

Turboflugtriebwerke Übungen Checkliste

|           |       |                      |   |
|-----------|-------|----------------------|---|
| Beispiel  | 2     |                      | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| Beispiel  | 3a, 3 |                      | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| Beispiele | 5     |                      | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 6 Teil 1, 6 Teil 2   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 7                    | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 8                    | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 9                    | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 10                   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 11 Teil 1, 11 Teil 2 | <input type="checkbox"/>  |
| "         | "     | 13                   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 15                   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 17                   | <input type="checkbox"/>  |
| "         | "     | 18                   | <input type="checkbox"/>  |
| "         | "     | 21                   | <input type="checkbox"/>  |
| "         | "     | 22                   | <input type="checkbox"/>  |
| "         | "     | 23                   | <input type="checkbox"/>  |
| "         | "     | 25                   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 26                   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 27                   | <input type="checkbox"/> <del><input checked="" type="checkbox"/></del> |
| "         | "     | 53                   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |
| "         | "     | 54                   | <input checked="" type="checkbox"/>                                     |

~~44, 44, 27, 55~~

*Handwritten scribble*

Danach erst die ganzen anderen Beispiele rechnen!

# Turboflughtriebwerke - Beispiel 2: Ausflussfunktion

7

1) Isentrope Zustandsänderung, Eindimensionaler Strömungsvorgang

$$T_{t0} = T_0 + \frac{c^2}{2c_p} \rightarrow \frac{T_{t0}}{T_0} = 1 + \frac{c^2}{2c_p T_0} \quad \text{I}$$

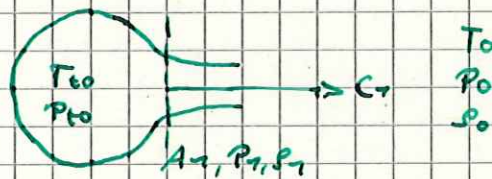
$$\frac{P_{t0}}{P_0} = \left(\frac{T_{t0}}{T_0}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\frac{T_{t0}}{T_0} = \left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{II}$$

I und II gleich setzen

$$1 + \frac{c^2}{2c_p T_0} = \left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$c = \sqrt{\left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] 2c_p T_0}$$



2) Beim idealen Gas gilt:  $P_0 = \rho_0 R T_0 \rightarrow R = \frac{P_0}{\rho_0 T_0}$

außerdem gilt:  $c_p = \frac{k}{k-1} R$

$$\dot{m} = A_1 \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] 2 \frac{k}{k-1} R T_0}$$

$$\dot{m} = A_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] 2 \frac{k}{k-1} P_0 \rho_0}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}}$$

$$\dot{m} = A_1 \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] \sqrt{2} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \sqrt{\frac{P_0^2}{R T_0}}}$$

$P_{t0} = P_0$ , aber irgendwas hier ist trotzdem verbleibt...

$$3) \gamma = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\dot{m} \sqrt{R T_0}}{A P_{t0}} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right]$$

$$4) Q = \frac{\dot{m} \sqrt{R T_0}}{A P_{t0}} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] \sqrt{2}$$

$$5) Q_A = \frac{\dot{m} \sqrt{R T_0}}{P_{t0}} = A \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] \sqrt{2}$$

$$6) \dot{m}_{red} = \frac{\dot{m} \sqrt{T_0}}{P_{t0}} = \frac{A}{\sqrt{R}} \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{k}{k-1}} \left[\left(\frac{P_{t0}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] \sqrt{2}$$

# Turboflurgtriebe - Beispiel 3: Einlauf

1)  $74,2'' = 1,901 \text{ m}$  ;  $26,4'' = 0,671 \text{ m}$

$A_1 = \pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 = 3,099 \text{ m}^2$

$A_2 = \pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{D_3}{2}\right)^2 = 3,265 \text{ m}^2$

2)  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 6250 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

$\gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\dot{m}_1^2 \cdot R \cdot T_{e1}}{A_1 \cdot P_{e1}}}} = 0,467$  mit  $T_{e1} = T_{e0} = T_0$   
 $P_{e1} = P_{e0} = P_0$

Tabelle liefert:

$\frac{P_{e1}}{P_1} = 1,888$

Isentroperbeziehung liefert:

$\frac{P_{e1}}{P_1} = \left(1 + \frac{\gamma_1^2}{2} \text{Ma}_1^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow \text{Ma}_1 = 0,7754$

Gleiches Vorgehen für  $\text{Ma}_2$ , es gilt  $T_{e2} = T_{e1}$  und  $P_{e2} = P_{e0} \cdot \frac{P_{e1}}{P_0}$

~~$\text{Ma}_1 = 0,8852$~~   $\text{Ma}_2 = 0,6926$

~~Isentroperbeziehung Verdichter  $P_{e0} = P_{e1} \cdot \left(\frac{T_{e0}}{T_{e1}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$~~

3) Isentrope Zustandsänderung:  $\frac{P_{e0}}{P_{e1}} = \left(\frac{T_{e0}}{T_{e1}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$

$T_{e1} = 302,7 \text{ K} = T_{e0}$

Werkleistung Verdichter:  $P_V = \dot{m}_1 \cdot c_p \cdot T_{e1} \cdot \left[\left(\frac{P_{e0}}{P_{e1}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1\right]$

$P_V = 337,7 \text{ kW}$  Leicht anders wie in Musterlösung, aber stimmt glaub ich trotzdem...?

4) Für Ähnlichkeit gilt: gleiche Machzahl

~~$\dot{m} \propto A \cdot D^2$~~

Durchmesser im Modell nur  $\frac{7}{5} = 1,4$

$\dot{m}_{1,2} = \lambda^2 \dot{m}_2 = 27,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

$P_V \propto \dot{m} \cdot A \cdot D^2$

$P_{V,Mod} = \lambda^2 P_V = 13,27 \text{ kW}$

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 5: Massenstromparameter

51

1)  $k = 7,3 = \text{const}$      $R = \text{const}$

$P_{t7} = P_{t9}$      $\frac{P_{t9}}{P_9}, Q_9$ , für  $M_{a9} = \{0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; \dots\}$

$\frac{P_{t9}}{P_9} = \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M_{a9}^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} = \{7,427; 7,488; 7,562; 7,644; 7,734; 7,832\}$

$Q_9 = \frac{m_9 \sqrt{R T_{t9}}}{A_9 P_{t9}} \stackrel{2,76}{=} \sqrt{2} \left( \frac{P_{t9}}{P_9} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{t9}}{P_9} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$

$Q_9 = \{0,6269; 0,6419; 0,6537; 0,6672; 0,6658; 0,6673\}$

2) Reibung verursacht einen Totaldruckverlust  $P_{t7}^* < P_{t7}$  bei

gleichbleibender  $T_t$ , sowie  $k, R$  und  $c_p$

Einsetzen in Massenstromparameter liefert

$Q_7^* > Q_7$

$Q$  ist in Bereich  $0 \leq M_{a9} \leq 1$  mit zunehmender Mach-Zahl streng

monoton steigend  $\rightarrow M_{a7}^* > M_{a7}$

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 6: Fan

$$\eta) m_{v, is} = \frac{T_{e, aus, is} - T_{e, ein}}{T_{e, aus} - T_{e, ein}} = \frac{T_{e, is} - T_{e2}}{T_{e3} - T_{e2}}$$

$$T_0 = T_{e0} = T_{e2} = 288,15 \text{ K}$$

$$T_{e3} = T_{e2} + \Delta T = 358,2 \text{ K}$$

$$T_{e3, is} = T_{e2} \Pi_v^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \cancel{410,0} 345,7 \text{ K}$$

$$m_{v, is} = \cancel{0,1007} 0,873$$

$$P_v = m_{e, in} \cdot \bar{c}_{p, v} \cdot T_{e, in} \cdot \left[ \left( \frac{P_{e, aus}}{P_{e, in}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] = \frac{1}{6} m_{v, in} \text{ nicht bekannt}$$

$$P_v = m_{e, in} \cdot \bar{c}_{p, v} \cdot T_{e, in} \cdot \left( \frac{T_{e, aus}}{T_{e, in}} - 1 \right)$$

$$P_v = m_{e, in} \bar{c}_{p, v} \cdot \Delta T = \cancel{100} 1,006 \cdot 10^7 \text{ W}$$

2) Ähnliche Betriebsbedingungen erfordern: gleiche Anströmwinkel und gleiche Mach-Zahl (in der Anströmung)  $\rightarrow$  gleiche Umfang-Machzahl

Darmit sind die Machzahl-Dreiecke am Eintritt der Fan gleich

$$3) M_{a, n} = \frac{U_n}{\sqrt{\gamma R T}} = \frac{r_i}{s \cdot A} \frac{1}{\sqrt{\gamma R T}}$$

$$M_{a, n} = N D \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma R T}}$$

$k = \text{const}$  und  $R = \text{const}$ , Ähnlichkeit erfordert also gleiche Massenstromparameter und gleiche Drehzahlparameter

~~4)  $\frac{P_v}{m} = \text{const}$~~   
 ~~$\frac{m}{s \cdot A} = \text{const}$~~   
 ~~$\frac{N D}{\sqrt{\gamma R T}} = \text{const}$~~

Spezifische Arbeit muss gleich bleiben

$$\frac{\Delta h_t}{\sqrt{\gamma R T_e}} / m \stackrel{!}{=} \frac{\Delta h_t}{\sqrt{\gamma R T_e}} \quad k, R, T_e \text{ bleibt gleich}$$

$$\Delta h_t / m \stackrel{!}{=} \Delta h_t = \bar{c}_{p, v} (\Delta T) = 70320 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$P_v / m = 5 \text{ MW} = \dot{m} / m \cdot \Delta h$$

$$\dot{m} / m = 71,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Massenstromparameter müssen gleich bleiben:

$$\frac{\dot{m}}{s \cdot A \cdot \sqrt{\gamma R T}} / m = \frac{\dot{m}}{s \cdot A \cdot \sqrt{\gamma R T}}$$

$$\frac{A}{A_m} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_m}$$

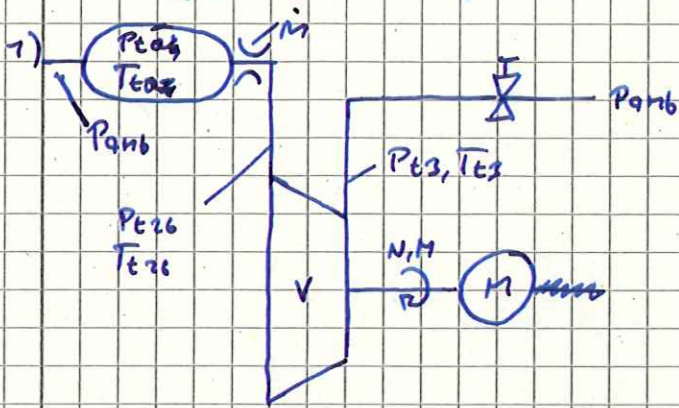
$$\left( \frac{r}{r_m} \right)^2 = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_m} \rightarrow \lambda = \sqrt{\frac{\dot{m}}{\dot{m}_m}} = 0,7057$$

Gleiches Vorgehen für Drehzahl:

$$\frac{ND}{\sqrt{RT}} / m \stackrel{!}{=} \frac{ND}{\sqrt{RT}} \quad ; \quad N = 1600 \text{ min}^{-1}$$

$$N_m = N \frac{D}{D_m} = \underline{\underline{12200 \text{ min}^{-1}}}$$

# Turboflugtriebwerke-Beispiel 7: Verdichter



2) Es muss ein ~~z~~ ähnlicher Betriebspunkt erreicht werden

→ Gleiche Anströmzahl

~~ausgewählter Drehzahlbereich~~

→ Gleiche Anströmwinkel

„Damit sind die Machzahl-Dreiecke gleich. Mit der Zuströmwinkel vorgegeben, so sind Axiale Machzahl und Umfangsmachzahl gleich zu wählen“

3) „Die Stellung der Drossel und die mechanische Drehzahl der Verdichters dienen der Einstellung des Betriebspunktes“

4) ~~Spezifische Arbeit~~ ~~des Verdichters~~ ~~erhalten zu lassen~~ ~~bleiben~~.

