Ü 59 Gegebene Dampfwerte in das (h,s)-Diagramm (Bild 1) eingetragen, liefert die zur Berechnung notwendigen h- und v-Werte.

a)

$\Delta h_s = 3050 - 2652\,[\mathrm{kJ/kg}] = 398\ \mathrm{kJ/kg} = 39{,}8\cdot 10^4\ \mathrm{m^2/s^2}$

$\Delta h_i = 3050 - 2866\,[\mathrm{kJ/kg}] = 184\ \mathrm{kJ/kg} = 18{,}4\cdot 10^4\ \mathrm{m^2/s^2}$

$Y_i \equiv \Delta h_i = 184\ \mathrm{kJ/kg} = 184\cdot 10^3\ \mathrm{m^2/s^2}$

b) $\eta_i = Y_i/\Delta h_s = 184/398 = 0{,}462$

c) $\eta_A = \eta_{therm}\cdot\eta_{Ke}\cdot\eta_T\cdot\eta_G$

$\eta_T \equiv \eta_e = \eta_i\cdot\eta_m = 0{,}462\cdot 0{,}98 = 0{,}452 \approx 0{,}45$

$$\eta_{therm} \equiv \eta_{therm,s} = \frac{w_{t,s}}{q} = \frac{\Delta h_s}{q} = \frac{\Delta h_s}{h_e - h_{Wa}}$$

Enthalpie des Speisewassers:

$h_{Wa} \approx c_{Wa}\cdot t_{Wa} = 4{,}187\cdot 20\ [\mathrm{kJ/(kg\cdot K)\cdot K}] \approx 80\ \mathrm{kJ/kg}$

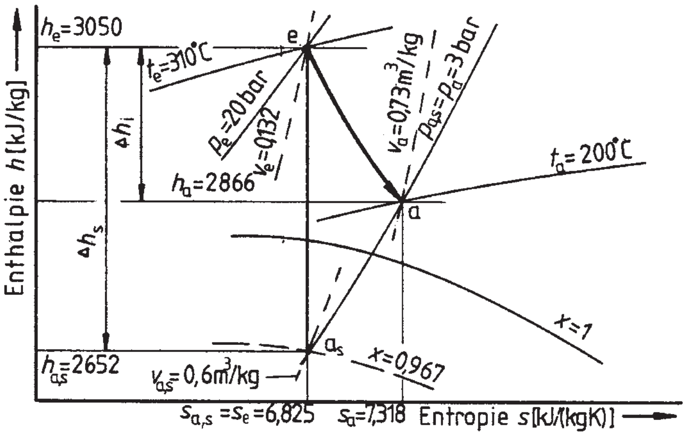

Bild 1. Lösungsskizze 1 zu Ü 59. Ausschnitt aus (h,s)-Diagramm mit Entspannungsverlauf und zugehörige Dampf-Werte.

Damit $\eta_{therm} = 398/(3050 - 80) = 0{,}134 \approx 0{,}13$

Oder überschlägig (Unterabschnitt 8.5.8)

$\eta_{therm} = \eta_C\cdot\eta_g$

$$\eta_C = \frac{T - T_0}{T} = 1 - \frac{T_0}{T} = 1 - \frac{200+273}{310+273} = 0{,}19$$

$\eta_g = 0{,}5\ldots0{,}7$ Angen. $\eta_g = 0{,}65$

$\eta_{therm} = 0{,}19\cdot 0{,}65 = 0{,}12$

Mit den Werten folgt:

$\eta_A = 0{,}13\cdot 0{,}88\cdot 0{,}45\cdot 0{,}96 = 0{,}049 \approx \underline{0{,}05}$

d) $P_e = Y_e\cdot\dot m$ Hieraus $\dot m = P_e/Y_e$

$Y_e = Y_i\cdot\eta_m = \Delta h_i\cdot\eta_m = 184\cdot 0{,}98\ [\mathrm{kJ/kg}]$

$= 180{,}3\ \mathrm{kJ/kg} = 1{,}8\cdot 10^5\ \mathrm{Ws/kg}$

$\dot m = (5\cdot 10^6\ \mathrm{W})/(1{,}8\cdot 10^5\ \mathrm{Ws/kg}) = \underline{27{,}78\ \mathrm{kg/s}}$

$\tan\beta_2^* = w_{2m}/w_{2u} = c_{2m}/(c_{2u} - u)$

$c_{2m} = c_2\cdot\sin\alpha_2$ und $c_{2u} = c_2\cdot\cos\alpha_2$ mit

$\alpha_2 = 12\ldots30^\circ$ lt. Unterabschnitt 6.2.5.3; ausgeführt $\alpha_2 = 16^\circ$

Theoretische (isentrope) Düsenaustrittsgeschw.

