

3 Gasdynamik - Düsenströmung

3.1

In einem Grossbehälter wird die Luft bei 8,5 bar gelagert. Über eine gut abgerundete Düse strömt die Luft nach aussen, dabei stellt sich im Ausstromquerschnitt eine Temperatur von 0°C. Errechnen Sie:

- a) den Druck im Ausstromquerschnitt
- b) die Ausstromgeschwindigkeit
- c) den Durchmesser des runden Ausstromquerschnittes wenn der Massenstrom 0,5 kg/s beträgt.

$$p_D = p_L = 4,505 \text{ bar} ; \quad d_D = 18,3 \text{ mm}$$
$$C_D = a = 331 \text{ m/s} ;$$

3.2

Eine einfache abgerundete Düse mit dem Ausströmfaktor von 0,94 wird mit dem überhitztem Dampf von 3,5 bar und 200°C beschickt. Die Ausströmung erfolgt ins Freie.

Errechnen Sie die stündlich ausgeströmte Dampfmenge wenn der engst Düsendurchmesser 20 mm beträgt.

$$\dot{m}_D = 565 \text{ kg/h}$$

3.3

Der Frischdampf von 480°C/45 bar wird in einer runden Laval-Düse auf 890 m/s beschleunigt. Errechnen Sie den engsten und den Austritts-Durchmesser, wenn 1850 kg/h durchströmt werden und der Düsenkoeffizient 0,965 beträgt.

$$d_L = 11,44 \text{ mm} ; \quad d_a = 14,03 \text{ mm}$$

3.4

Der Kompressor einer Druckluftanlage hat einen Gesamtwirkungsgrad von 75 %. Der mittlere Leitungsdruck beträgt 6 bar bei 25°C. Errechnen Sie die tägliche (24 h) finanzielle Einbuße an Antriebsenergie wenn in der Leitung ein rundes Loch von $\emptyset$ 1mm, 2mm, 4mm als Undichtigkeit vorliegt. Den Düsenfaktor hierzu kann man mit $\varphi = 0,65$ annehmen, der Strom-Arbeitspreis beträgt 0,2 DM/kWh.

Hinweis: $c_{pm} = 1,005 \text{ kJ/kgK}$ (konst), Lufteintritt am Kompressor 1 bar/10°C

Komprimierte Luft wird im Trockner auf 25°C gekühlt.

$$0,88 \text{ DM/d} ; \quad 3,51 \text{ DM/d} ; \quad 14,05 \text{ DM/d} ; \quad w_{En} = -190 \text{ kJ/kg}$$

3,5

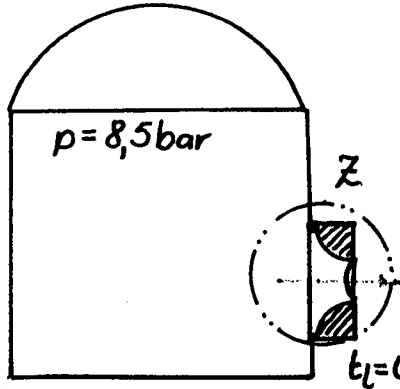
Aus einer Lavaldüse strömt Helium als Idealgas mit $1,5 \text{ Ma}$ in die Atmosphäre aus. Die Messung am Auslass zeigt -70°C und $2,5 \text{ bar}$; welcher Druck und welche Temperatur herrschen im He-Behälter? Welche sind die kritische Daten?

