwendig, muß zuerst der Geschwindigkeitsplan ermittelt werden.

Druckseite:

$c_{2m} = c_2 \cdot \sin\alpha_2 = 275 \cdot \sin 18^\circ\ [m/s] = 84{,}98\ m/s = w_{2m}$

$c_{2u} = c_2 \cdot \cos\alpha_2 = 275 \cdot \cos 18^\circ\ [m/s] = 261{,}54\ m/s$

$w_{2u} = c_{2u} - u = 261{,}54 - 220\ [m/s] = 41{,}54\ m/s$

$w_2 = \sqrt{w_{2u}^2 + w_{2m}^2} = \sqrt{41{,}54^2 + 84{,}98^2} = 94{,}59\ m/s$

$\tan\beta_2^* = w_{2m}/w_{2u} = 84{,}98/41{,}54 = 2{,}0457 \longrightarrow$

$\beta_2^* = 63{,}95^\circ \approx 64^\circ$

Saugseite: Mit Gl. (7-177) und Gl. (7-178)

$w_{1,s} = \sqrt{\Delta h_{St,s} + w_2^2} = \sqrt{80400 + 94{,}59^2}\ \left[\sqrt{m^2/s^2}\right]$

$w_{1,s} = 298{,}91\ m/s$

$w_1 = \varphi_{La} \cdot w_{1,s} = 0{,}97 \cdot 298{,}91\ [m/s] = 289{,}94\ m/s$

$w_{1u} = w_1 \cdot \cos\beta_1 = 289{,}94 \cdot \cos 18^\circ\ [m/s] = 275{,}75\ m/s$

$w_{1m} = w_1 \cdot \sin\beta_1 = 289{,}94 \cdot \sin 18^\circ\ [m/s] = 89{,}6\ m/s = c_{1m}$

$c_{1u} = w_{1u} - u = 275{,}75 - 220\ [m/s] = 55{,}75\ m/s$

$c_1 = \sqrt{c_{1m}^2 + c_{1u}^2} = \sqrt{89{,}60^2 + 55{,}75^2} = 105{,}53\ m/s$

$\tan\alpha_1^* = c_{1m}/c_{1u} = 89{,}60/55{,}75 = 1{,}6072 \longrightarrow$

$\alpha_1^* = 58{,}11^\circ \approx 58^\circ$

Mit diesen Werten sind die Ge-Δ in Bild 1 aufgetragen. Des weiteren ermöglichen sie das Gestalten der Schaufelprofile mit Hilfe der Unterabschnitte 2.5.3.2 und 6.2.5.3 sowie Abschnitt 7.3.3.

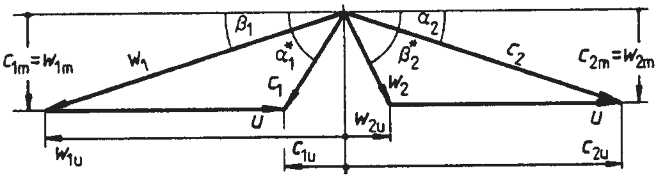


Bild 1. Lösungsskizze zu Ü 63
Geschwindigkeitsdreiecke (maßstäblich).

Mit den Geschwindigkeiten ergeben sich:

Laufschaufelverlust:

$\Delta h_{V,La} = (40200 + 94{,}59^2/2) \cdot (1 - 0{,}97^2)\ [m^2/s^2]$

$\underline{\Delta h_{V,La} = 2640{,}2\ m^2/s^2 = 2{,}64\ kJ/kg}$

Austrittsverlust: Gemäß Gl. (8-23):

$\Delta h_{V,As} = c_1^2/2 = 105{,}53^2/2 = 5568{,}3\ m^2/s^2 \approx \underline{5{,}57\ kJ/kg}$

$\Delta h_{V,As}$ ist verloren, falls in der nächsten Stufe nicht genutzt.