$c_{5,s} = \sqrt{2\cdot\Delta h_s} = \sqrt{2\cdot 39{,}8\cdot 10^4}\ \left[\sqrt{\mathrm{m^2/s^2}}\right] = 892{,}19\ \mathrm{m/s}$

$c_5 = \varphi_{Le}\cdot c_{5,s}$ Hierbei nach Unterabschnitt 2.5.3.2 $\varphi_{Le} = 0{,}93\ldots0{,}99$; angen. $\varphi_{Le} = 0{,}96$

$c_5 = 0{,}96\cdot 892{,}19\ [\mathrm{m/s}] = 856{,}5\ \mathrm{m/s}$

$c_{2m,s} = c_{2,s}\cdot\sin\alpha_2$ Mit $c_{2,s} = c_{4,s} = 892{,}19\ \mathrm{m/s}$

$c_{2m,s} = 892{,}19\cdot\sin 16^\circ\ [\mathrm{m/s}] = 245{,}92\ \mathrm{m/s}$

$c_{2u,s} = c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2 = 892{,}19\cdot\cos 16^\circ\,[\mathrm{m/s}] = 857{,}63\ \mathrm{m/s}$

$u = \frac{1}{2}\cdot c_2\cdot\cos\alpha_2 = \frac{1}{2}\cdot\varphi_{Le}\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2 = \frac{1}{2}\cdot\varphi_{Le}\cdot c_{2u,s}$

$= (1/2)\cdot 0{,}96\cdot 857{,}63\ [\mathrm{m/s}] = 411{,}66\ \mathrm{m/s}$ (Überschall)

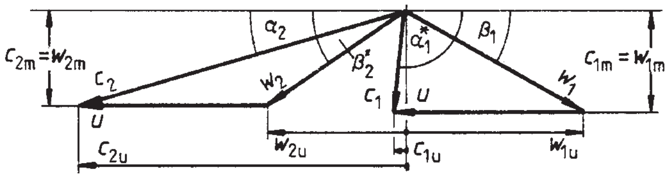

Bild 2. Lösungsskizze 2 zu Ü 59. Geschwindigkeitsplan (maßstäblich).

$w_{2u,s} = c_{2u,s} - u_2 = c_{2u,s}\cdot(1 - 0{,}5\cdot\varphi_{Le})$

$= 857{,}63\cdot(1 - 0{,}5\cdot 0{,}96)\ [\mathrm{m/s}] = 445{,}97\ \mathrm{m/s}$

$w_{2m,s} = c_{2m,s} = c_{4m,s} = 245{,}96\ \mathrm{m/s}$

$\tan\beta^*_{2,s} = w_{2m,s}/w_{2u,s} = 245{,}96/445{,}97 = 0{,}5515$

$\underline{\beta^*_{2,s} = 29{,}88^\circ} \longrightarrow \underline{\beta_{2,s}} = 180^\circ - \beta^*_{2,s} = \underline{150{,}12^\circ}$

f) Die idealen Werte (Index s) ergeben sich bei der verlustlosen Maschine, also bei istenroper Entspannung und darauf abgestimmter Umfangsgeschwindigkeit.

$Y_{Sch,s} = u_s\cdot(c_{2u,s} + c_{1u,s}) = u_s\cdot(w_{2u,s} + w_{1u,s})$

Hierbei

$u_s = c_{2u,s}/2 = (1/2)\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2$

Da $w_{1,s} = w_{2,s}$ und $\beta_1 = \beta_2^*$ (symmetrische Schaufel) ist auch $w_{1u,s} = w_{2u,s}$ Damit

$w_{2u,s} + w_{1u,s} = 2\cdot w_{2u,s} = 2\cdot(c_{2u,s} - u_s)$

$= 2\cdot(c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2 - (1/2)\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2)$

$= c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2$ Eingesetzt:

$Y_{Sch,s} = \frac{1}{2}\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2 = \frac{1}{2}\cdot c^2_{2,s}\cdot\cos^2\alpha_2$

