Ü 66

a) Kreisprozeß

Zustand 0, Diffusor-Eintritt (Zuströmung):
Umgebungszustand in z = 4 km Höhe nach Tafel 10 (Normatmosphäre):

$p_0 = 0{,}6166$ bar, $t_0 = -10{,}95$ °C, $\varrho_0 = 0{,}819$ kg/m³ und $a_0 = 326$ m/s

MACH-Zahl: Mit $c_0 = c_{Flug} = 620$ km/h $= 172{,}2$ m/s

$Ma_0 = c_0/a_0 = 172{,}2/326 = 0{,}528 \approx \underline{0{,}53}$

Enthalpiewert der Zuströmgeschwindigkeit:

$\Delta h_{0,s} = c_0^2/2 = 172{,}2^2/2 \; [m^2/s^2] = 14826 \; m^2/s^2$

$\Delta h_{0,s} = 14{,}8$ kJ/kg

Zustand 1, Kompressor-Eintritt:
Angen. verlustfreier vollständiger Aufstau, also Reibung und Verdichtereinströmgeschwindigkeit vernachlässigt.
Aus Isentropen-Enthalpiedifferenz:

$$\Delta h_{0-1,s} = \frac{\varkappa}{\varkappa-1}\cdot R\cdot T_0\cdot\left[\Pi_{0-1,s}^{(\varkappa-1)/\varkappa} - 1\right] \qquad \text{Umgestellt}$$

$$\Pi_{0-1,s} = \left[1 + \frac{\Delta h_{0-1,s}}{R\cdot T_0}\cdot\frac{\varkappa-1}{\varkappa}\right]^{\varkappa/(\varkappa-1)}$$

$$\Pi_{0-1,s} = \left[1 + \frac{14826}{287\cdot 262}\cdot\frac{1{,}4-1}{1{,}4}\right]^{1{,}4/(1{,}4-1)} \quad [-]$$

$\Pi_{0-1,s} = 1{,}21$ Hieraus

$\underline{p_1} = \Pi_{0-1,s}\cdot p_0 = 1{,}21\cdot 0{,}6166 \; [bar] = \underline{0{,}746 \text{ bar}}$

$$T_1 = T_0\cdot\Pi_{0-1,s}^{(\varkappa-1)/\varkappa} = 262\cdot 1{,}21^{(1{,}4-1)/1{,}4} \; [K]$$

$\underline{T_1 = 276{,}7 \text{ K}}$

Zustand 2, Kompressoraustritt, zugleich Brennkammereintritt:

$\underline{p_2} = \Pi_K\cdot p_1 = 6{,}2\cdot 0{,}746 \; [bar] = \underline{4{,}63 \text{ bar}}$

$$\Delta T_K = T_2 - T_1 = \eta_{K,s}^{-1}\cdot T_1\cdot\left[\Pi_K^{(\varkappa-1)/\varkappa} - 1\right] \qquad (Erg. 13)$$

Mit geschätzt $\eta_{K,s} = 0{,}86$ (Unterabschnitt 11.4.4)

$$\Delta T_K = 0{,}86^{-1}\cdot 276{,}7\cdot\left[6{,}2^{(1{,}4-1)/1{,}4} - 1\right] \; [K]$$

$\Delta T_K = 220 \text{ K} = T_2 - T_1$ Hieraus

$\underline{T_2} = \Delta T_K + T_1 = 220 + 276{,}7 \; [K] = \underline{496{,}7 \text{ K}}$

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

$$\Delta h_{K,s} = \frac{1{,}4}{1{,}4-1}\cdot 287\cdot 276{,}7\cdot\left[6{,}2^{(1{,}4-1)/1{,}4} - 1\right]\left[\frac{J}{kg\cdot K}\cdot K\right]$$

$\Delta h_{K,s} = 190174 \text{ J/kg} \approx 190{,}2 \text{ kJ/kg}$

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

$\underline{w_{t,K}} = 190{,}2/0{,}86 \text{ kJ/kg} = \underline{221{,}1 \text{ kJ/kg}}$

Zustand 3, Brennkammeraustritt, zugleich Turbineneintritt:

Geschätzt: Druckverlust in Brennkammer:

$\Delta p_{BK} = 0{,}04\cdot p_{BK}$ (Unterabschnitt 11.4.4)

$p_3 = p_2 - \Delta p_{BK}$ mit $\Delta p_{BK} = 0{,}04\cdot p_2$

$\underline{p_3} = 0{,}96\cdot p_2 = 0{,}96\cdot 4{,}63 \; [bar] = \underline{4{,}44 \text{ bar}}$

$\underline{t_3 = 850 \text{ °C}} \longrightarrow T_3 = 1123$ K (lt. Aufgabe)

Wärmezufuhr in Brennkammer gemäß

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

$$q_{BK} = 996\cdot(1123-496{,}7) + 0{,}11\cdot(1123^2-496{,}7^2) \; [J/kg]$$

$\underline{q_{BK}} = 735380{,}8 \text{ J/kg} \approx \underline{735{,}4 \text{ kJ/kg}}$