~~Spezifische Arbeit~~

~~Spezifische Arbeit~~

$$\frac{D N_{ISA}}{\sqrt{RT}} \cdot m = \frac{D N}{\sqrt{RT}}$$

$$N_{ISA} \cdot m = N \sqrt{\frac{T_{ISA}}{T}} = 75970 \text{ Min}^{-1}$$

$$5) \frac{m}{A \sqrt{RT}} \cdot m = \frac{m}{A \sqrt{RT}} \quad \text{! nicht unbedingt gleich}$$

~~Spezifische Arbeit~~

$$\frac{m \cdot P}{RT \cdot A \sqrt{RT}} \cdot m = \frac{m \cdot P}{RT \cdot A \sqrt{RT}}$$

$$m \cdot m = \frac{P \cdot m}{RT} \left( \sqrt{\frac{T_{ISA}}{T}} \right)^{-7} \cdot m = 77,43 \frac{kg}{s}$$

Turbofluggtriebwerke - Lösung : Verdichtungsstadium  
 Beispiel 8

1)  $\pi_v = \frac{p_{t3}}{p_{t2}}$

krit. Druckverhältnis in Drossel:  $\left(\frac{p_{t3}}{p_0}\right)_{\text{krit}} = \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 1,893$

Weil  $p_0 = p_{t2}$  und  $p_{t3} = 1,893 \cdot p_0$

$\pi_{v_{\text{min}}} = 1,893$ , gleiches Verhältnis wie das der Drossel

2) Machzahl in engsten Querschnitt ist 1  $\rightarrow$  Dimensionloser

Massstromparameter ist als konstant anzunehmen

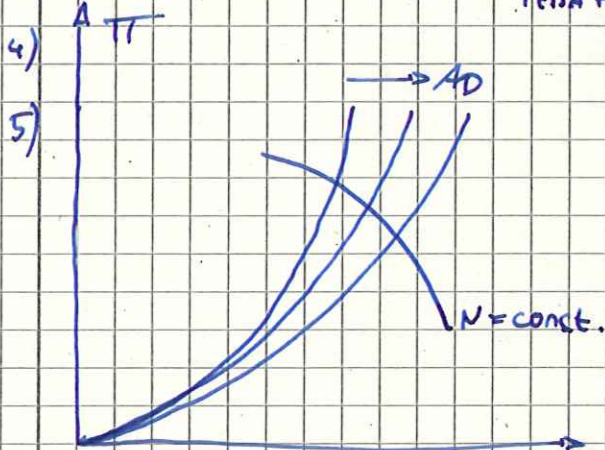
$Q_{\text{krit}} = \frac{\dot{m} \sqrt{p_{t3}}}{A p_{t3}} = \frac{\dot{m} \sqrt{R T_{t3}}}{A p_{t3}}$

$= \sqrt{2} \cdot \left(\frac{p_0}{p_{t3}}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{t3}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}$  (2.76)

$= 0,6847$

3)  $Q_2 = \frac{\dot{m}_2 \sqrt{R T_{t2}}}{A_2 p_{t2}} = \frac{\dot{m}_2 \sqrt{R T_{t3}}}{2 A_0 p_{t3}} \cdot \frac{p_{t3}}{p_{t2}} \cdot \sqrt{\frac{T_{t2}}{T_{t3}}}$

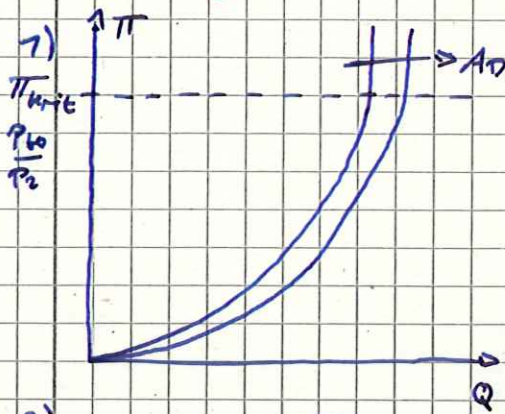
$Q_2 = Q_{\text{krit}} \cdot \pi_{v_{\text{krit}}} \cdot \sqrt{\frac{T_{t1A}}{T_{t1A} + \Delta T}} \cdot \frac{1}{\epsilon} = 0,5773$



Mit Zunahme des Druckverhältnisses steigt der Massstromparameter nicht-linear

# Turboflughtriebwerke - Beispiel 9: Verdichtungsprüfstand

71



2)

$$Q = \frac{\dot{m}_2 \sqrt{R T_{02}}}{A_2 P_{02}}$$

Q steigt mit steigendem  $\dot{m}$  (solange unterkritisch)

Wie aus Kennlinie gezeigter ist: bei steigendem Q steigt auch  $\frac{P_{00}}{P_2}$ , also sinkt  $P_{02}$ , weil  $P_{00} = P_0 = \text{const.}$

3) Drossel senkt den Druck in der Bereihungskammer und damit im Verdichtereinlauf

4)  $Q_{00}$  bleibt bei krit. Strömung konstant

Erhöhung des Massenstroms dann nur durch Öffnen der Drossel ( $A_0$ )

möglich, Weitere Senkung des Drucks ist außerdem in Maße durch

Nachexpansion möglich

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 10: Verdichter

$$1) \eta_{v, is} = \frac{\Delta T_{e, is}}{\Delta T_e} = \frac{T_{e2, is} - T_{e2}}{T_{e2} - T_{e1}}$$

$$\Delta T_{e, is} = T_{e2} \left[ \frac{P_{e26}}{P_{e2}} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - T_{e1} = 28,77 \text{ K}$$

$$\eta_{v, is} = 0,8535$$

$$2) \pi_{NDV} = 1,386 \text{ zu } \pi_{NDV}^* = 2,1$$

$$\eta_{v, is} = \frac{T_{e2} \left[ \frac{P_{e26}}{P_{e2}} \right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - T_{e1}}{T_{e2} - T_{e1}}$$

$$P_{e26}^* = P_{e2} \cdot \pi_{NDV}^* = 2790 \text{ kPa}$$

$$T_{e26}^* = 367,9 \text{ K}$$

1) Gleicher Betriebspunkt: Massenstrom- und Drehzahlparameter müssen gleich sein.

$$Q = \frac{\dot{m} \sqrt{RT_e}}{A P_e}$$

$$Q_{e26} = \frac{50,82}{A_{e26}} \stackrel{!}{=} Q_{e2}^* \quad \text{bei } A_{e26} = A_{e2}^*$$

$$\dot{m}_{e26}^* = 32,84 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Bei gleichem Massenstromparameter und gleichem durchströmtem Querschnitt ist die Machzahl gleich. Ist die Strömung axial oder der Strömungswinkel unabhängig von Betriebspunkt durch ein festes Vorleitgitter, ist auch die axiale Machzahl gleich.

$$4) \pi_V = \frac{\dot{m}_2 \sqrt{RT_{e2}}}{A_2 P_{e2}} \cdot \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{T_{e2}}{T_{e1}}}$$

Hochdruckteil bleibt unangetastet  $\rightarrow k_2$  konstant

Aber weil  $T_{e26}^* > T_{e26}$  liegt der Betriebspunkt auf einer flacheren Schwachlinie

Auf lösen nach  $k_2$ , dann  $k_2 = k_2^*$  setzen

$$\frac{\dot{m}_{e26} \sqrt{RT_{e26}}}{A_{e26} P_{e26}} \cdot \frac{1}{\pi_V} \sqrt{\frac{T_{e26}}{T_{e1}}} = \frac{\dot{m}_{e26}^* \sqrt{RT_{e26}^*}}{A_{e26}^* P_{e26}^*} \cdot \frac{1}{\pi_V^*} \sqrt{\frac{T_{e26}^*}{T_{e1}}}$$

$$\dot{m}_{e26}^* = \dot{m}_{e26} \cdot \frac{P_{e26}}{P_{e26}^*} = \dot{m}_{e26} \cdot \frac{\pi_{NDV}}{\pi_{NDV}^*} = 35,752 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

# Turbofluggtriebwerke - Beispiel 13: Hochdruckturbinen

1

$$1) \pi_T = \frac{P_{e,15}}{P_{e,05}} = \frac{P_{e4}}{P_{e5}} = 3,778$$

$$M_{T,n} = \frac{c_p \gamma}{R} \frac{\ln(T_{e4}/T_{e5})}{\ln(P_{e4}/P_{e5})} = 0,8758$$

$$2) Q_4 = \frac{m_{e4} \sqrt{R T_{e4}}}{P_{e4}} = 7,659 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Wichtig:  $\sqrt{R T_{e4}}$  ist in  $\text{m/s}$  und  $P_{e4}$  in  $\text{Pa}$

$$= 7,659 \text{ m}^2$$

~~$$3) \pi_{T,15} = \left( \frac{P_{e,15}}{P_{e4}} \right)^{\frac{1}{\gamma}} = \left( \frac{P_{e5}}{P_{e4}} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$~~

$$P_{e,15} = \pi_{T,15}^{-\gamma} \cdot P_{e4}$$

$$P_{e5,15P1} = 389,2 \text{ hPa}$$

$$P_{e5,15P2} = 477,0 \text{ hPa}$$

$$\frac{T_{e,15}}{T_{e,05}} = \frac{T_{e4}}{T_{e5}} = \left( \frac{P_{e4}}{P_{e5}} \right)^{\frac{R \cdot \gamma}{c_p}}$$

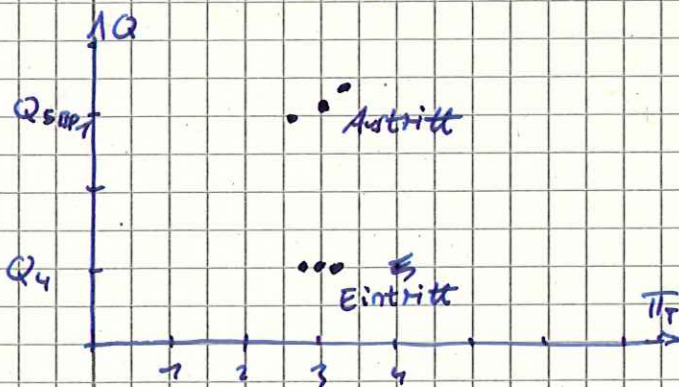
$$T_{e5,15P1} = 7705 \text{ K}$$

$$T_{e5,15P2} = 7723 \text{ K}$$

$$Q_{5,15P1} = 0,04405 \text{ m}^2$$

$$Q_{5,15P2} = 0,04744 \text{ m}^2$$

$$4) Q_5 = \frac{m_{e5} \sqrt{R T_{e5}}}{P_{e4} \cdot \pi_{T,15}} = \frac{m_{e5} \sqrt{R T_{e5}} \pi_{T,15P1}}{P_{e4}}$$



# Turboflugtriebwerke-Beispiel 75: Einwellen-Einstrom-Triebwerk $\square$

$$1) k_2 = \frac{m_4 \sqrt{R_4 T_{04}}}{A_4 p_{04}} \cdot \frac{A_4}{A_2} \cdot \frac{p_{02}}{m_3} \cdot \frac{m_3}{m_4} \cdot \sqrt{\frac{R_2}{R_4}} \cdot \frac{p_{04}}{p_{03}}$$

$$k_2 = \frac{m_3}{m_2} \frac{m_4}{m_3} \frac{c_{pT}}{c_{pV}} \left(1 - \frac{T_{05}}{T_{04}}\right)$$

~~$$\frac{T_{03}}{T_{02}}$$~~

$$\frac{T_{03}}{T_{02}} = 1 + k_2 \frac{T_{04}}{T_{02}} - \frac{P_{welle}}{m_2 c_{pV} T_{02}}$$

$$P_{welle} = P_V + P_T = 0$$

~~Platz für die Kompression  $\frac{T_{03}}{T_{02}}$  wird von  $\frac{P_{welle}}{m_2 c_{pV} T_{02}}$  eingenommen~~

$$k_2 = 0,2775$$

$$\pi_V = \frac{m_2 \sqrt{R_2 T_{02}}}{P_{02}} \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{T_{04}}{T_{02}}} = \frac{P_{04}}{P_{02}}$$

$$k_2 = 0,06459 \text{ m}^2$$

$$k_5 = \frac{P_{07}}{P_{03}} = 3,732 \cdot 10^{-1} = 0,3732$$

2) Siehe Musterlösung

# Turbofluggtriebwerke - Beispiel 25: Zweiwelk-, Zweistrom-Triebwerk

(7)

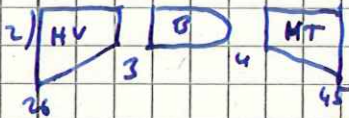
$$1) \pi_{krit} \approx \left( \frac{C_{pR} - \gamma}{C_{pR} - 1} \right)^{\frac{C_{pR}}{\gamma}} = 7,838 \text{ für Hauptstromdüse}$$

$$= 7,892 \text{ für Nebenstromdüse}$$

$$\pi_{HSD} = \frac{P_{t77}}{P_{t0}} = 7,804$$

$\pi_{HSD} = \frac{P_{t7}}{P_{t0}} = 7,027$  Beide sehr nah an krit. Druckverhältnis, es kann also mit nur geringen Fehler von einer kritischen durchströmung ausgegangen werden

Ist das Düsendruckverhältnis größer als der kritische Düsendruckverhältnis, dann ist die Düse auf jeden Fall kritisch durchströmt.



