Ü 65 Die Luftkompression erfolgt in zwei Schritten. Zum einen durch Staudruckaufbau im Zuströmdiffusor und zum anderen im Verdichterteil der Maschine. Auch die Expansion zerfällt in zwei Teile, erstens im Turbinenbereich des Triebwerkes und zweitens in der Schubdüse. Die Turbinenleistung ist dabei gerade so groß, wie zum Antrieb des Kompressors erforderlich. Das restliche Entspannungsgefälle wird zur Vortriebserzeugung in der Düse in kinetische Energie und damit Schub umgesetzt.

a) Kreisprozeß

Zustand 0 (Eintritt Zuströmdiffusor):

Das ist die Normatmosphäre in z = 10 km Höhe nach Tafel 10 $p_0 = 0{,}2650$ bar, $t_0 = -49{,}85\ ^\circ C$, zugehörig $\varrho_0 = 0{,}414$ kg/m^3 und $a_0 = 300$ m/s.

Zuströmgeschwindigkeit (relativ zum Triebwerk): Ist Fluggeschwindigkeit c_0

$$\underline{c_0} = Ma_0 \cdot a_0 = 2 \cdot 300\ [m/s] = \underline{600\ m/s}$$

Zustand 1 (Kompressor-Eintritt):

Enthalpiewert des vollständigen verlustlosen Aufstaus

$$\Delta h_{0-1,s} = c_0^2/2 = 600^2/2\ [m^2/s^2] = 180000\ m^2/s^2 = 180\ kJ/kg$$

Hierzu aus der Enthalpiebeziehung der Isentropen

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

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

$$\underline{\pi_{0-1,s}} = \left[1 + \frac{180000}{287 \cdot 223{,}15} \cdot \frac{1{,}4-1}{1{,}4}\right]^{1{,}4/(1{,}4-1)} = \underline{7{,}87}$$

$$p_{1,s} = \pi_{0-1,s} \cdot p_0 = 7{,}87 \cdot 0{,}2650\ [bar] = 2{,}086\ bar$$

Infolge Reibung und vor allem wegen verbleibender Verdichtereinströmgeschwindigkeit beträgt der tatsächliche Druckaufbau nur 82 %, also

$$\pi_{0-1} = f_p \cdot \pi_{0-1,s} = 0{,}82 \cdot 7{,}87\ [bar] = 6{,}45\ bar$$

$$\underline{p_1} = \pi_{0-1} \cdot p_0 = 6{,}45 \cdot 0{,}2650\ [bar] = \underline{1{,}71\ bar}$$

Zugehörige Temperatur näherungsweise aus Isentropenbeziehung:

$$\underline{T_1} = T_0 \cdot \pi_{0-1}^{(\varkappa-1)/\varkappa} = 223{,}15 \cdot 6{,}45^{(1{,}4-1)/1{,}4}\ [K] = \underline{380\ K}$$

Zustand 2 (Austritt Verdichter, zugleich Eintritt Brennkammer):

$$\underline{p_2} = \pi_K \cdot p_1 = 7{,}2 \cdot 1{,}71\ [bar] = \underline{12{,}31\ bar}$$

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

$$\Delta T_K = 0{,}86^{-1} \cdot 380 \cdot \left[7{,}2^{(1{,}4-1)/1{,}4} - 1\right]\ [K]$$

$$\Delta T_K = 334{,}8\ K \approx 335\ K$$

$$\underline{T_2} = T_1 + \Delta T_K = 380 + 334{,}8\ [K] = \underline{715\ K}$$

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

$$\Delta h_{K,s} = \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \cdot 287 \cdot 380 \cdot \left[7{,}2^{(1{,}4-1)/1{,}4} - 1\right]\ [J/(kg \cdot K) \cdot K]$$

$$\Delta h_{K,s} = 289233\ J/kg \approx 289\ kJ/kg$$

$$w_{t,K} = w_{t,K,s}/\eta_{K,s} = \Delta h_{K,s}/\eta_{K,s} = 289/0{,}86\ [kJ/kg]$$

$$\underline{w_{t,K} = 336\ kJ/kg}$$

Zustand 3 (Austritt Brennkammer, zugleich Eintritt Turbine):

$$p_3 = p_2 - \Delta p_{BK} \qquad \text{mit } \Delta p_{BK} = 0{,}05 \cdot p_2$$

$$\underline{p_3} = 0{,}95 \cdot p_2 = 0{,}95 \cdot 12{,}31\ [bar] = \underline{11{,}7\ bar}$$

$$\underline{T_3} = 273 + t_3 = 273 + 1100\ [K] = \underline{1373\ K}$$

Wärmezufuhr in der Brennkammer nach Erg. 13):