($M_{\text{He}} = 4 \text{ kg/kmol}$; $c_p = \text{konst.} = 5,24 \text{ kJ/kgK}$)

$$p_1 = 10 \text{ bar}; \quad T_1 = 354 \text{ K}; \quad p_L = 4,76 \text{ bar}; \quad T_L = 263 \text{ K}$$

$$c_L = a = 959 \text{ m/s}$$

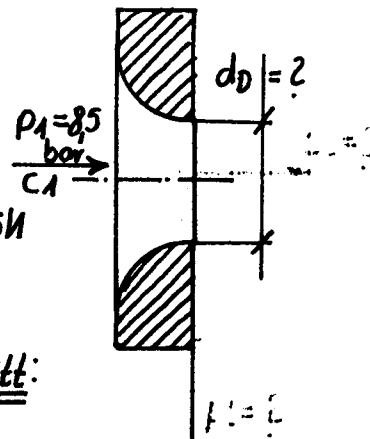
Behälter



$$t_1 = 0^\circ\text{C} \hat{=} T = 273,15\text{K}$$

Düse für Unterschallströmung

Einzelheit Z

a) der Druck im Ausströmquerschnitt:1) Druck im engsten Querschnitt berechnen:

$$p_L = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \cdot p_1$$

$$p_L = \left(\frac{2}{1,4 + 1} \right)^{\frac{1,4}{1,4 - 1}} \cdot 8,5 \text{ bar} = \underline{4,49 \text{ bar}} \hat{=} \text{Druck am Ausströmquerschnitt.}$$

0,528 Konst. Wert, kann aus Formelsammlung entnommen werden, muß normal wie hier nicht nochmals berechnet werden.

b) die Geschwindigkeit c_L im engsten Querschnitt:

$$c_L = \sqrt{\kappa \cdot T_L \cdot R}$$

$$c_L = \sqrt{1,4 \cdot 273,15\text{K} \cdot 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}} = \underline{331 \text{ m/s}}$$

 $\kappa = 1,4$ für Luft für Luft $\kappa = 1,4$
 T_L = Temperatur am engsten Querschnitt

 $R = 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ für Luft $R = 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
c) den Durchmesser des runden Ausströmquerschnittes wenn der Massenstrom $0,5 \text{ kg/s}$ beträgt:

1.)

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{m} \cdot R \cdot T_L}{p_L}$$

$$\dot{V}_L = \frac{0,5 \text{ kg/s} \cdot 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 273,15\text{K}}{4,49 \text{ bar} \cdot 10^5} = 0,087 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

2.) Berechnung des Austrittsquerschnitts:

$$A = \frac{\dot{V}_L}{c_L \cdot \rho_D}$$

$$A = \frac{0,087 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{331,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \underline{\underline{0,000262601 \text{m}^2}}$$

Da es nicht spezifiziert ist, ob es sich um ein ideales Gas handelt, wird die ideale Gasgleichung verwendet:

$\rho_D = \text{Werkstoffdichte des Gases}$

3.) Berechnung des Austrittsdurchmessers:

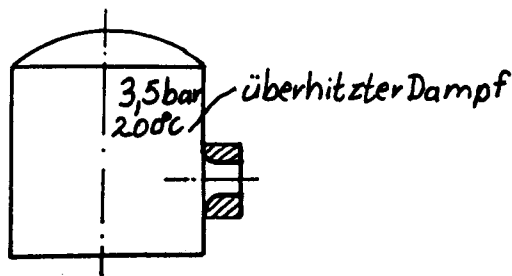
$$d_D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$$

$$d_D = \sqrt{\frac{4 \cdot 264 \text{mm}^2}{\pi}} = \underline{\underline{18,33 \text{mm}}}$$