~~$$k_2 = \frac{m_4 \sqrt{R_{t4} T_{t4}}}{P_{t4}} \cdot \frac{m_6}{m_4} \cdot \frac{P_{t4}}{P_{t3}} = \dots$$~~

$$k_2 = \frac{m_4 \sqrt{R_{t4} T_{t4}}}{P_{t4}} \cdot \frac{m_6}{m_4} \cdot \frac{P_{t4}}{P_{t3}} = 9,246 \cdot 10^{-3}$$

$$k_7 = \frac{m_3}{m_6} \cdot \frac{m_4}{m_3} \cdot \frac{C_{p7}}{C_{p4}} \left( 1 - \frac{T_{t45}}{T_{t4}} \right) = 0,2697$$

$$\pi_V = \left( 1 + k_7 \frac{T_{t4}}{T_{t2}} \right) \frac{C_{p4} m_4}{R}$$

$$Q_A k_2 = Q_A \cdot \left( \frac{m_6}{m_4} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{T_{t26}}{T_{t4}}} \cdot \left( \frac{P_{t4}}{P_{t26}} \right)^{-\gamma} \cdot \frac{m_6}{m_4} \cdot \frac{R_{t4}}{P_{t3}}$$

$$Q_A = \frac{k_2}{\sqrt{\frac{T_{t4}}{T_{t26}}} \cdot \frac{P_{t26}}{P_{t3}}} \pi_V^{-\gamma}$$

| $\frac{T_{t4}}{T_{t26}}$ | $\pi_V$ | $Q_A$   |
|--------------------------|---------|---------|
| 4,73542                  | 75      | 0,06373 |
| 5,0                      | 76,67   | 0,06868 |
| 5,5                      | 79,97   | 0,07873 |
| 6,0                      | 23,77   | 0,09772 |

3)  $Q_A$  an Austritt der Düse ist in Hauptstrom und Nebenstrom gleich

$$\frac{m_3 \sqrt{R_{t73}}}{P_{t73}} = \frac{m_4 \sqrt{R_{t24}}}{P_{t24}}$$

$$\frac{m_3}{m_4} = \frac{\sqrt{R_{t24}}}{\sqrt{R_{t73}}} \cdot \frac{P_{t73}}{P_{t24}} = \sqrt{\frac{T_{t26}}{T_{t73}}} \cdot \frac{P_{t73}}{P_{t26}}$$



$$Q_{A2} = \frac{m_{A2} \sqrt{RT_{E2}}}{P_{E2}} \quad \text{w/m}^2$$

$$k_b = \left( \frac{T_{E4}}{T_{E2}} - 1 \right) \cdot \frac{T_{E2}}{T_{E4}} = \frac{T_{E2}}{T_{E4}} - \frac{T_{E2}}{T_{E4}} \rightarrow \frac{T_{E2}}{T_{E4}} = \left( \frac{T_{E2}}{T_{E4}} - k_b \right)^{-1}$$

~~Q\_{A2} = \frac{m\_{A2} \sqrt{RT\_{E2}}}{P\_{E2}}~~

$$\Pi_{E2} = \frac{P_{E4}}{P_{E2}} = \left( \frac{T_{E4}}{T_{E2}} \right)^{\frac{c_p R}{R}}$$

$$Q_{A2} = \frac{m_{A2} \sqrt{RT_{E4}}}{P_{E4}} \cdot \frac{P_{E4}}{P_{E2}} \cdot \sqrt{\frac{T_{E2}}{T_{E4}}} \quad \leftarrow$$

Turboflugtriebwerke - Beispiel 26: Zweiwellen-Zweistrom-Triebwerk

(7)



$$\pi_V = \frac{P_3}{P_{26}} = \frac{\dot{m}_{26} \sqrt{R_{26} T_{26}}}{\dot{m}_{26} P_{26}} \cdot \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{T_{24}}{T_{26}}} \rightarrow k_2 = 0,02756 \text{ m}^2$$

$$k_2 = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_{26}} \cdot \frac{\dot{m}_{45}}{\dot{m}_3} \cdot \frac{C_{pT}}{C_{pV}} \cdot \left( 1 - \frac{T_{45}}{T_{24}} \right) = 0,2867 = 0,2868$$

~~...~~

~~...~~

$$\pi_V = Q_{A26} \cdot 46,38 \cdot \sqrt{\frac{T_{24}}{T_{26}}}$$

$$Q_{A26} = \frac{\pi_V}{46,38 \sqrt{\frac{T_{24}}{T_{26}}}} ; \dots$$

$$\pi_V = \left[ 1 + k_2 \frac{T_{24}}{T_{26}} \right] \frac{C_{pHV} \dot{m}_{HV,0}}{R}$$

| $\frac{T_{24}}{T_{26}}$ | $\pi_V$ | $Q_{A26}$ |
|-------------------------|---------|-----------|
| 3,5                     | 8,934   | 0,17030   |
| 4,0                     | 11,177  | 0,17198   |
| 4,5                     | 13,63   | 0,17385   |
| 4,7467                  | 15      | 0,17485   |
| 5                       | 16,57   | 0,17592   |

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 33: Prüfungsaufgabe

$$1) \pi_{T,F} = \left( \frac{P_{e45}}{P_{e5}} \right)_F = 2$$

$$P_{T,F} = \dot{m}_{45} \cdot c_{p,T} \cdot T_{e,45} \left[ 1 - \pi_{T,F}^{-\frac{\gamma_{45}}{c_{p,T}}} \right]$$

$$P_{T,F} = \dot{m}_{45} \cdot c_{p,T} \cdot T_{e45} \left( 1 - \frac{T_{e5}}{T_{e45}} \right) = 7,34 \cdot 10^7 \text{ W}$$

2) Zueinander ähnliche Betriebspunkte liegen im Kennfeld der Turbine im gleichen Punkt

- Gleiches Druckverhältnis:  $\frac{P_{e45}}{P_{e5}}$

- Gleicher Massstromparameter:  $Q_M = \frac{\dot{m} \sqrt{R T_{e45}}}{A_{45} P_{e45}}$

- Gleicher Drehzahlparameter:  $\frac{D N}{\sqrt{R T_{e45}}}$

Damit sind folgende Größen gleich:

- Gleiches Druckverhältnis / gleiche spec. Arbeit  $\frac{dh_0}{T_e}$

- Gleiches ~~axiale~~ axiale Machzahl

- Gleiche Umfangsmachzahl

$$3) \left( \frac{P_{e45}}{P_{e5}} \right)_F \stackrel{!}{=} \left( \frac{P_{e45}}{P_{e5}} \right)_V$$

$$P_{e45,V} = 280 \text{ kPa}$$

$$4) Q_F \stackrel{!}{=} Q_V$$

$$\frac{\dot{m}_{45} \sqrt{R T_{e45}}}{A_{45,F} P_{e45}} \Big|_F = \frac{\dot{m}_{45} \sqrt{R T_{e45}}}{A_{45,V} P_{e45}} \Big|_V$$

$$\frac{\dot{m}_{45,F} \sqrt{R T_{e45,F}}}{\dot{m}_{45,V} \sqrt{R T_{e45,V}}} \cdot \frac{P_{e45,V}}{P_{e45,F}} = \frac{A_{45,F}}{A_{45,V}} = 7,594 = \frac{\pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \Big|_F}{\pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 \Big|_V}$$

$$\frac{D_{45,F}}{D_{45,V}} = 7,263$$

$$\frac{D N}{\sqrt{R T_{e45}}} \Big|_F \stackrel{!}{=} \frac{D N}{\sqrt{R T_{e45}}} \Big|_V$$

$$\frac{D N}{\sqrt{T_{e45}}} \Big|_F = \frac{D N}{\sqrt{T_{e45}}} \Big|_V \rightarrow N_V = 7726 \frac{1}{\text{min}}$$

# Turbolugtriebwerke - Beispiel 34: Prüfungsaufgabe

$$1) P_u = \dot{m}_2 c_{pV} T_{t2} \left[ \left( \frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] = 8,722 \cdot 10^6 \text{ W}$$

Ableasen aus Verdichterkennfeld:  $M_v = 0,83$ ;  $\pi_{v,5} = 6,35$   
 $\frac{\dot{m}_2 \sqrt{T_{t2}}}{P_{t2}} = 5,7 \cdot 10^{-3}$

$$\dot{m}_2 = 34,02 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$2) \pi_{v,8} = 5,7$$

~~...~~ Weiter bei Verzögerung der Triebwerke gleich

Eintrogen von Bin des Diagramm auf gleicher Drehzahllinie

$$M_{v,8} = 0,80; \frac{\dot{m}_2 \sqrt{T_{t2}}}{P_{t2}} \Big|_0 = 5,8 \cdot 10^{-3}; \dot{m}_{t2} = 34,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{v,8} = 8,602 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$3) P_{v,8} = \dot{m}_2 c_{pV} T_{t2} \left( \frac{T_{t3}}{T_{t2}} - 1 \right) \quad T_{t3B} = 532,8 \text{ K}$$

~~$$\frac{P_{v,8}}{P_{t,8}} = \dots$$~~

$$T_{t3S} = 540,6 \text{ K}$$

~~$$\frac{P_{v,8}}{P_{t,8}} = \dots$$~~

$$\pi_{v,8S} = \frac{\dot{m}_2 \sqrt{R_2 T_{t2}}}{P_{t2}} \cdot \frac{1}{M_v} \sqrt{\frac{T_{t3}}{T_{t2}}} \rightarrow k_2 = 0,03768$$

$$\pi_{v,8} = \dots \rightarrow T_{t4,8} = 972,7 \text{ K}$$

$$4) P_{\text{Mech.}} = P_{t,8} - P_{v,8}$$

$$P_{t,8} = P_{t0,8} = \dot{m}_4 \cdot c_{pT} \cdot T_{t4,8} \left( 1 - \frac{T_{t3}}{T_{t4}} \right)$$

$$\frac{P_{t,8}}{P_{t,5}} = \frac{\dot{m}_{4,8}}{\dot{m}_{4,5}} \frac{c_{pT,8}}{c_{pT,5}} \frac{T_{t4,8}}{T_{t4,5}} \left( 1 - \frac{T_{t3}}{T_{t4}} \right) \left( 1 - \frac{T_{t3}}{T_{t4}} \right)$$

$$P_{t,8} = P_{t,5} \cdot \frac{\dot{m}_{4,8}}{\dot{m}_{4,5}} \frac{T_{t4,8}}{T_{t4,5}} = 6,907 \cdot 10^6 \text{ W}$$

$$P_{\text{Mech.}} = - 7,695 \cdot 10^6 \text{ W}$$

# Turboflughtriebwerke - Beispiel 35: Prüfungsaufgabe

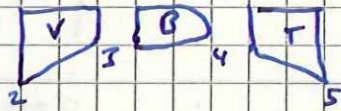
1)  $T_{t2} = T_{t3} = T_0 = 288,75 \text{ K}$

$P_{t2} = P_{t3} = P_0 = 107,325 \text{ kPa}$

$n_v = \frac{R}{c_{p,v}} \frac{\ln(P_{t3}/P_{t2})}{\ln(P_{t3}/T_{t2})} = 0,8760$

$n_T = \frac{c_{p,T}}{R} \frac{\ln(T_{t4}/T_{t5})}{\ln(P_{t4}/P_{t5})} = 0,8962$

2)  $Q_A = \frac{m \sqrt{R T_0}}{P_0}$



~~...~~ Betrachtung als Einwellen-einstromtriebwerke

Aufteilung der Welle, geht jedoch verloren

Berechnung von  $k_v$  und  $k_T$  im Betriebspunkt A: Auslegung:

$\pi_v = \frac{P_{t3}}{P_{t2}} = \frac{m \sqrt{R T_0}}{P_{t2}} \cdot \frac{1}{k_v} \sqrt{\frac{T_{t4}}{T_{t2}}} \rightarrow k_v = 2,4775$

$\pi_T = \eta = \left[ 1 + k_T \frac{T_{t4}}{T_{t2}} \right]^{c_{p,v}/R} \rightarrow k_T = 0,3479$

Übertragung auf Betriebspunkt B:

$\pi_{vB} = Q_{A,B} k_v \sqrt{\frac{T_{t4B}}{T_{t2B}}}$

$\pi_{vB} = \left[ 1 + k_T \frac{T_{t4B}}{T_{t2B}} \right]^{c_{p,v}/R} \rightarrow \pi_{vB} = 27,38$

$Q_{A,B} = 0,2637$

3) ~~OPR = 3,000 bei  $T_{t4} = 1300 \text{ K}$~~   
~~...~~

Bei gleichen Abgasbedingungen gilt das gleiche Massenstromverhältnis.

~~OPR<sub>B</sub> = OPR<sub>A</sub>~~

~~$\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \Big|_B = \frac{m \sqrt{R T_0}}{P_{t2}} \Big|_B \cdot \frac{1}{k_v} \sqrt{\frac{T_{t4}}{T_{t2}}} \Big|_B = Q_{A,B} \Big|_B = 0,2637$~~

Wenn das gleiche Gesamtdruckverhältnis gelten sollte (OPR)  $\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \Big|_A = \frac{P_{t3}}{P_{t2}} \Big|_B$

so gilt auch  $\frac{T_{t4}}{T_{t2}} \Big|_A = \frac{T_{t4}}{T_{t2}} \Big|_B$

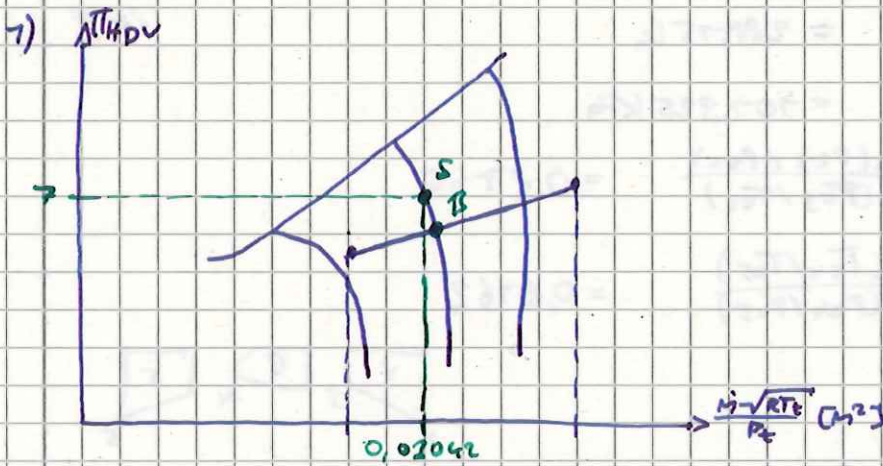
$T_{t4,B} = T_{t2,B} \cdot \frac{T_{t4}}{T_{t2}} \Big|_A = 7666 \text{ K}$