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

$$q_{BK} = 996 \cdot (1373-715) + 0{,}11 \cdot (1373^2 - 715^2)\ [J/kg]$$

$$\underline{q_{BK}} = 806497\ J/kg \approx \underline{806{,}5\ kJ/kg}$$

Zustand 4 (Turbinenaustritt, zugleich Schubdüseneintritt):

Es gilt $w_{t,T} = w_{t,K} = 336$ kJ/kg

$$w_{t,T,s} = w_{t,T}/\eta_{T,s} = 336/0{,}88 \approx 382\ kJ/kg = \Delta h_{T,s}$$

Hierzu aus Isentropen-Enthalpiegefälle mit Rauchgas-Stoffwerten nach Unterabschnitt 11.4.4:

$\varkappa = 1{,}37$ und $R = 277$ J/(kg K)

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

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

$$1/\pi_T = \left[1 - \frac{382000}{277 \cdot 1373} \cdot \frac{1{,}37-1}{1{,}37}\right]^{(1{,}37/(1{,}37-1)}$$

$$1/\pi_T = 0{,}3098 \longrightarrow \underline{\pi_T = 3{,}23}$$

$$\underline{p_4} = p_3/\pi_T = 11{,}7/3{,}23\ [bar] = \underline{3{,}62\ bar}$$

$$\Delta T_T = T_3 - T_4 = \eta_{T,s} \cdot T_3 \cdot \left[1 - (1/\pi_T)^{(\varkappa-1)/\varkappa}\right] \quad \text{(Ab 17.13)}$$

$$\Delta T_T = 0{,}88 \cdot 1373 \cdot \left[1 - (1/3{,}23)^{(1{,}37-1)/1{,}37}\right]\ [K]$$

$$\Delta T_T = 327{,}94\ K \approx 328\ K$$

$$T_4 = T_3 - \Delta T_T = 1373 - 328\ [K] = 1045\ K$$

Zustand 5 (Austritt Schubdüse):

$$\underline{p_5} = p_0 = \underline{0{,}2650\ bar}$$

$$\pi_{Dü} = p_4/p_5 = 3{,}62/0{,}265 = 13{,}66$$

$1/\pi_{Dü} = 0{,}73 < p_L$ (LAVAL-Druckverhältnis)

Deshalb LAVAL-Düse notwendig (Unterabschnitt 7.3.3.1)

Gemäß Ab. 17.13:

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

$$\Delta T_{Dü} = 0{,}92 \cdot 1045 \cdot \left[1 - (1/13{,}66)^{(1{,}37-1)/1{,}37}\right]\ [K]$$

$$\Delta T_{Dü} = 486{,}9\ K \approx 487\ K$$

$$\underline{T_5} = T_4 - \Delta T_{Dü} = 1045 - 487\ [K] = \underline{558\ K}$$

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

$$\Delta h_{Dü,s} = \frac{1,37}{1,37-1} \cdot 277 \cdot 1045 \cdot \left[1 - (1/13,66)^{(1,37-1)/1,37}\right]$$

$$\Delta h_{Dü,s} = 542797 \text{ J/kg} \approx 543 \text{ kJ/kg}$$

$$\underline{\Delta h_{Dü}} = \eta_{Dü} \cdot \Delta h_{Dü,s} = 0,92 \cdot 543 = \underline{500 \text{ kJ/kg}}$$

Andererseits nach Energiegleichung:

$\Delta h_{Dü} = c_5^2/2 - c_4^2/2$ Hieraus mit angen. $c_4 = 100$ m/s

$$c_5 = \sqrt{2 \cdot \Delta h_{Dü} + c_4^2} = \sqrt{2 \cdot 500000 + 100^2} \left[\sqrt{m^2/s^2}\right]$$

$$\underline{c_5 = 1005 \text{ m/s}}$$

Bei c_4 vernachlässigt wäre $c_5 = 1000$ m/s. Der Unterschied ist somit bedeutungslos.