Zustand 4, Turbinenaustritt, zugleich Schubdüsen-Eintritt und

Zustand 5, Schubdüsen-Austritt:

$\underline{p_5} = p_0 = \underline{0{,}6166 \text{ bar}}$

Schubdüsen-Enthalpiegefälle:

$\Delta h_{Dü} = c_5^2/2 - c_4^2/2 = 280^2/2 - 80^2/2 \; [m^2/s^2]$

$\Delta h_{Dü} = 36000 \; m^2/s^2 = 36$ kJ/kg

$\Delta h_{Dü,s} = \Delta h_{Dü}/\eta_{Dü,s} = 36/0{,}9 = 40$ kJ/kg

Bei angen. $\eta_{Dü,s} = \eta_{T,s} = \eta_{E,s} = 0{,}9$ (Index E...Entspannung) aus Erg. 13 mit

$\Pi_E = p_3/p_5 = 4{,}44/0{,}6166 = 7{,}20$

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

$$\Delta T_E = T_3 - T_5 = \eta_{E,s}\cdot T_3\cdot\left[1 - (1/\Pi_E)^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right]$$

$$\Delta T_E = 0{,}9\cdot 1123\cdot\left[1 - (1/7{,}2)^{(1{,}37-1)/1{,}37}\right] \; [K]$$

$\Delta T_E = 417{,}7 \text{ K} \approx 418$ K

$\underline{T_5} = T_3 - \Delta T_E = 1123 - 418 \; [K] = \underline{705 \text{ K}}$ (sehr hoch!)

$\Delta h_E = \eta_{E,s}\cdot\Delta h_{E,s}$ mit

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

$$\Delta h_{E,s} = \frac{1{,}37}{1{,}37-1}\cdot 277\cdot 1123\cdot\left[1 - (1/7{,}2)^{(1{,}37-1)/1{,}37}\right]\left[\frac{J}{kg}\right]$$

$\Delta h_{E,s} = 475975{,}7 \text{ J/kg} \approx 476$ kJ/kg

Turbinen-Isentropen-Enthalpiegefälle

$\underline{\Delta h_{T,s}} = \Delta h_{E,s} - \Delta h_{Dü,s} = 476 - 40 \; [kJ/kg] = \underline{436 \text{ kJ/kg}}$

$w_{t,T} = \Delta h_T = \eta_{T,s}\cdot\Delta h_{T,s} = 0{,}9\cdot 436 \; [kJ/kg] = 392{,}4$ kJ/kg

Andererseits gilt

$$\Delta h_{T,s} = \frac{\varkappa}{\varkappa-1}\cdot R\cdot T_3\cdot\left[1 - (1/\Pi_T)^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right] \qquad \text{Hieraus}$$

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

$$1/\Pi_T = \left[1 - \frac{436000}{277\cdot 1123}\cdot\frac{1{,}37-1}{1{,}37}\right]^{1{,}37/(1{,}37-1)}$$

$1/\Pi_T = 0{,}172 \longrightarrow \underline{\Pi_T = 5{,}82} = p_3/p_4$ Hieraus

$\underline{p_4} = p_3/\Pi_T = 4{,}44/5{,}82 \; [bar] = 0{,}7629 \text{ bar} \approx \underline{0{,}76 \text{ bar}}$

Nach Erg. 13:

$$\Delta T_T = T_3 - T_4 = \eta_{T,s}\cdot T_3\cdot\left[1 - (1/\Pi_T)^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right]$$

$\Delta T_T = 0{,}9 \cdot 1123 \cdot [1 - (1/5{,}82)^{(1{,}37-1)/1{,}37}]$ [K]

$\Delta T_T = 382{,}6$ K ≈ 383 K $= T_3 - T_4$ Hieraus

$\underline{T_4} = T_3 - \Delta T_T = 1123 - 383$ [K] $= \underline{740 \text{ K}}$

Kontrollrechnung:

$\pi_{Dü} = \pi_E/\pi_T = 7{,}2/5{,}82 = 1{,}23$

$\underline{p_5} = p_4/\pi_{Dü} = 0{,}7629/1{,}23$ [bar] $= \underline{0{,}6166 \text{ bar}}$

Gemäß Erg. 13 gilt:

$\Delta T_{Dü} = T_4 - T_5 = \eta_{Dü,s} \cdot T_4 \cdot [1 - (1/\pi_{Dü})^{(\varkappa-1)/\varkappa}]$

$\Delta T_{Dü} = 0{,}9 \cdot 740 \cdot [1 - (1/1{,}23)^{(1{,}37-1)/1{,}37}]$ [K]

$\Delta T_{Dü} = 36{,}2$ K ≈ 36 K $= T_4 - T_5$ Hieraus

$\underline{T_5} = T_4 - \Delta T_{Dü} = 740 - 36$ [K] $= \underline{704 \text{ K}}$