4)  $EPR = \frac{P_{t5}}{P_{t2}} \Big|_B$  ;  $T_{t4} = 7666 \text{ K}$

$\frac{P_{t4}}{P_{t2}} = \frac{P_{t5}}{P_{t2}} = k_5 \cdot \frac{P_{t3}}{P_{t2}}$



# Turboflugtriebwerke - Beispiel 36 : Prüfungsaufgabe



$$P_v = \dot{m}_{26} c_{p,v} T_{e,26} \left[ T_{HDV}^{R/c_{p,v}} - 1 \right] = 2,390 \cdot 10^6 \text{ W}$$

2) Betriebspunkt des Niederdruckverdichters bleibt gleich:

$$\frac{T_{e,26}}{T_{e,2}} \Big|_S = \frac{T_{e,26}}{T_{e,2}} \Big|_B \rightarrow T_{e,26B} = T_{e,2B} \cdot \frac{T_{e,26}}{T_{e,2}} \Big|_S = 326,6 \text{ K}$$

$$\frac{T_{e,4B}}{T_{e,26B}} = 3,527 \text{ Fehler hier gemacht! eig. } \frac{T_{e,4B}}{T_{e,2B}} = 3,677 \text{ Machzahl nicht beachtet}$$

3) Unmittelbar zu Beginn der Verzögerung  $\rightarrow$  Trägheit des Rotors bewirkt "zunächst" konstante Drehzahl

~~$\frac{P_{HDV,S}}{P_{HDV,B}} = \frac{\dot{m}_{26,S} \cdot T_{e,26,S}}{\dot{m}_{26,B} \cdot T_{e,26,B}}$~~

$$k_{e,15} = \frac{1}{\pi_{v,15}} \cdot Q_{A,15} \cdot \sqrt{\frac{T_{e,4}}{T_{e,2}}} = 0,07059$$

$$T_{e,2B} = T_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} \pi_{v,15}^2 \right) = 244,4 \text{ K}$$

$$k_{e,15} = 7 \quad \rightarrow \quad Q_{A,15} (\pi_v = 7) = 0,03898$$

$$T_{e,2B} = T_0 \left( 1 + \frac{k-1}{2} \pi_{v,15}^2 \right) = 237,7 \quad Q_{A,15} (\pi_v = 6) = 0,03767$$

B lässt sich bei Schnittpunkt Drehzahlkurve und Turbinencharakteristik

$$4) P_{T,B} = \dot{m}_4 c_{p,T} T_{e,4} \left( 1 - \left( \frac{1}{\pi_T} \right)^{\frac{R}{c_{p,T}}} \right) = P_{v,15}$$

$$= \dot{m}_{26} c_{p,v} T_{e,26} \left( \pi_{v,15}^{R/c_{p,v}} - 1 \right)$$

(Es ist wohl nur die Hochdruckturbinen, nicht die ganze Turbine gemeint...?)

$$\frac{\dot{m}_{26} \sqrt{T_{e,26}}}{P_{e,26}} \Big|_B = 0,03057 \quad \dot{m}_{26,B} = 7,043 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\pi_{v,15} = 6,35$$

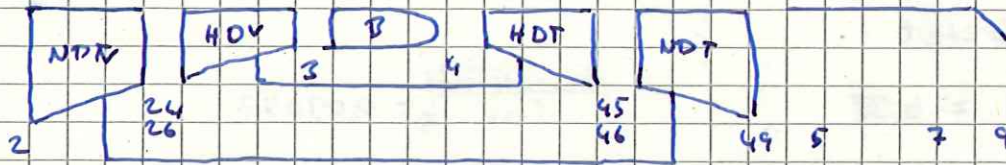
~~$\frac{P_{HDV,S}}{P_{HDV,B}} = \frac{\dot{m}_{26,S} c_{p,v} T_{e,26,S} \left( \pi_{v,15}^{R/c_{p,v}} - 1 \right)}{\dot{m}_{26,B} c_{p,v} T_{e,26,B} \left( \pi_{v,15}^{R/c_{p,v}} - 1 \right)}$~~

Warum fällt dieser Teil weg?

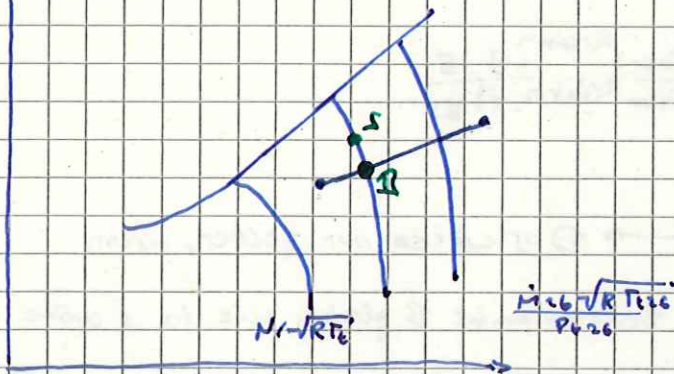
$$P_{HDV,B} = P_{HDV,S} \cdot \frac{\dot{m}_{26,B}}{\dot{m}_{26,S}} \cdot \frac{T_{e,26,B}}{T_{e,26,S}}$$

=  $\hookrightarrow$  Gleiches Beispiel nochmal rechnen!

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 36: Prüfungsaufgabe



1)  $P_{t3}/P_{t26}$



$$P_{t3}/P_{t26} |_s = 7$$

$$Q_{A,26,s} = 0,03042$$

~~PHDV = min \sqrt{R T\_{t26}} \left( \frac{P\_{t3}}{P\_{t26}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left( \frac{P\_{t26}}{P\_{t26}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}~~

~~PHDV = min \sqrt{R T\_{t26}} \left( \frac{P\_{t3}}{P\_{t26}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}~~

~~PHDV = min \sqrt{R T\_{t26}} \left( \frac{P\_{t3}}{P\_{t26}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}~~

$$P_{HDV} = \min \sqrt{R T_{t26}} \left( \frac{P_{t3}}{P_{t26}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 2,390 \text{ MW}$$

2)  $T_{t26,B}$  gesucht

Betriebspunkt des Niederdruckverdichters bleibt unverändert:

$$\frac{T_{t26}}{T_{t2}} |_s = \frac{T_{t26}}{T_{t2}} |_B$$

$$T_{t26,B} = T_{t2,B} \frac{T_{t26}}{T_{t2}} ; T_{t2,B} = T_{t2} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2 \right) = 237,9 \text{ K}$$

$$T_{t2,s} = T_{t2} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2 \right) = 244,4 \text{ K}$$

$$\frac{T_{t26}}{T_{t26,B}} = 3,677$$

3) Unmittelbar zu Beginn der Beschleunigung  $\rightarrow$  Punkt B liegt im Keimfeld auf der gleichen Drehzahlkurve

$$Q_{A26,B} = \frac{\min \sqrt{R T_{t26}}}{P_{t26}}$$

$$k_{26} = \frac{1}{\pi D_{t26}^2} \frac{\min \sqrt{R T_{t26}}}{P_{t26}} \sqrt{\frac{T_{t26}}{T_{t26}} |_s} = 0,009756$$

Übertragung auf Betriebspunkt B:  $\min_{26,B} = 7,257 \pi D_{HDV,B}$

$$Q_{A26,B} (T_{HDV} = 6) = 0,02882$$

$$Q_{A26,B} (T_{HDV} = 7) = 0,03363$$

#### 4) Turbinenleistung im Punkt B (HDT)

Ableser liefert:

$$\frac{P_{e3}}{P_{e6}}|_B = 6,38$$

$$\frac{m_{26} \sqrt{RT_{e6}}}{P_{e6}}|_B = 0,07057$$

$$P_{HDT} = P_{HDV} \quad (\text{stationärer Flugzustand})$$

$$\frac{P_{HDV,B}}{P_{HDV,S}} = \frac{m_{26} \sqrt{RT_{e6}} \left[ \frac{R/c_p \gamma}{\gamma} \right] |_B}{m_{26} \sqrt{RT_{e6}} \left[ \frac{R/c_p \gamma}{\gamma} \right] |_S}$$

$$m_{26,B} = 7,947 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$P_{HDV,B} = 2,007 \text{ MW} \quad \rightarrow \text{Das würde nur gelten, wenn}$$

Wirkungsgrad des HDV in Betriebspunkt B gleich wie in S wäre

(Dann wäre  $\frac{P_{e3}}{P_{e6}}|_B$  im Diagramm bei S, B und es würde für  $P_{HDV,B}$

das gleiche wie in Mutterlösung rauskommen

Also stattdessen so:

$\rightarrow$  Worauf fällt dieser Teil weg?

$$\frac{P_{HDV,B}}{P_{HDV,S}} = \frac{m_{26} \sqrt{RT_{e6}} \left( 1 - \frac{T_{e6}}{T_{e4}} \right) |_B}{m_{26} \sqrt{RT_{e6}} \left( 1 - \frac{T_{e6}}{T_{e4}} \right) |_S}$$

$$P_{HDV,B} = 1,762 \text{ MW}$$

# Turbofluggtriebwerke - Beispiel 37: Prüfungsaufgabe

$$1) \pi_{HDV} = \frac{P_{e3}}{P_{e26}} = 76$$

$$n_{v, is} = \frac{T_{e2, is} - T_{e26}}{T_{e3} - T_{e26}} \quad \text{Wirkungsgrad } \Delta T_{is} = T_{e26} (\pi_{HDV}^{R_{cp}} - 1)$$

$$n_{v, is} = 0,8598$$

$$2) T_{e26, m} = 288,75 \text{ K}$$

Allgemein: Der Betriebspunkt wird der Vorgabelegung anhand Druckverhältnis, Massstrom- und Drehzahlparameter ausdrücken, dann Punkt im Kennfeld über x- und y-Achse finden.

Geht hier wegen fehlender Angaben nicht  $\rightarrow$  Hier kann Pht. über isentr. Wirkungsgrad und Druckverhältnis gefunden werden:

$$\frac{m_{is} \sqrt{RT_{e26}}}{P_{e26}} \Big|_m = 0,77 \quad \pi_{HDV} = 76 \quad n_{is} = 0,8598$$

$$3) m_{6, v} = 42 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \rightarrow Q_{A, 26, v} = 0,08229$$

~~Rechnung~~

~~$$\frac{m_{is} \sqrt{RT_{e26}}}{P_{e26}} \Big|_m = \frac{m_{is} \sqrt{RT_{e26}}}{P_{e26}} \Big|_m$$~~

~~$$\frac{m_{is} \sqrt{RT_{e26}}}{P_{e26}} \Big|_m = \frac{m_{is} \sqrt{RT_{e26}}}{P_{e26}} \Big|_m$$~~

~~$$\frac{DITM}{\sqrt{RT_{e26}}} \Big|_m = \frac{DITM}{\sqrt{RT_{e26}}} \Big|_m$$~~

~~$$\frac{N}{\sqrt{RT_{e26}}} \Big|_m = \frac{N}{\sqrt{RT_{e26}}} \Big|_m$$~~

~~$$\frac{DM}{Dv} = \frac{DM}{Dv}$$~~

~~$$\frac{Nv}{Nm} = \frac{Nv}{Nm}$$~~

$$\frac{m_{is} \sqrt{RT_{e26}}}{P_{e26} \cdot A_{26}} \Big|_v = \frac{m_{is} \sqrt{RT_{e26}}}{P_{e26} \cdot A_{26}} \Big|_m$$

$$\frac{A_{26m}}{A_{26v}} = \frac{Q_{A, 26v}}{Q_{A, 26m}} = 0,7487 \quad ; \quad A = \pi r^2$$

$$M = \frac{r_m}{r_v} = 0,8649$$

$$w) \frac{N}{\sqrt{RT_{e26}}} \Big|_m = 0,074 \rightarrow N_m = 4,026 \frac{1}{s}$$

$$\frac{DITM}{\sqrt{RT_{e26}}} \Big|_m = \frac{DITM}{\sqrt{RT_{e26}}} \Big|_v$$

$$\frac{DM}{Dv} = \sqrt{\frac{T_{e26m}}{T_{e26v}}} \cdot \frac{Nv}{Nm} \quad Nv = 3,745 \quad \zeta$$

Musterlösung hat gleiche Methode und gleiches Zwischenergebnis, aber anderes Endergebnis...