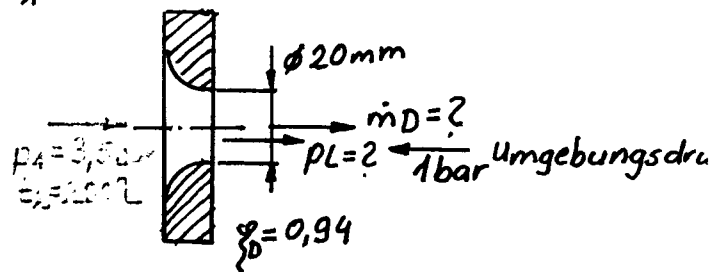
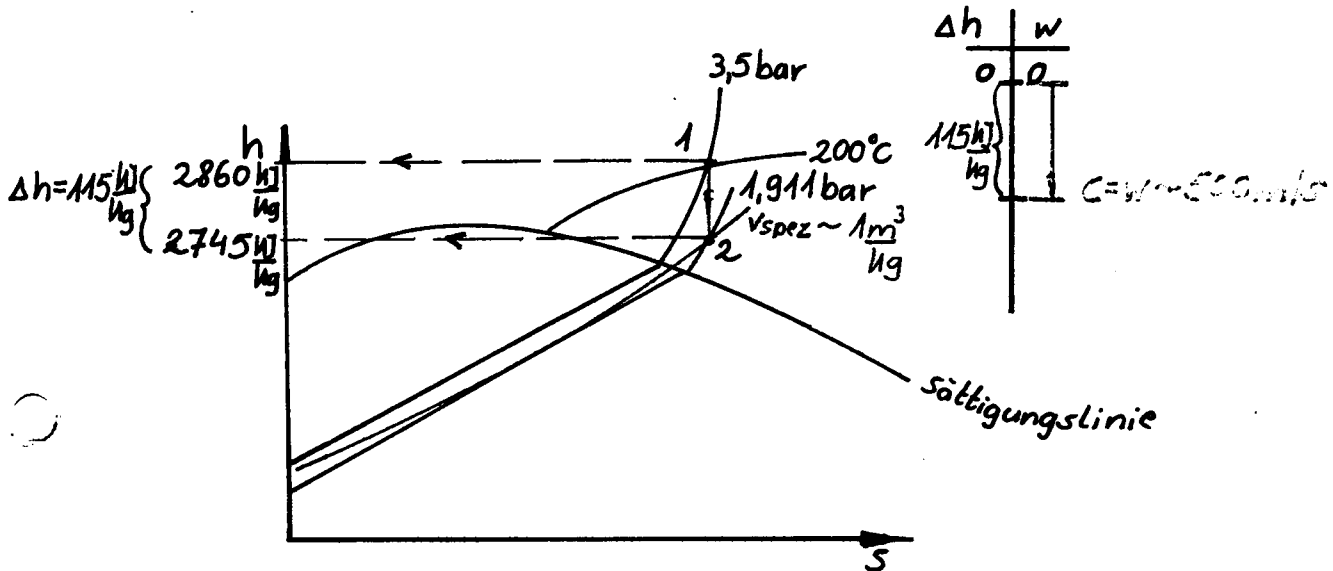
$$A_{\text{min}} = \dot{m} \cdot \sqrt{\frac{R_L \cdot T_1}{\kappa \cdot p_1^2}} \cdot \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}$$

$$d_D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \rightarrow d_D = 17,5 \text{ mm}$$

3.2



- 1 -

Nomogramm1. Zunächst Druck am Düsenaustritt berechnen:

$$\frac{p_2}{p_1} = 0,546 \text{ für Heißdampf}$$

$$\downarrow p_2 = 0,546 \cdot p_1 \quad p_2 = 0,546 \cdot 3,5\text{ bar}$$

$$p_2 = \underline{\underline{1,911\text{ bar}}}$$

2) Strömungsverlauf ins h-s Diagramm einzeichnen!2.1) Punkt 1: $t_1 = 200^\circ\text{C}$ $p_1 = 3,5\text{ bar}$

2.2) Aus Punkt 1 senkrechte Linie nach unten ziehen. Schnitt mit Drucklinie 1,911 bar ergibt Punkt 2.

2.3) h_1 und h_2 ablesen $h_1 = 2860\text{ kJ/kg}$ $h_2 = 2745\text{ kJ/kg}$ 2.4) Δh berechnen: $\Delta h = h_1 - h_2$ $\Delta h = 2860\text{ kJ/kg} - 2745\text{ kJ/kg} = \underline{\underline{115\text{ kJ/kg}}}$ 2.5) $\Delta h = 115\text{ kJ/kg}$
mit Δh im Nomogramm die Strömungsgeschwindigkeit im engs Querschnitt ablesen.abgelesen $c = w = 500\text{ m/s}$ theoretische Geschwindigkeit! 160