Beschauflungs-Gesamtverlust:

$\Delta h_{V,Sch} = \Delta h_{V,Le} + \Delta h_{V,La} + \Delta h_{V,As}$

$\Delta h_{V,Sch} = 2{,}41 + 2{,}64 + 5{,}57\ [kJ/kg] = \underline{10{,}62\ kJ/kg}$

Umgesetzte Schaufel- oder Stufenenergie:

$\Delta h_{Sch} \equiv \Delta h_{St} = \Delta h_{St,s} - \Delta h_{V,Sch} = 80{,}4 - 10{,}6\ [kJ/kg]$

$\underline{\Delta h_{Sch} \equiv \Delta h_{St} = 69{,}8\ kJ/kg}$

c) $\eta_{Sch} = \Delta h_{St}/\Delta h_{St,s} = 69{,}8/80{,}4 = 0{,}87$ Oder

$\eta_{Sch} = Y_{Sch}/\Delta Y$ mit

$Y_{Sch} = u \cdot (c_{2u} - c_{1u})$ Hierbei nach Ge-Δ $c_{1u}$ entgegen u gerichtet ($c_{1u} \uparrow\downarrow u$). Deshalb $c_{1u} = -|c_{1u}|$. Also

$Y_{Sch} = u \cdot (c_{2u} + |c_{1u}|) = 220 \cdot (261{,}54 + 55{,}75)\ [m^2/s^2]$

$\underline{Y_{Sch} = 69803{,}8\ m^2/s^2 = 69{,}8\ kJ/kg}$

$\underline{\Delta Y = \Delta h_{St,s} = 80{,}4\ kJ/kg}$

Werte also wie zuvor und deshalb auch $\eta_{Sch}$

d) Mit $\varkappa = 1{,}4$ und $R = 287$ J/kg (Luftwerte) aus

$$\Delta h_{St,s} = \frac{\varkappa}{\varkappa-1} R\cdot T_3\left[1 - (1/\pi_{St})^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right]$$

$$1/\pi_{St} = \left[1 - \Delta h_{St,s}\frac{\varkappa-1}{\varkappa}\frac{1}{R\cdot T_3}\right]^{\varkappa/(\varkappa-1)}$$

$$1/\pi_{St} = \left\{1 - 80400\cdot\frac{1{,}4-1}{1{,}4}\cdot\frac{1}{287\cdot 923}\left[\frac{J/kg}{J/(kg\cdot K)\cdot K}\right]\right\}^{1{,}4/(1{,}4-1)}$$

$$1/\pi_{St} = 0{,}728 \longrightarrow \underline{\pi_{St} = 1{,}37}$$

Aus $\pi_{St} = p_3/p_{7,II}$ Mit

Druck vor der I. Stufe

$p_3 = p_1\cdot\pi = 0{,}95\cdot 7{,}2$ [bar] $= 6{,}84$ bar wird der Druck nach der I. Stufe und damit Druck vor der II. Stufe, wobei $\pi_{St,I} = \pi_{St}$

$$p_{7,II} = p_3/\pi_{St,I} = 6{,}84/1{,}37 = 4{,}993 \text{ bar} \approx 5 \text{ bar}$$

Isentrope Temperaturänderung

$$T_{7,II,s} = T_3\cdot(1/\pi_{St,I})^{(\varkappa-1)/\varkappa}$$
$$= 923\cdot(1/1{,}37)^{(1{,}4-1)/1{,}4}[K] = 843{,}6 \text{ K} \longrightarrow$$

$$t_{7,II,s} = 570{,}6\ ^\circ C$$

Tatsächliche Temperaturänderung nach **Erg. 13** mit $\eta_{T,s} = \eta_{Sch} = 0{,}87$ und $T_3 = 923$ K

$$\Delta T_{St,I} = \eta_{Sch}\cdot T_{3,I}\cdot\left[1 - (1/\pi_{St,I})^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right]$$
$$\Delta T_{St,I} = 0{,}87\cdot 923\cdot\left[1 - (1/1{,}37)^{(1{,}4-1)/1{,}4}\right][K]$$
$$\Delta T_{St,I} = 69{,}07 \approx 69 \text{ K}$$

Andererseits aus $\Delta T_{St,I} = T_{3,I} - T_{7,II}$

$$T_{7,II} = T_{3,I} - \Delta T_{St,I} = 923 - 69 = 854 \text{ K} \longrightarrow$$
$$\underline{t_{7,II} = 581\ ^\circ C}$$

Der Druck zwischen Leit- und Laufschaufelkranz ergibt sich entsprechend mit $\Delta h_{Le,s} = 40200$ J/kg

$$1/\pi_{Le,I} = \left[1 - \Delta h_{Le,s}\frac{\varkappa-1}{\varkappa}\cdot\frac{1}{R\cdot T_3}\right]^{\varkappa/(\varkappa-1)}$$
$$1/\pi_{Le,I} = \left[1 - 40200\cdot\frac{1{,}4-1}{1{,}4}\cdot\frac{1}{287\cdot 923}\right]^{1{,}4/(1{,}4-1)}$$
$$1/\pi_{Le,I} = 0{,}856 \longrightarrow \pi_{Le,I} = 1{,}17$$