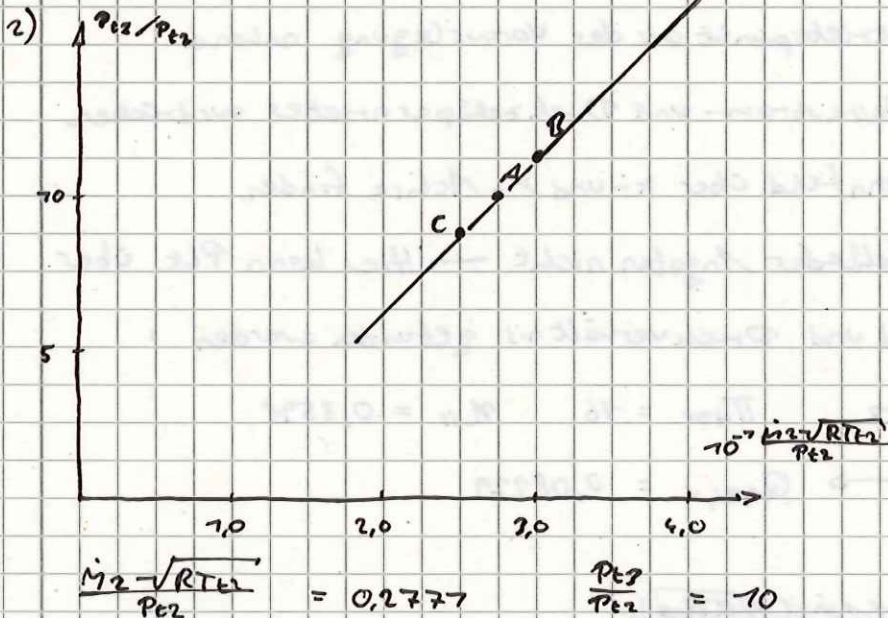
# Turboturbinenbeispiel 38: Prüfungsaufgabe

$$1) T_{t0}/T_0 = 1 + \frac{\kappa-1}{2} M_0^2 \quad ; \quad T_{t0} = T_{t2}$$

$$T_{t2} = 290,5 \text{ K}$$

$$P_{t0}/P_0 = \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_0^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad ; \quad P_{t0} = P_{t2}$$

$$P_{t2} = 104,2 \text{ kPa}$$



$$3) T_{t4} = 7600 \text{ K}$$

$$k_1 = \left[ \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{M_1}{M_2} \cdot \frac{C_{p1}}{C_{p2}} \left(1 - \frac{T_{t5}}{T_{t4}}\right) \right]_A = 0,2202$$

$$\Pi_{V,B} = \left[ 1 + k_1 \frac{T_{t4}}{T_{t2}} \right]_B^{C_{pV} M_1 / R} = 17,74$$

$$k_2 = \left[ \frac{M_2 \sqrt{R T_{t2}}}{P_{t2}} \cdot \frac{1}{\Pi_V} \cdot \sqrt{\frac{T_{t4}}{T_{t2}}} \right]_A = 0,06797$$

$$\Pi_{V,B} = Q_{A2,B} \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \sqrt{\frac{T_{t4}}{T_{t2}}} \rightarrow Q_{A2,B} = 0,2997$$

$$4) \Pi_{V,C} = \left[ 1 + k_1 \frac{T_{t4}}{T_{t2}} \right]_C^{C_{pV} M_1 / R} = 8,236$$

Punkte A, B, C liegen auf Gerade im Kernfeld

→ Punkt C kann jetzt schon eingezeichnet werden

↳ Ist aber etwas riskant, in Klausur lieber ausführlich rechnen

Turbolagertreibwerke - Beispiel 17: Prüfungsaufgabe

$$1) P_{22, A} = P_2 \cdot \pi_{2-24} = 270 \text{ kPa} = P_{22, B}$$

$$M_{vis} = \frac{\Delta T_{vis}}{T_{24} - T_2} = \frac{\frac{R}{c_p} T_2 (\pi_{2-24} - 1)}{T_{24} - T_2} = 0,899$$

$$T_{24, A} = 362,6 \text{ K} = T_{24, B}$$

$$Q_{A, 26, A} = \frac{\dot{m}_{26} \sqrt{R T_{26}}}{P_{22}} = 0,06799$$

$$2) P_{22, B} = 760 \text{ kPa} \quad T_{26, B} = 335 \text{ K}$$

Verdichter beider Konfigurationen der gleiche  $\rightarrow$  dimensionsbehafteter Massenstromparameter muss gleich sein

$$Q_{A, 26, A} = 0,06799 = \frac{\dot{m}_{26} \sqrt{R T_{26}}}{P_{22}} \Big|_A \rightarrow \dot{m}_{26, B} = 35,08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

~~$$3) \frac{P_{22, A}}{P_{22, B}} = \frac{P_2 \cdot \pi_{2-24, A}}{P_2 \cdot \pi_{2-24, B}} = \frac{\pi_{2-24, A}}{\pi_{2-24, B}} = \frac{270}{760} = 0,355$$~~

Ähnliche Betriebsbedingungen heißt Betrieb im gleichen Punkt im Verdichterkennfeld:

$$\frac{P_{22, A}}{P_{26, A}} = \frac{P_{22, B}}{P_{26, B}}$$

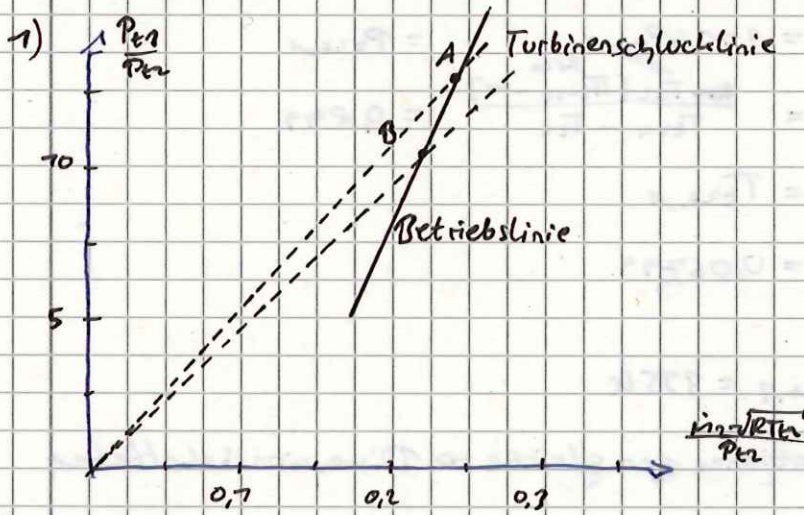
$$\frac{P_{22, A}}{P_{26, A}} = \frac{P_{22, B}}{P_{26, B}} = 7,373$$

~~$$\frac{P_{22, A}}{P_{26, A}} = \frac{P_{22, B}}{P_{26, B}} = 7,373$$~~

$$\frac{T_{22}}{T_{26, A}} = \left( \frac{P_{22}}{P_{26}} \right)^{\frac{R}{c_p}} \Big|_A = \left( \frac{P_{22}}{P_{26}} \right)^{\frac{R}{c_p}} \Big|_B = \frac{T_{22}}{T_{26, B}}$$

$$\frac{T_{22}}{T_{26, A}} = \frac{T_{22}}{T_{26, B}} = 7,085$$

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 40: Prüfungsaufgabe



$$\frac{P_{e2}}{P_{e1}} \Big|_A = 12 \quad (P_{e2} = P_{e0} = P_0 ; \pi_2 = 0,0)$$

$$\frac{\dot{m} \sqrt{RT_{e1}}}{P_{e1}} \Big|_A = 0,29$$

2)  $k_{2/A} = \frac{1}{\pi_2} Q_{A2} \sqrt{\frac{T_{e1}}{T_{e2}}} = 0,04899$

~~Wahlung~~

$$\pi_{2/A} = \left[ 1 + k_2 \frac{T_{e1}}{T_{e2}} \right]^{c_{p,2} \frac{\gamma}{R}} \rightarrow k_{2/A} = 0,2075$$

$$k_{2/B} = \frac{1}{\pi_{2,B}} Q_{A2,B} \sqrt{\frac{T_{e1,B}}{T_{e2,B}}}$$

$$\pi_{2/B} = \left[ 1 + k_{2/B} \frac{T_{e1,B}}{T_{e2,B}} \right]^{c_{p,2} \frac{\gamma}{R}}$$

$$\pi_{2,B} = 10,38$$

$$Q_{A2,B} = 0,2768$$

3) Siehe Skizze oben

4)  $\frac{F_q}{A_2 P_0} = 2 \frac{P_{e1}}{P_{e0}} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} - 1$

$$F_{q,A} = 87,45 \text{ kN}$$

$$k_5 = \frac{P_{e1}}{P_{e3}} \Big|_A = 0,3978$$

$$\frac{P_{e1}}{P_{e2}} \Big|_B = \frac{P_{e1}}{P_{e0}} \Big|_B = k_5 \cdot \frac{P_{e1}}{P_{e2}} \Big|_B = 4,067$$

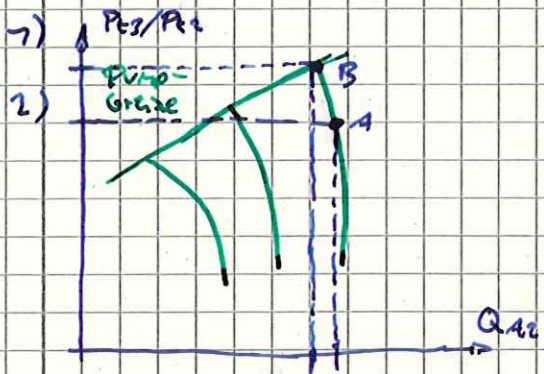
$$F_{q,B} = 73,25 \text{ kN}$$

$A_2$  bleibt in beiden Betriebspunkten gleich!

Sehr leicht anderes Ergebnis wie in Zwischentlösung

↳ Vertippt oder Rundungsfehler

Turboflughtriebwerke - Beispiel 47: Prüfungsaufgabe



$$P_{t2} = \frac{P_{t2}}{P_{t0}} \cdot P_{t0,A}$$

$$T_{t2} = T_{t0} = T_{t0,A}$$

$$\frac{P_{t2}}{P_{t2}} = 77$$

$$Q_{m2} = 0,3 \text{ m}^3/\text{s}$$

Bei Betriebspunkt B: ~~Qm2 konstant~~, P2/P1 steigt an

3) Tt2 const

~~Ablesung ergibt in Diagramm 0,275~~

Warum kann man nicht einfach ablesen?

↳ es kommt das richtige Ergebnis raus

$$m_{2,B} = 96,89 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \dots$$

$$0,275 = \frac{m_{2,B} \cdot \sqrt{R \cdot T_{t2}}}{P_{t2}}$$

$$T_{t2} = \text{const} \quad T_{t2} = \text{const}$$

$$\frac{T_{t2,A}}{T_{t2,A}} = \frac{T_{t2,B}}{T_{t2,B}}$$

$$k_{2} = \frac{m_2 \cdot \sqrt{R \cdot T_{t2}}}{P_{t2}} \cdot \frac{1}{\pi v} \cdot \sqrt{\frac{T_{t2}}{T_{t2}}}$$

$$\frac{k_{2,A}}{k_{2,B}} = \frac{\frac{m_{2,A} \cdot \sqrt{R \cdot T_{t2,A}}}{P_{t2,A}}}{\frac{m_{2,B} \cdot \sqrt{R \cdot T_{t2,B}}}{P_{t2,B}}} \cdot \frac{\pi v_{2,B}}{\pi v_{2,A}} \cdot \frac{\sqrt{\frac{T_{t2,A}}{T_{t2,B}}}}{\sqrt{\frac{T_{t2,B}}{T_{t2,A}}}} = 7,388$$

Hier auch einfach aus Diagramm ablesen!

Hab nur die Musterlösung erst nicht verstanden

$$k_2 = \frac{m_2 \cdot \sqrt{R \cdot T_{t2}}}{P_{t2}} \cdot \frac{m_2}{m_2} \cdot \sqrt{\frac{R}{R}} \cdot \frac{P_{t2}}{P_{t2}}$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{const}} \quad \underbrace{\frac{m_2}{m_2}}_{\frac{m_2}{m_0}} \quad \underbrace{\frac{m_2}{m_2}}_{\frac{m_2}{m_0}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{const}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{\text{const}}$

$$\frac{k_{2,A}}{k_{2,B}} = \frac{m_{2,A} / m_{2,A}}{m_{2,B} / m_{2,B}} = 7,388 \quad \text{~~aber } m_{2,B} = 96,89 \frac{\text{kg}}{\text{s}}~~$$

~~Ablesung ergibt in Diagramm 0,275~~

$$\frac{m_{3,B}}{m_{2,B}} = 7,388$$

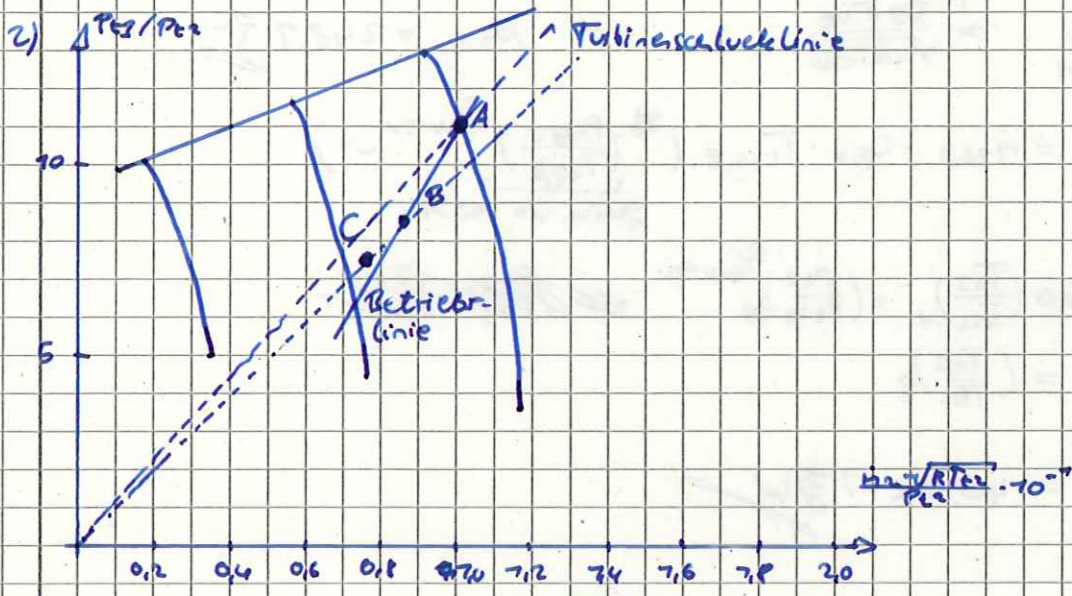
$$Q_{2,B} = 0,275 \rightarrow m_{2,B} = 96,89 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{3,B} = m_{2,B} + m_{IV} ; \quad m_{3,B} = 734,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$m_{IV} = 37,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