2.6) oder Volumen des Dampfes in P. 1 & 2

abgelesen $v_1 = 0,16\text{ m}^3/\text{kg}$ 13

- 3.) Berechnung der praktischen Düsengeschwindigkeit in der engsten Stelle der Düse:

$$c_{\text{prakt}} = c_{\text{is}} \cdot \eta_D$$

$$c_{\text{prakt}} = 500 \text{ kJ/kg} \cdot 0,94 = \underline{\underline{470 \text{ m/s}}}$$

- 4.) Volumenstrom im engsten Querschnitt berechnen:

$$\dot{V}_L = A \cdot c_L$$

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} ; d = 0,02 \text{ m} \hat{=} 20 \text{ mm}$$

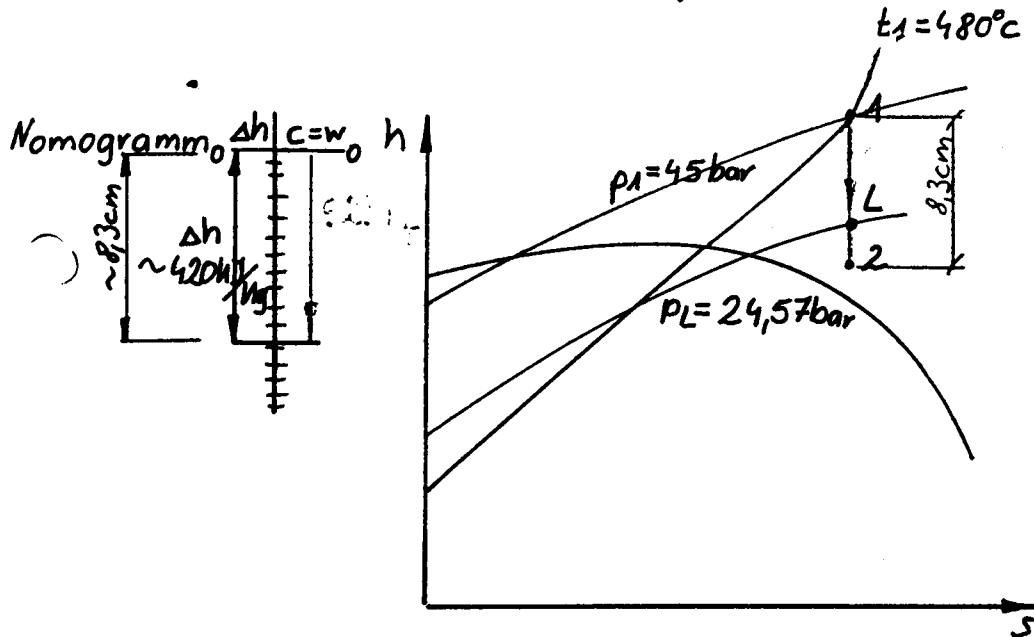
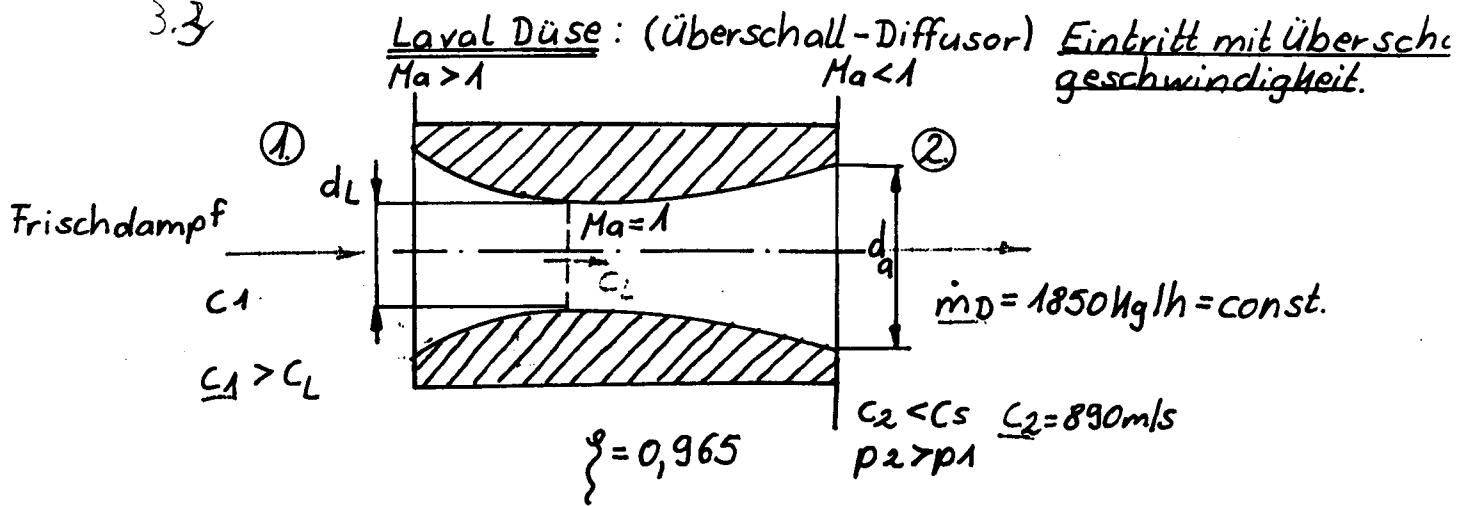
$$\dot{V}_L = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot c_{\text{prakt}} = \frac{(0,02 \text{ m})^2 \cdot \pi}{4} \cdot 470 \text{ m/s} = \underline{\underline{0,148 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}} \\ \hat{=} \underline{\underline{532 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}}$$