Mit $(1/2)\cdot c^2_{2,s}/2 = \Delta h_s$ wird letztlich

$Y_{Sch} = \Delta h_s\cdot\cos^2\alpha_2$

Hiermit kann ein Idealschaufel-Wirkungsgrad definiert werden:

$\underline{\eta_{Sch,s} = Y_{Sch,s}/\Delta h_s = \cos^2\alpha_2}$

Im Beispiel $\alpha_2 = 16^\circ$. Deshalb hier $\eta_{Sch,s} = 0{,}924$

Der Idealschaufelwirkungsgrad kennzeichnet welcher Anteil vom nutzbaren Energiegefälle bei Reibungsfreiheit in der Beschaufelung in Drehenergie umgesetzt werden kann. Bei $\alpha_2 = 0^\circ$ wird $\eta_{Sch,s} = 1$.
Wird dagegen wie im Beispiel die Umfangsgeschwindigkeit auf die reibungsbehaftete Maschine angepaßt, ergibt sich:

$Y_{Sch} = k_M \cdot Y_{Sch\infty}$ (Unterabschnitt 3.2.1.2)

$k_M \approx 1$ und $c_{1u,s} = -|c_{1u,s}|$ da entgegen zu u

$Y_{Sch} = u\cdot(c_{2u,s} + |c_{1u,s}|) = u\cdot(w_{2u,s} + |w_{1u,s}|)$

Wieder $|w_{1,s}| = w_{2,s}$ und $\beta_1 = \beta_2^*$ und deshalb $|w_{1u,s}| = w_{2u,s}$ Damit

$$\begin{aligned} Y_{Sch} &= u\cdot 2\cdot w_{2u,s} = u\cdot 2\cdot(c_{2u,s} - u)\\ &= (1/2)\cdot c_{2u}\cdot 2\cdot(c_{2u,s} - (1/2)\cdot c_{2u})\\ &= c_{2,s}\cdot\varphi_{Le}\cdot\cos\alpha_2\,(\cos\alpha_2\cdot c_{2,s} - \tfrac{1}{2}\cdot\varphi_{Le}\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2)\\ &= (1/2)\cdot c_{2,s}^2\cdot\cos^2\alpha_2\cdot\varphi_{Le}\cdot(2 - \varphi_{Le})\\ &= \Delta h_s\,\cos^2\alpha_2\cdot\varphi_{Le}\cdot(2 - \varphi_{Le}) \end{aligned}$$

$\underline{\eta_{Sch} = Y_{Sch}/\Delta h_s = \cos^2\alpha_2\cdot\varphi_{Le}\cdot(2 - \varphi_{Le})}$

Wieder mit vorhergehenden Werten:
$\eta_{Sch} = \cos^2 16^\circ\cdot 0{,}96\cdot(2 - 0{,}96) = 0{,}922$
Unterschied gegenüber vorigem Wert vernachlässigbar.

Dann wird:
$\underline{Y_{Sch}} = 0{,}922\cdot 398\,[\mathrm{kJ/kg}] = \underline{366{,}96\ \mathrm{kJ/kg} \approx 36{,}7\cdot 10^4\ \mathrm{m^2/s^2}}$

g) $\Delta Y = u\cdot(c_{2u} + c_{1u}) = u\,(w_{2u} + w_{1u})$ Mit

$c_{2u} = c_2\cdot\cos\alpha_2 = c_4\cdot\cos\alpha_2$
$= 856{,}5\cdot\cos 16^\circ\ [\mathrm{m/s}] = 823{,}32\ \mathrm{m/s}$

$w_{2u} = c_{2u} - u = 823{,}32 - 411{,}66 = 411{,}66\ \mathrm{m/s}$

$w_{1u} = w_1\cdot\cos\beta_1 = w_1\cdot\cos\beta_2^*$

$\beta_2^* = \beta_{2,s}^*$ und $w_1 = \varphi_{La}\cdot w_2$ wobei

Richtwerte für Laufschaufelbeiwert
$\varphi_{La} = 0{,}85\ldots0{,}95$ (Abschnitt 2.5.3.2)
$\varphi_{La} = 0{,}9$ angen. (Mittelwert)

$w_2 = w_{2u}/\cos\beta_2^* = 411{,}66/\cos 29{,}88^\circ\ [\mathrm{m/s}]$
$= 474{,}77\ \mathrm{m/s}$