# Turbolugtkennwerte-Beispiel 4.2: Prüfungsaufgabe

1)  $M_a = 0,0 \rightarrow T_{t2,A} = T_{t01,t} = T_{0,1} = \underline{\underline{290,46 \text{ K}}}$   
 $P_{t2,A} = P_{t01,t} = P_{0,1} = \underline{\underline{707,325 \text{ kPa}}}$



$\frac{P_{t2,A}}{P_{t01,t}} = \underline{\underline{7,7}}$        $\frac{M_a \sqrt{R t_{01,t}}}{P_{t01,t}} \Big|_A = \underline{\underline{0,7026}}$

3)  $T_{t4,B} = 7250 \text{ K}$  (Pfeile = 0 weil stationär)

$\Pi_{t4,A} = \left[ 1 + k_t \frac{T_{t4,A}}{T_{t2,A}} \right] \frac{c_{p,t} M_a}{R} \Rightarrow k_t = \underline{\underline{0,2387}}$

$\Pi_{t4,A} = \frac{M_a \sqrt{R T_{t2,A}}}{P_{t2,A}} \Big|_A k_t^{-1} \sqrt{\frac{T_{t2,A}}{T_{t4,A}}} \Rightarrow k_t = \underline{\underline{0,02084}}$

$\Pi_{t4,B} = \left[ 1 + k_t \frac{T_{t4,B}}{T_{t2,B}} \right] \frac{c_{p,t} M_a}{R} = \underline{\underline{8,677}}$

$\Pi_{t4,B} = Q_{A2,B} \cdot k_t^{-1} \sqrt{\frac{T_{t2,B}}{T_{t4,B}}} \Rightarrow Q_{A2,B} = \underline{\underline{0,08777}}$

4)  $M_{a,c} = 0,20$

$\Pi_{t4,c} = \left[ 1 + k_t \frac{T_{t4,B}}{T_{t2,B}} \right] \frac{c_{p,t} M_a}{R} = \underline{\underline{7,458}}$

$\Pi_{t4,c} = Q_{A2,c} \cdot k_t^{-1} \sqrt{\frac{T_{t2,B}}{T_{t4,B}}} \Rightarrow Q_{A2,c} = \underline{\underline{0,07492}}$

Punkt C liegt auf gleicher Turbinenschubachse wie B

# Turboflughelicopter - Beispiel 43: Klausuraufgabe

$$1) \frac{m_{1,A} \cdot \sqrt{r T_{e2,A}}}{A_1 P_{e2,A}} \stackrel{!}{=} \frac{m_{1,B} \cdot \sqrt{r T_{e2,B}}}{A_2 P_{e2,B}} \rightarrow m_{1,B} = 80,66 \frac{kg}{s}$$

$$2) \frac{D_{1,A} N_{1,A}}{\sqrt{r T_{e2,A}}} \stackrel{!}{=} \frac{D_{1,B} N_{1,B}}{\sqrt{r T_{e2,B}}} \rightarrow N_{1,B} = 248,3 \frac{1}{s}$$

$$3) P_{v1,B} = m_{1,B} \cdot c_{p,v} \cdot T_{e2,B} \left( \frac{P_{e2,B}}{P_{e2,A}} \right)^{\frac{1}{\gamma_{v1}}} \rightarrow$$

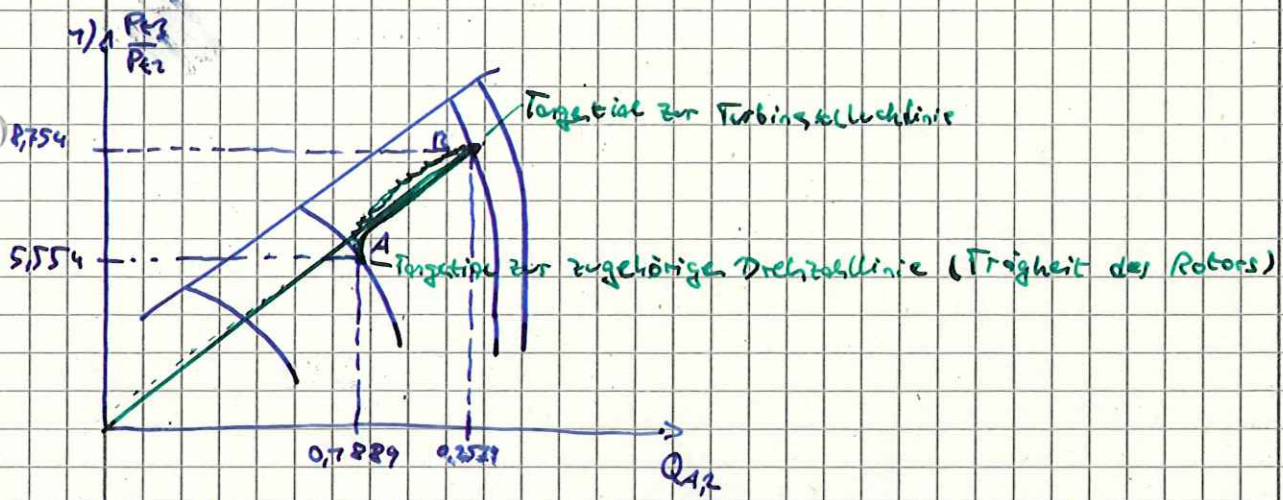
gleiches wie bei A

~~$$\left( \frac{T_{e3}}{T_{e2}} \right)_A = \left( \frac{P_{e3}}{P_{e2}} \right)_A$$~~

$$\left( \frac{T_{e3}}{T_{e2}} \right)_A = \left( \frac{T_{e3}}{T_{e2}} \right)_B$$

$$P_{v1,B} = 40,0271 \frac{W}{kg}$$

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 44:



2)  $k_1, k_2$  über Betriebspunkte konstant ;  $\dot{m}_4 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{BR}$

$$k_2 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\dot{m}_3 \sqrt{R_2 T_{E2}}}{P_{E2}} \cdot \sqrt{\frac{T_{E4}}{T_{E2}}} = 0,06485$$

$$k_1 = \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_2} \cdot \frac{\dot{m}_4}{\dot{m}_3} \cdot \frac{C_{p,7}}{C_{p,4}} \cdot \left(1 - \frac{T_{E5}}{T_{E4}}\right) = 0,2752$$

~~bei konstanten Betriebspunkten~~

$$\pi_{V,12} = \left(1 + k_1 \cdot \frac{T_{E4}}{T_{E2}}\right)^{\frac{C_{p,7} \dot{m}_4}{R}} = 8,754$$

$$Q_{12,B} = \pi_{V,12} \cdot k_2 \cdot \sqrt{\frac{T_{E2}}{T_{E4}}} = 0,2539$$

3) siehe Skizze oben

4) ~~bei konstanten Betriebspunkten~~  $k_1$  nicht mehr gleich, weil Wellerleistungs-  
~~gleichgewicht~~ Gleichgewicht nicht mehr gegeben ist!

$k_2$  aus Massenerhaltung bleibt konstant!

$$\dot{m}_2 = 0,2539 = Q_{12,B} = \frac{\dot{m}_2 \sqrt{R T_{E2}}}{P_{E2}} \rightarrow \dot{m}_2 = 86,08 \frac{kg}{s} = \dot{m}_{2,c}$$

$$k_2 = \dots = 0,06485$$

$$\rightarrow \pi_{V,c} = 8,755$$

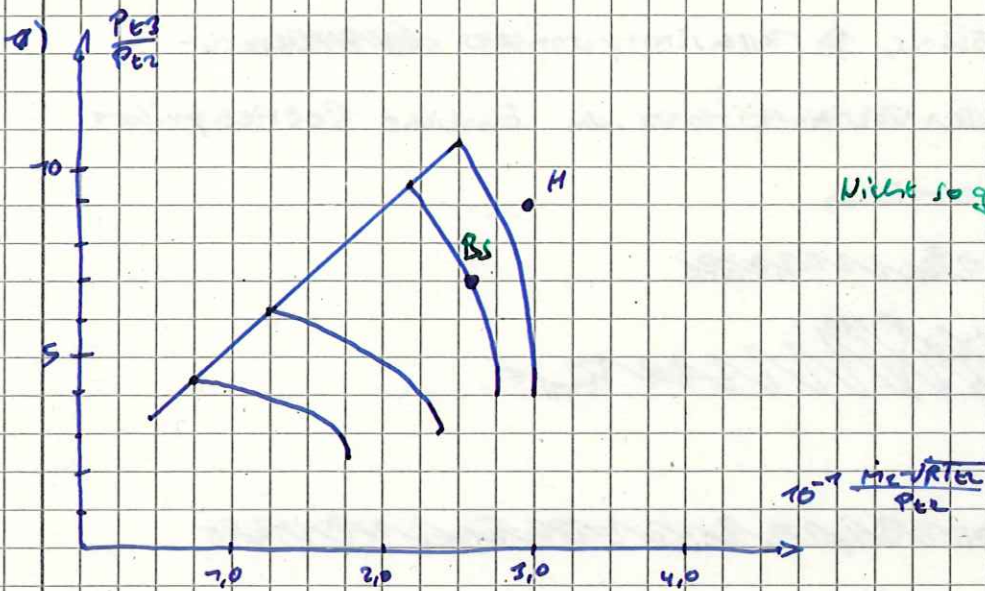
$$\pi_{V,c} = \left(1 + k_1 \frac{T_{E4}}{T_{E2}}\right)^{\frac{C_{p,7} \dot{m}_4}{R}}$$

$$\rightarrow k_{1,c} = 0,7794$$

$$Q_{12,c} = \pi_{V,c} \cdot k_2 \cdot \sqrt{\frac{T_{E2}}{T_{E4}}} = 0,2378$$

⚡ Fehler in Annahmen?

# Turboflugtriebwerke - Übung 45: Prüfungsaufgabe



Nicht so genau gezeichnet

$$\frac{P_{02}}{P_{02}|_{BS}} = 7,4$$

$$\frac{10^{-7} \sqrt{T_{02}}}{P_{02}} |_{BS} = 0,27$$

- 2) In BS-Fall liegt am Austritt der Düse der statische Druck der Umgebung an, es gilt also:

$$P_{02,BS} = P_{0,BS} = 101325 \text{ Pa}$$

- 3)  $\frac{P_{01,BS}}{P_{02,BS}} = 3,556 \rightarrow$  Überschallströmung, nicht angepaßt:

$$\frac{F_g}{A_1 P_0} = 2 \frac{P_{01}}{P_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \rightarrow F_g = 9,745 \cdot 10^4 \text{ N}$$

4)  $\frac{T_{01,BS}}{T_{02}} = \frac{10^{-7} \sqrt{T_{02}}}{P_{02}} \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{T_{02}}{T_{02}}} |_{BS} \rightarrow k_2 = 0,08352$

$$T_{01,BS} = \left[ 1 + k_2 \frac{T_{02}}{T_{02}} \right]^{cp \cdot T_{02}/R} \rightarrow k_2 = 0,7699$$

$$T_{01,H} = Q_{air,H} \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{T_{02}}{T_{02}}} |_H ; T_{02,H} = T_{0,H} \left( 1 + \frac{k_2}{2} M_2^2 \right) = 229,7 \text{ K}$$

$$T_{01,H} = \left[ 1 + k_2 \frac{T_{02}}{T_{01,H}} \right]^{cp \cdot T_{02}/R}$$

$$T_{01,H} = 8,495 ; Q_{air,H} = 0,2892$$

- 5) In H-Fall liegt am Austritt der Düse der statische Druck der Umgebung an, es gilt also

$$P_{02,H} = P_{0,H} = 23,8 \text{ kPa}$$

- 6) Düse noch immer nicht angepaßt;  $\frac{P_{02}}{P_{02}|_{BS}} = k_5 \cdot T_{01,BS} \rightarrow k_5 = 0,4806$

$$k_5/H = \frac{P_{02}}{P_{02}|_H}$$

$$P_{02,H} = P_{02} \cdot T_{01,H} ; P_{02} = P_0 \cdot \left( 1 + \frac{k_2}{2} M_2^2 \right)^{\frac{k_2}{k-1}} = 28,23 \text{ kPa}$$

$$P_{01} = 175,2 \text{ kPa} ; \frac{F_g}{A_1 P_0} = 2 \frac{P_{01}}{P_0} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \rightarrow$$

$$F_g = 3,757 \cdot 10^4 \text{ N}$$

leicht anders wegen anderer Methode für  $k_2$ , sollte aber trotzdem stimmen

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 46: Prüfungsaufgabe

1) Druckverhältnis, Massenstromparameter ~~...~~  
 Parameter müssen übereinstimmen, um ähnliche Betriebspunkte  
 der Düse zu erreichen