Aus $\pi_{Le,I} = p_3/p_{2,I}$ folgt

$$p_{2,I} = p_3/\pi_{Le,I} = 6{,}84/1{,}17 = 5{,}85 \text{ bar}$$

Isentrope Temperatur

$$T_{2,I,s} = T_3\ (1/\pi_{Le,I})^{(\varkappa-1)/\varkappa}$$
$$T_{2,I,s} = 923\cdot(1/1{,}17)^{(1{,}4-1)/1{,}4}[K] = 882{,}5 \text{ K} \longrightarrow$$
$$t_{2,I,s} = 609{,}5\ ^\circ C$$

Mit $\eta_{Sch,Le} = \varphi_{Le}^2 = 0{,}97^2 = 0{,}94$ gemäß **Erg. 13**

$$\Delta T_{Le,I} = \eta_{Sch,Le}\cdot T_{3,I}\cdot\left[1 - (1/\pi_{Le,I})^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right]$$
$$\Delta T_{Le,I} = 0{,}94\cdot 923\cdot\left[1 - (1/1{,}17)^{(1{,}4-1)/1{,}4}\right][K]$$
$$\Delta T_{Le,I} = 38 \text{ K}$$

Andererseits $\Delta T_{Le,I} = T_{3,I} - T_{2,I}$ Hieraus

$$T_{2,I} = T_{3,I} - \Delta T_{Le,I} = 923 - 38 = 885 \text{ K} \longrightarrow$$
$$\underline{t_{2,I} = 612\ ^\circ C}$$

e) $D = u/(\pi\cdot n)$ mit $n = 80\ s^{-1}$

$$\underline{D} = 220/(\pi\cdot 80)\ \left[(m/s)/s^{-1}\right] = \underline{0{,}875 \text{ m}}$$

f) Aus Durchflußgleichung (Zweitindex I für I. Stufe weggelassen):

$\dot V_2 = A_{2m}\cdot c_{2m}$ Mit $\dot V_2 = \dot m\cdot v_2$ und $A_{2m} = D\cdot\pi\cdot b_2\cdot 1/\tau_2$

Bei geschätzt $\tau_2 = 1{,}1$ und aus Gasgleichung:

$$v_2 = \frac{R\cdot T_2}{p_2} = \frac{287\cdot 885}{5{,}85\cdot 10^5}\left[\frac{m^2/(s^2\cdot K)\cdot K}{N/m^2}\right] = 0{,}434\ m^3/s$$

$$\dot V_2 = 24\cdot 0{,}434\ \left[kg/s\cdot m^3/kg\right] = 10{,}42\ m^3/s$$

$$A_{2m} = \dot V_2/c_{2m} = 10{,}42/84{,}98\ \left[(m^3/s)/(m/s)\right] = 0{,}1226\ m^2$$

Die Werte eingesetzt, ergibt:

$$b_2 = \frac{A_{2m}\cdot\tau_2}{D\cdot\pi} = \frac{0{,}1226\cdot 1{,}1}{0{,}875\cdot\pi}\left[\frac{m^2}{m}\right] = 0{,}049 \text{ m}$$

Ausgeführt: $\underline{b_2 = 50 \text{ mm}}$

g) $\eta_A = \eta_{A,th}\cdot\eta_g\cdot\eta_{BK}\cdot\eta_m$ **Erg. 13** mit

$$\eta_{A,th} = 1 - (1/\pi)^{(\varkappa-1)/\varkappa}$$
$$= 1 - (1/7{,}2)^{(1{,}4-1)/1{,}4} = 0{,}43$$

bei geschätzt $\eta_{T,s} = 0{,}85\ (<\eta_{Sch})$

$\eta_{K,s} \approx \eta_{T,s} - 0{,}02 = 0{,}83$

$$\eta_g = \frac{(T_3/T_2)\cdot\eta_{T,s} - 1/\eta_{K,s}}{(T_3/T_2) - 1}$$

$$T_2 = T_1 + \eta_{K,s}^{-1}\cdot T_1\cdot\left[\pi_K^{(\varkappa-1)/\varkappa} - 1\right]$$
$$T_2 = 293\cdot\left[1 + 0{,}83^{-1}\cdot(7{,}2^{(1{,}4-1)/1{,}4} - 1)\right][K]$$