$w_1 = 0{,}9\cdot 474{,}77\ [\mathrm{m/s}] = 427{,}29\ \mathrm{m/s}$

$w_{1u} = 427{,}29\cdot\cos 29{,}88^\circ\ [\mathrm{m/s}] = 370{,}49\ \mathrm{m/s}$

$\Delta Y = 411{,}66\cdot(411{,}66 + 370{,}49)\ [\mathrm{m^2/s^2}]$

$\underline{\Delta Y = 32{,}2\cdot 10^4\ \mathrm{m^2/s^2} = 322\ \mathrm{kJ/kg} = Y}$ da i = 1

h) $Z_{Sch} = Z_{Sch,Le} + Z_{Sch,La}$ Hierbei

Leitgitterverluste

$$Z_{Sch,Le} = \frac{c_{2,s}^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} = \frac{c_{2,s}^2}{2}\cdot(1 - \varphi_{Le}^2) = \Delta h_s\cdot(1 - \varphi_{Le}^2)$$

$Z_{Sch,Le} = 398\cdot(1 - 0{,}96^2)\ [\mathrm{kJ/kg}]$

$\underline{Z_{Sch,Le} = 31{,}20\ \mathrm{kJ/kg} = 3{,}12\cdot 10^4\ \mathrm{m^2/s^2}}$

Laufgitterverluste $Z_{Sch.La} = Z_{SR} + Z_{As}$ mit

Laufschaufelreibungsverluste

$Z_{SR} = w_2^2/2 - w_1^2/2 = (w_2^2/2)\cdot(1 - \varphi_{La}^2)$

$Z_{SR} = (474{,}77^2/2)\cdot(1 - 0{,}9^2)\ [\mathrm{m^2/s^2}]$

$Z_{SR} = 2{,}14\cdot 10^4\ \mathrm{m^2/s^2} = 21{,}4\ \mathrm{kJ/kg}$

Austrittsverlust:

$Z_{As} = c_1^2/2$

$c_1 = \sqrt{c_{1u}^2 + c_{1m}^2}$

$c_{1u} = w_{1u} - u = 370{,}49 - 411{,}66\ [\mathrm{m/s}]$
$= -41{,}17\ \mathrm{m/s}$ -Zeichen bedeutet: Entgegengesetzte Richtung zu der in Skizze (Bild 2) eingetragenen:

$c_{1m} = w_{1m} = w_1\cdot\sin\beta_1 = w_1\cdot\sin\beta_2^*$
$= 427{,}29\cdot\sin 29{,}88^\circ = 213{,}52\ \mathrm{m/s}$

$c_1 = \sqrt{(-41{,}17)^2 + 213{,}52^2} = 217{,}45\ \mathrm{m/s}$

$Z_{As} = 217{,}45^2/2 = 2{,}36\cdot 10^4\ \mathrm{m^2/s^2} = 23{,}6\ \mathrm{kJ/kg}$

Mit den Werten ergeben sich:

$\underline{Z_{Sch,La}} = 21{,}4 + 23{,}6 = \underline{45\ \mathrm{kJ/kg}}$

$\underline{Z_{Sch}} = Z_{Sch,Le} + Z_{Sch,La} = 31{,}2 + 45 = \underline{76{,}2\ \mathrm{kJ/kg}}$

i) $\eta_{Sch} = \eta_{Sch,Le}\cdot\eta_{Sch,La}$ Oder

$\underline{\eta_{Sch}} = \Delta Y/\Delta h_s = 321/398 = \underline{0{,}809}$ bzw.

$\eta_{Sch} = (\Delta h_s - Z_{Sch})/\Delta h_s = (398 - 76{,}2)/398 = 0{,}809$

$\eta_{Sch,Le} = (\Delta h_s - Z_{Sch,Le})/\Delta h_s = (398 - 31{,}2)/398$

$\underline{\eta_{Sch,Le} = 0{,}922}$

$$\eta_{Sch,La} = \frac{\Delta h_s - (Z_{Sch,Le} + Z_{Sch,La})}{\Delta h_s - Z_{Sch,Le}} = \frac{\Delta h_s - Z_{Sch}}{\Delta h_s - Z_{Sch,Le}}$$

$\underline{\eta_{Sch,La}} = (398 - 76{,}2)/(398 - 31{,}2) = \underline{0{,}877}$