~~...~~

~~$$\frac{P_{2,1}}{P_{2,H}} = \left( \frac{T_{2,1}}{T_{2,H}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$~~

~~...~~

~~$$P_{2,1} = P_{2,H} \left( \frac{T_{2,1}}{T_{2,H}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$~~

2)  $P_{10,E} = P_{10,H}$

$$\left( \frac{P_{2,E}}{P_{2,H}} \right) = \left( \frac{T_{2,E}}{T_{2,H}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \longrightarrow T_{2,E} = 523,8 \text{ K}$$

$$\left( \frac{P_{2,E}}{P_{2,H}} \right) = \left( \frac{P_{2,H}}{P_{2,H}} \right) \longrightarrow T_{2,E} = 310 \text{ K}$$

3)  $P_{1,max} = \eta_{in} \cdot c_p \cdot T_{2,1} \cdot [\pi \cdot v^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1] \xrightarrow{L_2=T_2=T_0} \dot{m}_{2,E} = 702,4 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

~~$$\frac{P_{2,E}}{P_{2,H}} = \left( \frac{T_{2,E}}{T_{2,H}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \longrightarrow T_{2,E} = 222,6 \text{ K}$$~~

$$\frac{\dot{m}_{2,E} \sqrt{T_{2,E}}}{A_E P_{2,E}} = \frac{\dot{m}_{2,H} \sqrt{T_{2,H}}}{A_H P_{2,H}} \longrightarrow \dot{m}_{2,E} = 276,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$P_{out} = 48,74 \text{ MW} > P_{max}$   $\frac{1}{2}$  kann nicht betrieben werden

4)  $P_{out} = 30,07 \text{ MW}$

$$\dot{m}_{out} = 135 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = \dot{m}_{2,E}$$

$$\frac{\dot{m}_{2,E} \sqrt{T_{2,E}}}{A_E P_{2,E}} = \frac{\dot{m}_{2,H} \sqrt{T_{2,H}}}{A_H P_{2,H}}$$

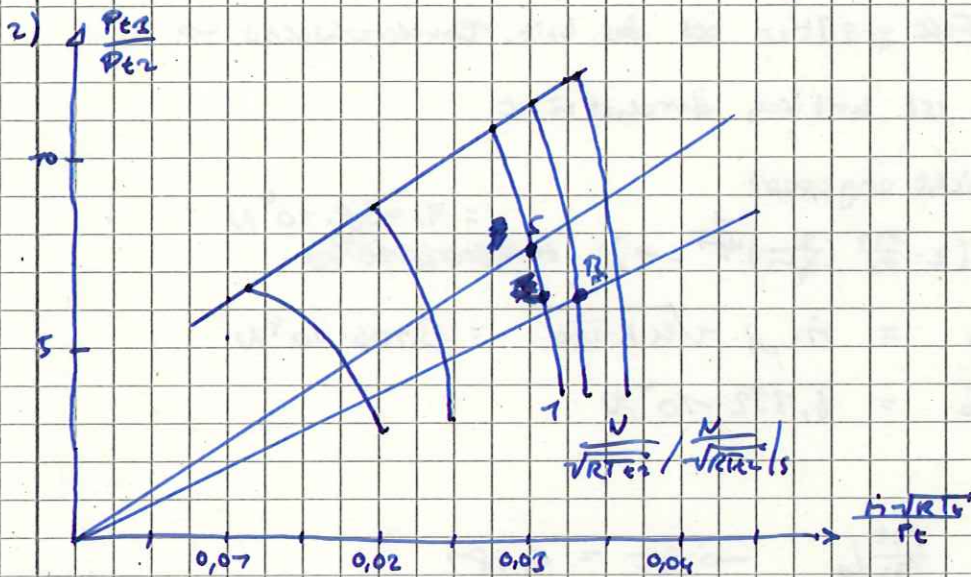
$$A_E = 0,6233 \cdot A_H \longrightarrow \frac{D_D}{D_H} = \sqrt{0,6233} = 0,7895 \approx 7,267$$

$$\pi r_E^2 = 0,6233 \pi r_H^2 \longrightarrow$$

# Turbofluttriebwerke - Übung 42: Prüfungsaufgabe

$$1) P_{t2,5} = P_{0,5} \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} = 60,62 \text{ kPa}$$

$$T_{t2,5} = T_{0,5} \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right] = 288,2 \text{ K}$$



$$\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \Big|_S = 7,0$$

$$\frac{\sqrt{T_{t3}}}{\sqrt{T_{t2}}} \Big|_S = 0,02999$$

3) B befindet sich wegen Trägheit des Rotors auf gleicher Drehzahllinie wie S.

$$\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \Big|_B = 6,2$$

$$\frac{\sqrt{T_{t3}}}{\sqrt{T_{t2}}} \Big|_B =$$

↳ Gilt nur wenn auch gleiche Umgebungsbedingungen gesetzt würden.

Wegen veringerteter Machzahl gilt aber:

$$P_{t2/B} = P_{0,5} \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} = 53,38 \text{ kPa}$$

$$T_{t2/B} = T_{0,5} \left[ 1 + \frac{k-1}{2} M_0^2 \right] = 277,9 \text{ K}$$

$$\frac{\sqrt{T_{t3}}}{\sqrt{T_{t2}}} \Big|_B = 7,078 \approx 7,02$$

Punkt B liegt auf Drehzahllinie  $\pi_{0,02}$  und bei  $\pi_{0,02} = 6,2$

$$\text{mit } \frac{\sqrt{T_{t3}}}{\sqrt{T_{t2}}} \Big|_B = 0,0325 \text{ m}^2 \rightarrow \pi_{0,02} = 6,743 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4) ~~Skizze des Verdichters~~  $P_{t3} \approx P_{t2}$

~~$$P_{t3} = P_{t2} \left( \frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left( \frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$~~

~~Skizze des Verdichters~~

~~Skizze des Verdichters~~

$$k_{0,5} = \frac{1}{\pi_{0,5}} Q_{0,5} \sqrt{\frac{T_{t0,5}}{T_{t0,5}}} = 0,009099$$

$$T_{t4,B} = 837,3 \text{ K}$$

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 48: Prüfungsaufgabe

1) ~~Die Düse ist nicht angepaßt~~

$$\frac{p_{01}}{p_0} = 5,734 > \pi_{\text{krit}}$$

Auf jeden Fall größer als das krit. Druckverhältnis  $\rightarrow$   
 Querschnitt ist kritisch durchströmt

2) Düse ist nicht angepaßt

$$F_{q,A} = A_q \cdot p_0 \left( 2 \cdot \frac{p_{01}}{p_0} \left( \frac{2}{\gamma_{q,A}} \right)^{\frac{1}{\gamma_{q,A}}} - 1 \right) = 9,438 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$F_{0,A} = \dot{m}_0 \cdot w_0 = \dot{m}_{n,A} \cdot \sqrt{\gamma_{n,A} R T_{e0}} = 3,706 \cdot 10^4 \text{ N}$$

$$F = F_q - F_0 = 6,332 \cdot 10^4 \text{ N}$$

3) ~~Die Düse ist nicht angepaßt~~

$$\frac{p_{01}}{p_{02/A}} = k_{S1} \cdot \frac{p_{02}}{p_{01/A}} \rightarrow k_{S1} = 0,487$$

$p_{02}$  in oberster Zeile schon berechnet:  $p_{02,A} = 706,94 \text{ Pa}$

$$\frac{p_{01/A}}{p_{01/B}} = \frac{k_{S1} \cdot \frac{p_{02}}{p_{01/A}} \cdot \frac{p_{01/A}}{p_0/A}}{k_{S1} \cdot \frac{p_{02}}{p_{01/B}} \cdot \frac{p_{01/B}}{p_0/B}}$$

$$\frac{p_{01}}{p_{01/B}} = \left[ 1 + k_{S1} \cdot \frac{T_{e02}}{T_{e01}} \right]^{1/\gamma_{n,A}} \quad ; \text{ mit } k_{S1} = 0,7764$$

$$\pi_{v,B} = 7,525$$

$$\frac{p_{01}}{p_{01/B}} = 5,57$$

4) Düse ist nicht angepaßt

$$F_q = \left( 2 \cdot \frac{p_{01}}{p_{01}} \left( \frac{2}{\gamma_{q,A}} \right)^{\frac{1}{\gamma_{q,A}}} - 1 \right) A_{q1} \cdot p_0 = 34070 \text{ N}$$

$$F_0 = \dot{m}_0 w_0 = \dot{m}_{n,B} \cdot M_0 \cdot \sqrt{\gamma_{n,B} R T_{e0}}$$

$$k_{S2} = \frac{1}{\pi_{v,A}} \cdot \frac{Q_{n,A,A}}{A_{q,A}} \cdot \sqrt{\frac{T_{e02}}{T_{e01}}} = 0,08356$$

$$\dot{m}_{n,B} = 35,84 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$F_0 = 8457 \text{ N}$$

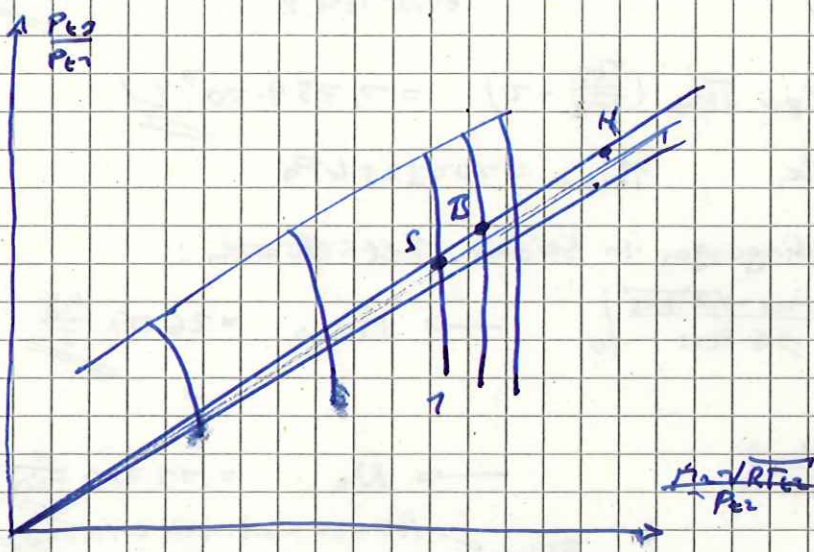
$$F = F_q - F_0 = 25557 \text{ N}$$

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 49: Prüfungsaufgabe

$$1) T_{2z,s} = T_{0,s} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{0,s}^2\right) = 264,7 \text{ K}$$

$$P_{2z,s} = P_{0,s} \cdot \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{0,s}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 44,69 \text{ kPa}$$

2)



Nicht so gut  
gezeichnet, aber  
stimmt...

$$\frac{P_{2z,s}}{P_{0,s}} = 7$$

$$\frac{M_0 \sqrt{\gamma T_{0,s}}}{P_{0,s}} = 0,03$$

$$T_{0,c} = 270,72 \text{ K}$$

$$3) \pi_{v,s} = Q_{A,v,s} \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \sqrt{\frac{T_{0,0}}{T_{2z,s}}} \rightarrow k_2 = 0,009508$$

$$\pi_{v,s} = \left[1 + k_1 \frac{T_{0,0}}{T_{2z,s}}\right]^{c_p \cdot \frac{\gamma}{R}} \rightarrow k_1 =$$

Bisherige Rechnung (noch) nicht nötig...

$$T_{2z,B,c} = T_{0,c} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{0,c}^2\right) = 248,8 \text{ K}$$

4) Anderes  $T_{0,c} \rightarrow$  neue Drehzahlennlinie

$$\frac{M_0 \sqrt{\gamma T_{0,c}}}{P_{0,c}} = 0,03$$

~~$$\frac{P_{2z,s}}{P_{0,s}} = \left(\frac{P_{2z,B,c}}{P_{0,c}}\right) \cdot \left(\frac{P_{0,c}}{P_{0,s}}\right) = \frac{P_{2z,B,c}}{P_{0,s}}$$~~

$$\text{Hilfszustand H: } \pi_{v,H} = Q_{A,H} \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \sqrt{\frac{T_{0,0}}{T_{2z,c}}}$$

~~$$\frac{P_{2z,s}}{P_{0,s}} = \frac{P_{2z,H}}{P_{0,s}}$$~~

Bei  $\pi_{v,H}$  ergibt sich  $Q_{A,H} = 0,0476$

B auf Schnittpunkt Turbinenschublinie von H mit Drehzahlennlinie 7,03

# Turboflugtriebwerke-Beispiel 50: Prüfungsaufgabe

$$1) \pi_{HDV,B} = \frac{P_{26,B}}{P_{26,B}} = \underline{\underline{76}}$$

$$\eta_{HDV,B} = \frac{\Delta T_{ev,13}}{\Delta T_{ev}} = \frac{T_{26} \left[ (\pi_{HDV,B})^{\frac{R/c_p}{\gamma}} - 1 \right]}{T_{2,13} - T_{26,B}} = \underline{\underline{0,8598}}$$

$$P_{HDV,B} = \dot{m}_{26} c_{p13} T_{26} \left( \frac{T_{2,13}}{T_{26}} - 1 \right) = \underline{\underline{7,759 \cdot 10^7 \text{ W}}}$$

$$2) T_{26,0} = 288,15 \text{ K} \quad P_{26,0} = 707,325 \text{ kPa}$$

Damit ähnliche Bedingungen in beiden Betriebsarten:

$$\frac{\dot{m}_{26} \sqrt{T_{26}}}{A_6 P_{26}} \Big|_B = \frac{\dot{m}_{26} \sqrt{T_{26}}}{A_6 P_{26}} \Big|_0 \rightarrow \dot{m}_{26,0} = \underline{\underline{26,09 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$$