- 5.) Berechnung des Massenstrom $\dot{m}_D$:

$$\dot{m}_D = \frac{\dot{V}_L}{v_{\text{spez}}}$$

$$\dot{m}_D = \frac{532 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{1 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = \underline{\underline{532 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}} \quad \text{Lösung der Aufgabe.}$$

3.3



1.) Einzeichnen von Punkt 1 ins h-s Diagramm

mit: überhitzter Dampf $t_1 = 480^\circ \text{C}$; $p_1 = 45 \text{ bar} \rightarrow$ Punkt 1

2.) Praktische Düsenaustrittsgeschwindigkeit umrechnen in theoretische Düsenaustrittsgeschwindigkeit

$$c_{\text{prakt}} = c_{\text{theo}} \cdot \varphi_D \quad \left| \quad \frac{c_{\text{prakt}}}{\varphi_D} = \frac{890 \text{ m/s}}{0,965} = \underline{\underline{922,28 \text{ m/s}}} = c_{\text{theo}}$$

Man braucht die the. Geschw. da diese eine Gerade im h-s-Diagramm darstellt.

3.) Mit der theoretischen Geschwindigkeit ins Nomogramm gehen und die dazu gehörende Enthalpiedifferenz ablesen.

abgelesen $\sim \Delta h = 420 \text{ kJ/kg}$

4.) Δh in mm im Nomogramm abmessen und gemessene Strecke an Punkt 1 senkrecht nach unten ansetzen.

gemessen $\sim 8,3 \text{ cm}$

Ergebnis: Punkt 2, mit den dortigen Linienzügen kann man die Zustandswerte des aus der Düse austretenden Dampfes ablesen.

5.) Ermittlung des Punktes desengsten Düsenquerschnitts im h-s Diagramm

hierzu zunächst:

$$\frac{p_L}{p_1} = 0,546 \text{ f. überh. Dampf} \quad \downarrow \quad p_L = p_1 \cdot 0,546 = 45 \text{ bar} \cdot 0,546$$

$$p_L = \underline{\underline{24,57 \text{ bar}}}$$

0,546 f. überh. Dampf aus Formelsammlung

Im h-s Diagramm $\bar{12}$ schneidet Drucklinie p_L 24,57 bar.

Ergebnis Punkt L.

6.) Ablesen der spez. Volumina in den Punkten 2 und L.