$\Delta h_{Dü,s} = \frac{\varkappa}{\varkappa-1} \cdot R \cdot T_4 \cdot [1 - (1/\pi_{Dü})^{(\varkappa-1)/\varkappa}]$

$\Delta h_{Dü,s} = \frac{1{,}37}{1{,}37-1} \cdot 277 \cdot 740 \cdot [1 - (1/1{,}23)^{(1{,}37-1)/1{,}37}]$ $\left[\frac{J}{kg}\right]$

$\underline{\Delta h_{Dü,s}} = 41267$ J/kg $\approx \underline{41 \text{ kJ/kg}}$

Alle Werte etwa wie zuvor. Abweichungen durch Rechenungenauigkeiten bedingt.

b) Luftdurchsatz:

Für den Luftschraubenantrieb (Index LS) verfügbare spez. Energie:

$w_{t,LS} = w_{t,T} - w_{t,K} = 392{,}4 - 221{,}1$ [kJ/kg]

$w_{t,LS} = 171{,}3$ kJ/kg

Aus $P_{LS} = \dot{m}_{Lu} \cdot w_{t,LS}$

$\dot{m}_{Lu} = P_{LS}/w_{t,LS} = 1700/171{,}3$ [kW/(kJ/kg)]

$\underline{\dot{m}_{Lu}} = 9{,}94$ kg/s $\approx \underline{10 \text{ kg/s}}$

c) Schub (Unterabschnitt 11.4.6.3):

$F_S = (P_{LS} \cdot \eta_{LS})/c_{Flug} + \dot{m}_{Lu} \cdot (c_{Dü} - c_{Flug})$

Mit geschätzt: Fluggeschwindigkeit $c_{Flug} = 620$ km/h $= 172{,}22$ m/s und Luftschrauben-Vortriebs-Wirkungsgrad $\eta_{LS} = 0{,}75$ wird

$F_S = \frac{1700000 \cdot 0{,}75}{172{,}22} \left[\frac{J}{m/s}\right] + 9{,}94 \cdot (280 - 80) \left[\frac{kg}{s} \cdot \frac{m}{s}\right]$

$\underline{F_S} = 9391{,}2$ N $\approx \underline{9{,}4 \text{ kN}}$

Spezifischer Schub:

$f_S = F_S/\dot{m}_{Lu} = 9391{,}2/9{,}94$ [N/(kg/s)]

$f_S = 944{,}8$ N/(kg/s) ≈ 945 m/s

d) Äquivalenzleistung, entspricht der Vortriebsleistung

$P_{äqui} = P_{Vor} = F_S \cdot c_{Flug}/\eta_{LS}$

$P_{äqui} = 9391{,}2 \cdot 172{,}22/0{,}75$ [N·m/s]

$P_{äqui} = 2{,}156 \cdot 10^6$ W $= 2{,}2$ MW

Hinweis: Die Äquivalenzleistung beinhaltet Luftschrauben- und Stahlleistung.

e) Kraftstoffverbrauch und Kraftstoffanteil:

$\dot{m}_{Br} = \dot{Q}_{BK}/(\eta_{BK} \cdot H_u)$ Mit

$H_u = 42 \cdot 10^6$ J/kg (Tab. 11-9) und geschätzt

$\eta_{BK} = 0{,}96$ lt. Unterabschnitt 11.4.4 sowie

$\dot{Q}_{BK} = q_{BK} \cdot \dot{m}_{Lu} = 735{,}4 \cdot 9{,}94$ [kJ/kg·kg/s]

$\dot{Q}_{BK} = 7309{,}88$ kJ/s ≈ 7310 kW wird

$\underline{\dot{m}_{Br}} = \frac{7{,}31 \cdot 10^6}{0{,}96 \cdot 42 \cdot 10^6} \left[\frac{J/s}{J/kg}\right] = \underline{0{,}18 \text{ kg/s}}$

$\dot{m}_{Br}/\dot{m}_{Lu} = 0{,}18/9{,}94 = 0{,}018 = 0{,}02 \mathrel{\hat{=}} 2\,\%$

f) Luftüberschußzahl λ

$\lambda = q_{BK,th}/q_{BK}$ Hierbei

nach Unterabschnitt 11.4.4 $m_{Lu,0} = 14{,}5$ kgLu/kgBr

$q_{BK,th} = \frac{H_u}{m_{Lu,0}} = \frac{42000}{14{,}5} \left[\frac{kJ/kgBr}{kgLu/kgBr}\right] = 2897$ kJ/kgLu

$\lambda = 2897/735{,}4 = 3{,}94 \approx 4$

g) Triebwerkswirkungsgrad (Index TW):

$\eta_{TW} = \frac{P_{äqui}}{\dot{Q}_{Br}} = \frac{P_{äqui}}{\dot{Q}_{BK}/\eta_{BK}} = \eta_{BK} \cdot \frac{P_{äqui}}{\dot{Q}_{BK}}$

$\underline{\eta_{TW}} = 0{,}96 \cdot 2156/7310 = \underline{0{,}28}$