Sowie

$$\frac{\sigma \pi N}{\sqrt{K T_{26}}} \Big|_B = \frac{\sigma \pi N}{\sqrt{K T_{26}}} \Big|_0 \rightarrow N_0 = \underline{\underline{73780 \frac{1}{\text{s}}}}$$

~~$P_{HDV,0} = \dot{m}_{26,0} c_{p13} T_{26,0} \left( \frac{T_{2,13}}{T_{26,0}} - 1 \right) = 2,085 \cdot 10^7 \text{ W}$~~  *stimmt nicht, weil Wirkungsgrad nicht konst.*

$$4) \frac{d\eta}{dt} = \frac{P_6}{0,472 \eta} \rightarrow P_6 = \underline{\underline{2,085 \cdot 10^4 \text{ W}}}$$

$$3) P_{v,0} = \dot{m}_{26,0} c_{p13} T_{26,0} \left( \frac{T_{2,13}}{T_{26,0}} - 1 \right) = \underline{\underline{7,05 \cdot 10^7 \text{ W}}}$$

# Turboflugtriebwerke - Beispiel 57: Prüfungsaufgabe

1) Lösen mit Diagramm:  $\frac{m_2 \sqrt{RT_{t2}}}{P_{t2}} = 0,35$

$\rightarrow \frac{P_{t2}}{P_{t0}} = 0,9994 \rightarrow P_{t0} = 99,6 \text{ kPa} = P_0$

~~Wegen  $\frac{P_{t0}}{P_{t2}} = \frac{T_{t0}}{T_{t2}} \frac{m_2 \sqrt{RT_{t2}}}{m_1 \sqrt{RT_{t1}}}$  ist  $T_{t0} = T_{t2}$~~

Über den Einlauf wird keine Arbeit zu- oder abgeführt,

$T_{t0} = T_{t2} = 280 \text{ K} = T_0$  (weil Bodeneindfakt)

2)  $M_{a0} = 0,3$ ,  $T_0 = 280 \text{ K}$ ,  $P_0 = 99,6 \text{ kPa}$

$\frac{T_{t0}}{T_0} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{a0}^2 \rightarrow T_{t0,B} = 285 \text{ K}$

$\frac{P_{t0}}{P_0} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{a0}^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow P_{t0,B} = 106 \text{ kPa}$

3) ~~Wegen~~  $T_{t4,0} = 7770,24 \text{ K}$

$\left(\frac{T_{t4}}{T_{t2}}\right)_A = 5,327$

$\left(\frac{T_{t4}}{T_{t2}}\right)_B = 6,007$

4)  $Q_A = \frac{m_{2,B} \sqrt{RT_{t4,B}}}{P_{t2,B}}$

Berechnung über  $k_2, m$ :

~~Wegen~~  $\frac{P_{t3}}{P_{t2}} \Big|_A = Q_A \cdot \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{T_{t4,A}}{T_{t2,A}}} \rightarrow k_2 = 0,06726$

$\left(\frac{P_{t3}}{P_{t2}}\right)_A = \left(1 + k_2 \left(\frac{T_{t4}}{T_{t2}}\right)_A\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \rightarrow k_2 = 0,234$

$\left(\frac{P_{t3}}{P_{t2}}\right)_B = 74,87$

$Q_{A,B} = 0,4068$

~~Wegen~~  $P_{t2,B} = 703,9 \text{ kPa}$

Leichte Abweichung wegen anderer Berechnungsmethode von  $k_2$ , sollte aber trotzdem stimmen

# Turbofluttriebwerke Beispiel 52: Prüfungsaufgabe

1) ~~krit. Druckverhältnis~~  $\frac{P_{t9}}{P_0} = 5,734$

krit. Druckverhältnis  $\frac{P_{t9}}{P_0} = 5,734 > \pi_{krit}$

$\pi_{krit} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 7,82$

Düse ist kritisch durchströmt

2) ~~Fluss~~  $\frac{F_9}{A_9 P_0}$

~~Fluss~~ Düse im Flugfall nicht angepasst, nur im Versuch!

$\frac{F_9}{A_9 P_0} = 2 \frac{P_{t9}}{P_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \rightarrow$

$F_9 = 94,38 \text{ kN}$

3) Ähnliche Bedingungen im Versuch:  $\left(\frac{P_{t9}}{P_0}\right)_F \stackrel{!}{=} \left(\frac{P_{t9}}{P_0}\right)_V$

$P_{t9,V} = 520,2 \text{ kPa}$

4) Angepasste Düse im Versuch!

$\frac{F_9}{A_9 P_0} = 2 \frac{k}{k-1} \left(\frac{P_{t9}}{P_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow$

k konstant,  $A_{9,V} = 0,2 \cdot A_{9,F}$

$F_{9,V} = 3,952 \text{ kN}$

$A_{9,F} = \pi r^2$

↳ Funktioniert nicht, aber warum?

$A_{9,V} = \pi \cdot (0,2r)^2$

Mit Formel für nicht-angepasste Düse

$= \pi \cdot r^2 \cdot 0,2^2$

korrekt. richtiger Ergebnis 5,456 kN heraus

$= A_{9,F} \cdot 0,04$

↳ Warum dann "Während des Versuchs entspannt die Modelldüse auf den Umgebungsdruck  $P_{0,V}$ "

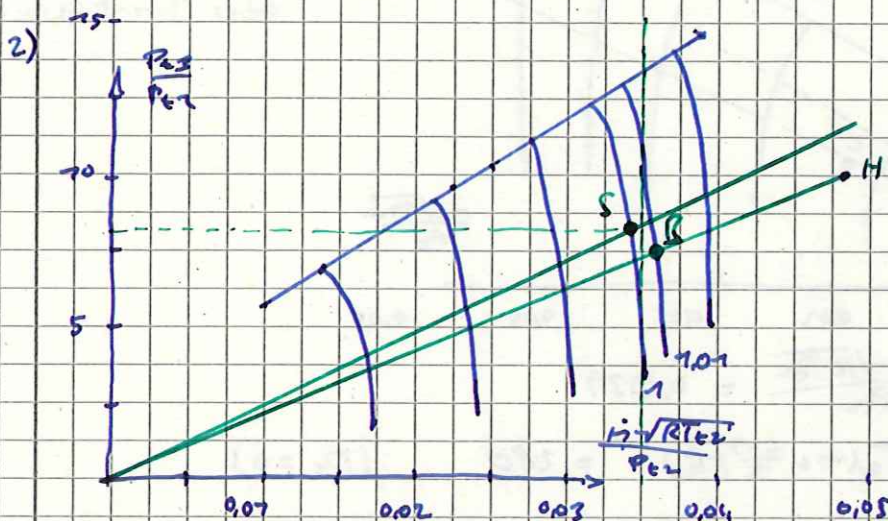


# Turboflughtriebwerke-Beispiel 53: Prüfungsaufgabe

1) Über den Einlauf wird keine Arbeit zu- oder abgeführt

$$T_{t2,5} = T_{e0,5} = T_{0,5} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_0^2 \right) = 260 \text{ K}$$

$$P_{t0,5} = P_{0,5} \cdot \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{0,5}^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 42,28 \text{ kPa} = P_{t2,5}$$



3)  $T_{t2,B} = T_{0,5} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{0,B}^2 \right) = 254,8 \text{ K}$

konstantes  $k_2$

~~$\frac{M_2 \sqrt{\gamma T_{t2}}}{P_{t2}} = \frac{M_2 \sqrt{\gamma T_{t2,B}}}{P_{t2,B}} = \frac{M_2 \sqrt{\gamma T_{t2,5}}}{P_{t2,5}} = 0,009786$~~

~~$\frac{M_2 \sqrt{\gamma T_{t2}}}{P_{t2}} = \frac{M_2 \sqrt{\gamma T_{t2,5}}}{P_{t2,5}} = 0,009786$~~

4) Trägheit des Rotors bewirkt:  $N_S = N_B$

$$\frac{N}{\sqrt{\gamma T_{t2,B}}} / \frac{N}{\sqrt{\gamma T_{t2,5}}} = \sqrt{\frac{T_{t2,B}}{T_{t2,5}}} = 0,9899$$

Betriebspunkt B liegt auf Linie relevanter Drehzahlparameter 7,07

$$P_{t2,B} = P_0 \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{0,B}^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 39,44 \text{ kPa}$$

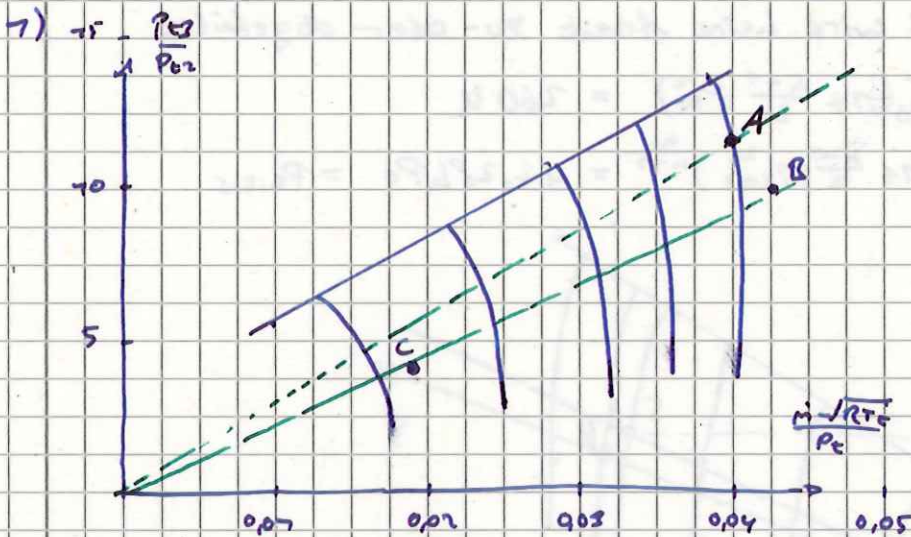
Annahme eines weiteren Hilfspunktes H: bei  $\frac{P_{t3,H}}{P_{t2,H}} = 10$

Vorher berechnetes  $k_2 = 0,009786$

$$\frac{M_2 \sqrt{\gamma T_{t2}}}{P_{t2}} = \frac{1}{k_2} \sqrt{\frac{T_{t2,B}}{T_{t2,5}}} \rightarrow \frac{M_2 \sqrt{\gamma T_{t2}}}{P_{t2}} = 0,0477$$

→ B befindet sich auf gleicher Turbinenschlucklinie wie H

# Turboflughtriebwerke - Beispiel 54 : Prüfungsaufgabe



Skizze nicht so gut gelungen aber stimmt in sich

$$\pi_{V,A} = 10 ; \frac{\dot{m}_2 \sqrt{R T_{02}}}{P_{02}} = 0,039$$

$$T_{02,A} = T_{03,A} = T_{01} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{01}^2 \right) = 280 \quad (M_{01} = 0)$$

$$P_{02,A} = P_{03,A} = P_{01,A} = 100 \text{ kPa}$$

$$2) P_V = \dot{m}_2 (c_p V T_{02} [(\pi_V)^{\frac{R}{c_p M}} - 1]) = 4,4 \cdot 10^6 \text{ W}$$

~~$P_{V,A} = P_{V,B} = P_{V,C} = 4,4 \cdot 10^6 \text{ W}$~~

Triebwerk wird in A stationär betrieben, es gibt also keine Überschussleistungen der Welle  $\rightarrow P_T = P_V = 4,4 \cdot 10^6 \text{ W}$

Musterlösung hat hier anderes Ergebnis  $\rightarrow$  Möglicher Fehler in Mutterlösung  
Weiter mit  $P_V = P_T = 3,659 \cdot 10^6 \text{ W}$

$$3) T_{02,B} = T_{01} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{01,B}^2 \right) = 303 \text{ K}$$

$$T_{02,C} = \dots = 244,4 \text{ K}$$

$$\left( \frac{T_{04}}{T_{02}} \right)_B = 4 \quad \left( \frac{T_{04}}{T_{02}} \right)_C = 4$$

4)  $k_1, k_2$  im Betriebspunkt A :

$$5) \frac{P_{03}}{P_{02}} = \pi_V = \frac{\dot{m}_2 \sqrt{R T_{02}}}{P_{02}} \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \sqrt{\frac{T_{04}}{T_{02}}} \quad k_2 = 0,008875$$

$$\pi_V = \left[ 1 + k_1 \frac{T_{04}}{T_{02}} \right]^{\frac{c_p M V}{R}} \quad k_1 = 0,2764$$

Betriebspunkt B, C :

$$\pi_{V,B} = \left[ 1 + k_1 \frac{T_{04}}{T_{02}} - \frac{P_{Welle}}{\dot{m}_2 c_p T_{02}} \right]^{\frac{c_p M V}{R}} = 9,23$$

$$\pi_{V,C} = \dots = 4,772$$

$$\pi_{V,B} = Q_B \cdot \frac{1}{k_2} \cdot \sqrt{\frac{T_{04}}{T_{02}}} \quad Q_B = 0,04096$$

$$\pi_{V,C} = \dots \quad Q_C = 0,02788$$