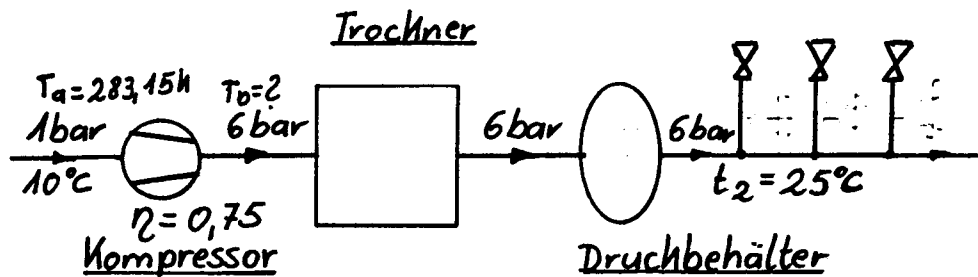
$$\text{abgelesen: } v_{\text{spez}2} = \underline{\underline{0,27 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}} \quad v_{\text{spez}L} = \underline{\underline{0,11 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}}$$

7.) Strecke $\bar{1L}$ im h-s Diagramm abmessen und im Nomogram Geschwindigkeit $c_{L\text{theo}}$ ablesen.

$$\text{abgelesen: } \underline{\underline{600 \text{ m/s}}} = c_{L\text{theo}}$$

8.) Berechnung der erforderlichen Durchmesser:

$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_{\text{spez}}}$	$\dot{V}_L = \dot{m} \cdot v_{L\text{spez}}$ $\dot{V}_L = \frac{1850 \text{ kg/h}}{3600} \cdot 0,11 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \underline{\underline{0,0565 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}$	$\dot{V}_2 = \dot{m} \cdot v_{2\text{spez}}$ $\dot{V}_2 = \frac{1850 \text{ kg/h}}{3600} \cdot 0,27 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \underline{\underline{0,13875 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}$
$A = \frac{\dot{V}}{c \cdot \rho_D}$	$A_L = \frac{\dot{V}_L}{c_{L\text{theo}} \cdot \rho_D} = \frac{0,0565 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{600 \text{ m/s} \cdot 0,965}$ $A_L = \underline{\underline{0,000097582 \text{ m}^2}}$	$A_2 = \frac{0,13875 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{922,28 \text{ m/s} \cdot 0,965} = 0,00015$ $A_2 = \underline{\underline{0,0001559 \text{ m}^2}}$
$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$	$d_L = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$ $d_L = \sqrt{\frac{4 \cdot 97,582 \text{ mm}^2}{\pi}} = \underline{\underline{11,65 \text{ mm}}}$	$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}}$ $d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 155,9 \text{ mm}^2}{\pi}} = \underline{\underline{14,09 \text{ mm}}}$



1) Bestimmung des Luftdrucks in der Düse: $\frac{p_D}{p_1} = 0,528 \sim 0,53$

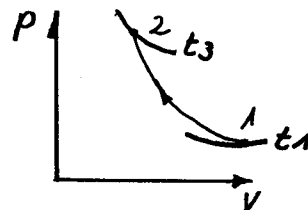
$$\boxed{\frac{p_D}{p_1} = \frac{p_L}{p_1}} \quad \rightarrow \quad \frac{p_D}{p_1} \cdot p_1 = p_L = 0,53 \cdot 6 \text{ bar} = \underline{\underline{3,18 \text{ bar}}}$$

2) Berechnung der Düsen geschwindigkeit der Luft:

$$\boxed{c_D = a = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa + 1} \cdot R \cdot T_1}} \quad c_D = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{2,4} \cdot 287,2 \cdot 298,15 \text{ K}} = \underline{\underline{315,9 \text{ m/s}}}$$

3) Temperatur in der Düse berechnen:

$$\boxed{\frac{T_L}{T_2} = \left(\frac{p_L}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}$$



$$\rightarrow T_L = T_2 \cdot \left(\frac{p_L}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 298,15 \text{ K} \cdot \left(\frac{3,18 \text{ bar}}{6 \text{ bar}}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = \underline{\underline{248,7 \text{ K}}}$$