b) Luftdurchsatz:

Aus Gl. (11-29):

$$\dot{m}_G = \frac{F_S}{c_{Dü} - c_{Flug}} = \frac{38000}{1005 - 600} \left[\frac{N}{m/s}\right] = 93,83 \text{ kg/s}$$

$$\underline{\dot{m}_{Lu} \approx \dot{m}_G \approx 94 \text{ kg/s}}$$

c) Kraftstoffverbrauch und Kraftstoffanteil:

$$\dot{m}_{Br} = \dot{m}_{Br,th}/\eta_{BK} = (1/\eta_{BK}) \cdot (\dot{Q}_{BK}/H_u)$$

Mit $H_u = 42000$ kJ/kg (Tab. 11-9) und

$$\dot{Q}_{BK} = q_{BK} \cdot \dot{m}_{Lu} = 806,5 \cdot 94 \; [\text{kJ/kg} \cdot \text{kg/s}]$$

$\dot{Q}_{BK} = 75811$ kJ/kg $\approx 75,8$ MW wird

$$\underline{\dot{m}_{Br}} = \frac{1}{0,97} \cdot \frac{75811}{42000} \left[\frac{\text{kJ/s}}{\text{kJ/kg}}\right] = \underline{1,86 \text{ kg/s}}$$

$$\underline{\dot{m}_{Br}/\dot{m}_{Lu}} = 1,86/94 = 0,0198 \approx 0,02 \mathrel{\hat{=}} \underline{2 \%}$$

d) Schubleistung:

$$P_S = F_S \cdot c_{Flug} = 38000 \cdot 600 \; [N \cdot m/s] \approx 22,8 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$\underline{P_S = 22,8 \text{ MW}}$$

Düsenleistung:

$$P_{Dü} = \eta_{Dü} \cdot P_{Dü,th} = \eta_{Dü,s} \cdot P_{Dü,s}$$

$$P_{Dü,s} = \Delta h_{Dü,s} \cdot \dot{m}_G \approx \Delta h_{Dü,s} \cdot \dot{m}_{Lu}$$

$$P_{Dü,s} = 543 \cdot 92 \; [\text{kJ/kg} \cdot \text{kg/s}] = 49956 \text{ kJ/s}$$

$$P_{Dü,s} = 49956 \text{ kW} \approx 50 \text{ MW}$$

$$\underline{P_{Dü}} = 0,92 \cdot 50 \; [\text{MW}] = \underline{46 \text{ MW}}$$

Vortriebsleistung:

$$P_{vor} \approx \dot{m}_{Lu} \cdot (c_{Dü}^2 - c_{Flug}^2)/2$$

$$P_{vor} \approx 94 \cdot (1005^2 - 600^2)/2 \; [\text{kg/s} \cdot m^2/s^2]$$

$$\underline{P_{vor}} \approx 30,55 \cdot 10^6 \text{ W} = \underline{30,6 \text{ MW}}$$

e) Schubwirkungsgrad:

Nach Gl. (11-31):

$$\underline{\eta_{S,th}} = \frac{2}{1 + c_{Dü}/c_{Flug}} = \frac{2}{1 + 1005/600} = \underline{0,75} \quad \text{Oder}$$

$$\eta_{S,th} = P_S/P_{vor} = 22,8/30,6 = 0,75$$

f) Flugwirkungsgrad:

$$\eta_{Fl} = P_S/P_{Br} = P_S/\dot{Q}_{Br} = 22,8/75,8 = 0,30$$

Triebwerkswirkungsgrad:

$$\underline{\eta_{TW}} = \eta_{Fl}/\eta_{S,th} = 0,3/0,75 = \underline{0,4} \quad \text{Oder}$$

$$\eta_{TW} = P_{vor}/\dot{Q}_{Br} = 30,6/75,8 = 0,4$$

g) Standschub:

Nach Gl. (11-30) bei $c_{Flug} = 0$

$$F_{S,St} = \dot{m}_G \cdot c_{Dü} \approx \dot{m}_{Lu} \cdot c_{Dü} = 94 \cdot 1005 \; [(\text{kg/s}) \cdot (\text{m/s})]$$

$$\underline{F_{S,St} = 94470 \text{ N} \approx 94,5 \text{ MN}}$$

Etwa das 2,5-fache des Schubs im Flug bei Ma = 2.