Kontrollrechnung: $\eta_{Sch} = 0{,}922\cdot 0{,}877 = 0{,}809$

j) Laut Frage f)
$\eta_{Sch,s} = Y_{Sch}/\Delta h_s = \cos^2\alpha_2\cdot\varphi_{Le}\cdot(2 - \varphi_{Le})$

k)
$$\begin{aligned} \Delta Y &= u\cdot(c_{2u} + c_{1u}) = u\cdot(w_{2u} + w_{1u})\\ &= (1/2)\cdot c_{2u}\cdot(w_{2u} + \varphi_{La}\cdot w_{2u})\\ &= (1/2)\,\varphi_{Le}\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2\cdot w_{2u}\cdot(1 + \varphi_{La})\\ &= (1/2)\cdot\varphi_{Le}\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2\cdot(c_{2u} - u)\cdot(1 + \varphi_{La})\\ &= (1/2)\cdot\varphi_{Le}\cdot c_{2,s}\cdot\cos\alpha_2\cdot c_{2u,s}\cdot(\varphi_{Le} - \varphi_{Le}/2)\cdot(1 + \varphi_{La})\\ &= (1/4)\cdot\varphi_{Le}^2\cdot\cos^2\alpha_2\cdot c_{2,s}^2\cdot(1 + \varphi_{La}) \end{aligned}$$

Mit $c_{2,s}^2/2 = \Delta h_s$ wird

$\Delta Y = (1/2)\cdot\Delta h_s\cdot\cos^2\alpha_2\cdot\varphi_{Le}\cdot(1 + \varphi_{La})$ Hieraus

$\eta_{Sch} = \Delta Y/\Delta h_s = (1/2)\cdot\cos^2\alpha_2\cdot\varphi_{Le}^2\cdot(1 + \varphi_{La})$

Mit den vorherigen Werten ergibt sich:

$\underline{\eta_{Sch}} = (1/2)\cdot\cos^2 16^\circ\cdot 0{,}96^2\cdot(1 + 0{,}9) = 0{,}809 \approx \underline{0{,}81}$

Mit $\Delta h_s = Y_{Sch}/\left[\cos^2\alpha_2\cdot\varphi_{Le}\cdot(2-\varphi_{Le})\right]$ nach Frage f)

$$\eta_{Sch,La} = \frac{\Delta Y}{Y_{Sch}} = \frac{\varphi_{Le}\cdot(1 + \varphi_{La})}{4\cdot(1 - 0{,}5\cdot\varphi_{Le})} = \frac{\varphi_{Le}\cdot(1 + \varphi_{La})}{2\cdot(2 - \varphi_{Le})}$$

$$\eta_{Sch,La} = \frac{0{,}96\cdot(1 + 0{,}9)}{2\cdot(2 - 0{,}96)} = 0{,}877$$ wie zuvor bei Frage i

l) Aus $u = D_{2,(m)}\cdot\pi\cdot n$

$$\underline{D_{2,(m)}} = \frac{u}{\pi\cdot n} = \frac{411{,}66}{\pi\cdot 7200/60}\left[\frac{m/s}{1/s}\right] = \underline{1{,}092\ m}$$

m) $\dot{m}\cdot v_2 = \dot{V}_2 = A_{2m}\cdot c_{2m}$ Hieraus

$A_{2m} = \dot{m}\cdot v_2/c_{2m}$ mit

$v_2 \approx v_a = 0{,}72\ m^3/kg$ (aus (h,s)-Diagramm)

$c_{2m} = c_2\cdot\sin\alpha_2 = 856{,}5\cdot\sin 16^\circ = 236{,}08\ m/s$

$$A_{2m} = \frac{27{,}78\cdot 0{,}73}{236{,}08}\left[\frac{kg/s\cdot m^3/kg}{m/s}\right] = 0{,}0859\ m^2$$

Andererseits gilt $A_{2m} = D_{2,(m)}\cdot\pi\cdot b_2\cdot 1/\tau_2$

Hieraus mit geschätzt $\tau_2 = 1{,}1$

$$\underline{b_2} = \frac{A_{2m}\cdot\tau_2}{D_{2,(m)}\cdot\pi} = \frac{0{,}0859\ 1{,}1}{1{,}092\cdot\pi}\left[\frac{m^2}{m}\right] = 0{,}0275\ m = \underline{27{,}5\ mm}$$