4) Berechnung der Luftdichte in der Düse:

$$\boxed{\rho_L = \frac{p_L}{R \cdot T_L}} \quad \rho_L = \frac{3,18 \text{ bar} \cdot 10^5}{287,2 \cdot 248,7 \text{ K}} = \underline{\underline{4,452 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

5) Berechnung des spezifischen Luftvolumens in der Düse:

$$\boxed{v = \frac{1}{\rho}} \quad v_L = \frac{1}{\rho_L} = \frac{1}{4,452 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,225 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad \text{nicht notwendig!}$$

6.) Berechnung der einzelnen Massenströme:

$d_1 = 1 \text{ mm}$

$$\dot{m}_{L1} = A_1 \cdot c_D \cdot \rho_0 \cdot g_L = \frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} \cdot c_D \cdot \rho_0 \cdot g_L$$

$$\dot{m}_{L1} = \frac{(1 \text{ mm})^2 \cdot \pi}{4} \cdot 315,9 \text{ m/s} \cdot 0,65 \cdot 4,452 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{\underline{0,000718 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$$

in m umwandeln $\cdot 10^{-3}$

$d_2 = 2 \text{ mm}$

$$\dot{m}_{L2} = A_2 \cdot c_D \cdot \rho_0 \cdot g_L = \frac{d_2^2 \cdot \pi}{4} \cdot c_D \cdot \rho_0 \cdot g_L$$

$$\dot{m}_{L2} = \frac{(2 \text{ mm} \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4} \cdot 315,9 \text{ m/s} \cdot 0,65 \cdot 4,452 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{\underline{0,00287 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$$

$d_3 = 4 \text{ mm}$

$$\dot{m}_{L3} = A_3 \cdot c_D \cdot \rho_0 \cdot g_L = \frac{d_3^2 \cdot \pi}{4} \cdot c_D \cdot \rho_0 \cdot g_L$$

$$\dot{m}_{L3} = \frac{(4 \text{ mm} \cdot 10^{-3})^2 \cdot \pi}{4} \cdot 315,9 \text{ m/s} \cdot 0,65 \cdot 4,452 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{\underline{0,0115 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$$

7.) Berechn. der Temperatur Kompressoraustritt: Isentrope

$$\begin{array}{cc} T_a = 283,15 \text{ K} & T_b = ? \\ p_a = 1 \text{ bar} & p_b = 6 \text{ bar} \end{array}$$

(a)  (b)

$$\frac{T_a}{T_b} = \left(\frac{p_a}{p_b} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\uparrow T_b = \frac{T_a}{\left(\frac{p_a}{p_b} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} = \frac{283,15 \text{ K}}{\left(\frac{1 \text{ bar}}{6 \text{ bar}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = \underline{\underline{472,19 \text{ K}}}$$

8.) Berechnung der technischen spez. Arbeit:

$$w_{\text{tab}} = h_1 - h_2 = c_{p,m} \cdot (T_a - T_b)$$

$$w_{\text{tab}} = 1,005 \text{ kJ/kgK} \cdot (283,15 \text{ K} - 472,19 \text{ K}) = -189,9852 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \sim \underline{\underline{-190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}}$$

9.) Berechnung der zusätzlich vom Kompressor aufgebracht werden muß.

$$P = w_{\text{tab}} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{nom}}} \cdot \dot{m}_{Li}$$

$$P_1 = -190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot 0,000718 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = \underline{\underline{-0,182 \text{ kW}}}$$

$$P_2 = -190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot 0,00287 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = \underline{\underline{-0,73 \text{ kW}}}$$

$$P_3 = -190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot 0,0115 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = \underline{\underline{-2,92 \text{ kW}}}$$