$T_2 = 560{,}5$ K $\longrightarrow$ $t_2 = 287{,}5\ ^\circ C$ Dann wird

$$\eta_g = \frac{(923/560{,}5)\cdot 0{,}85 - 1/0{,}83}{(923/560{,}5) - 1} = 0{,}30$$

Desweiteren geschätzt $\eta_{BK} = 0{,}97$ und $\eta_m = 0{,}98$

Mit den Werten ergibt sich dann:

$\underline{\eta_A} = 0{,}43\cdot 0{,}3\cdot 0{,}97\cdot 0{,}98 = 0{,}123 \approx \underline{0{,}12}$ (sehr wenig)

h) Da verhältnismäßig niedrige Rauchgastemperatur, kann auf Schaufelkühlung verzichtet werden. Deshalb:

$$\dot m_T = \dot m_K = \dot m$$

$w_{t,N} = w_{t,T} - w_{t,K}$ mit

$$w_{t,T} = \eta_{T,s}\cdot w_{t,T,s} = \eta_{T,s}\cdot\Delta h_{T,s}$$
$$\Delta h_{T,s} = \frac{\varkappa}{\varkappa-1}\cdot R\cdot T_3\cdot\left[1 - (1/\pi_T)^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right]$$

wobei $\pi_T = p_3/p_4 = (p_2 - \Delta p_{BK})/p_4$ mit geschätzt: $\Delta p_{BK} \approx 0{,}05\cdot p_2$ (Unterabschnitt 11.4.4)

$$\pi_T = 0{,}95\cdot p_2/p_4 = 0{,}95\cdot p_2/p_1 = 0{,}95\cdot\pi_K$$
$$\pi_T = 0{,}95\cdot 7{,}2 = 6{,}84$$

Rauchgas: $R = 277$ J/(kg·K) und $\varkappa \approx 1{,}37$ lt. Unterabschnitt 11.4.4

$$\Delta h_{T,s} = \frac{1{,}37}{1{,}37-1} \cdot 277 \cdot 923 \cdot \left[1 - (1/6{,}84)^{(1{,}37-1)/1{,}37}\right]$$
$$= 383459 \text{ J/kg} \approx 383{,}5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,T} = 0{,}85 \cdot 383{,}5 = 326 \quad \text{kJ/kg}$$

$$w_{t,K} = w_{t,K,s}/\eta_{K,s} = \Delta h_{K,s}/\eta_{K,s} \qquad \text{Mit}$$

$$\Delta h_{K,s} = \frac{\varkappa}{\varkappa-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\pi_K^{(\varkappa-1)/\varkappa} - 1\right]$$

$$\Delta h_{K,s} = \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \cdot 287 \cdot 293 \cdot \left[7{,}2^{(1{,}4-1)/1{,}4} - 1\right] [\text{J/kg}]$$

$$\Delta h_{K,s} = 223014 \text{ J/kg} \approx 223 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,K} = 223/0{,}83 = 269 \text{ kJ/kg}$$

Die Werte eingesetzt, ergibt:

$$w_{t,N} = 326 - 269 = 57 \text{ kJ/kg} \qquad \text{und damit}$$

$$\underline{P_N} = w_{t,N} \cdot \dot{m} = 57 \cdot 24 \; [(\text{kJ/kg}) \cdot (\text{kg/s})] = \underline{1368 \text{ kW}}$$

i) Nach **Erg. 13:**

$$q = 996 \cdot (T_3 - T_2) + 0{,}11 \cdot (T_3^2 - T_2^2) \; [\text{J/kg}]$$

$$q = 996 \cdot (923 - 560{,}5) + 0{,}11 \cdot (923^2 - 560{,}5^2) \; [\text{J/kg}]$$

$$q = 420205 \text{ J/kg} \approx 420 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{Br} = q/\eta_{BK} = 420/0{,}97 = 433 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{Br} = q_{Br} \cdot \dot{m}_{Lu} = 433 \cdot 24 \; [(\text{kJ/kg}) \cdot (\text{kg/s})] = 10397 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_{Br} = \frac{\dot{Q}_{Br}}{H_u} = \frac{10397 \text{ kJ/s}}{42000 \text{ kJ/kg}} = 0{,}248 \text{ kg/s} \approx 250 \text{ gr/s}$$

Gegenrechnung für den Anlagenwirkungsgrad:

$$\eta_A = P_N/\dot{Q}_{Br} = 1368/10397 \approx 0{,}13$$

Unterschied dadurch bedingt, indem bei der ersten Berechnungsart die Stoffwerte ($R$, $\varkappa$) des Rauchgases denen von Luft gleichgesetzt sind.