10.) Berechnung der Leistung von 24 Stunden:

$$P_i \cdot 24h = P_{i24h}$$

$$P_1 \cdot 24h = -0,182 \text{ kW/h} \cdot 24h = \underline{\underline{-4,368 \text{ kW}_{24h}}} = P_{124h}$$

$$P_2 \cdot 24h = -0,73 \text{ kW/h} \cdot 24h = \underline{\underline{-17,52 \text{ kW}_{24h}}} = P_{224h}$$

$$P_3 \cdot 24h = -2,92 \text{ kW/h} \cdot 24h = \underline{\underline{-70,08 \text{ kW}_{24h}}} = P_{324h}$$

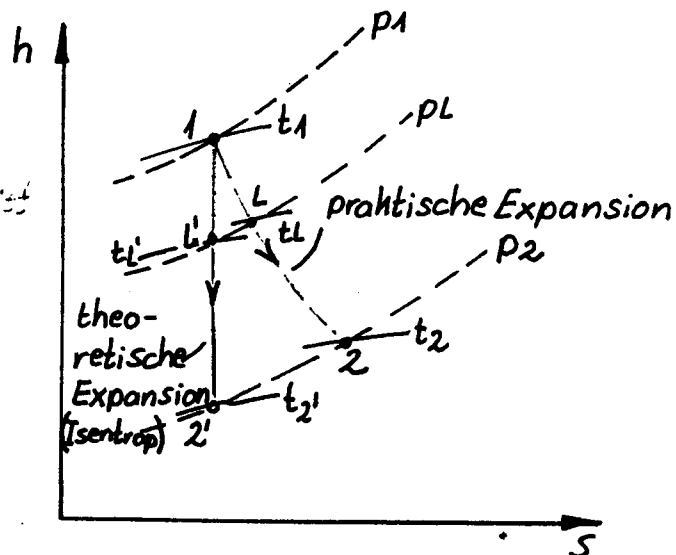
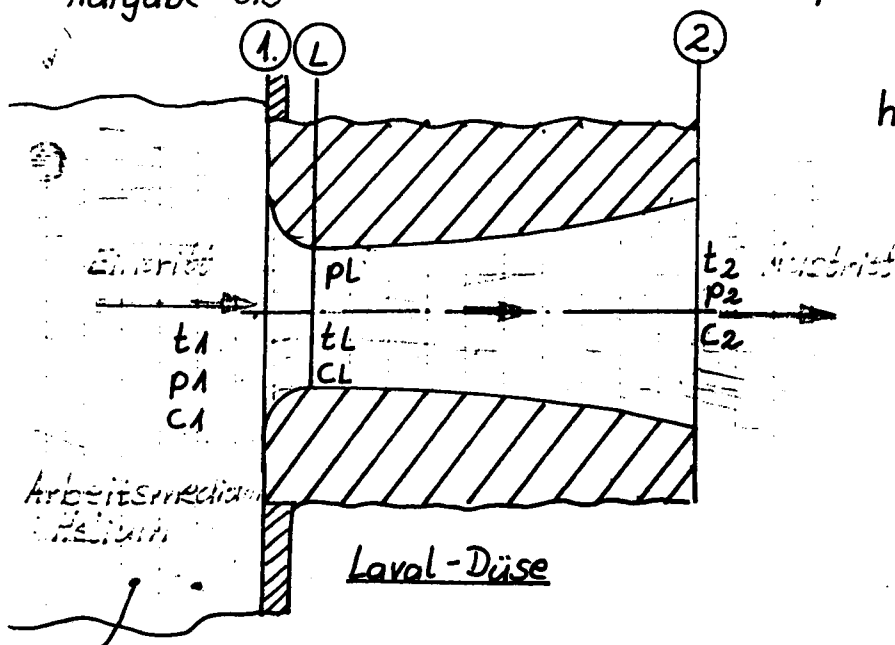
11.) Preisberechnung für den jeweiligen Durchmesser:

$$\text{Preis}_i = P_{i24h} \cdot \text{Strompreis}$$

$$\text{Preis}_1 = P_{124h} \cdot 0,2 \text{ DM/kWh} = -4,368 \cdot 0,2 = \underline{\underline{0,8736 \text{ DM}}} \text{ f. } d_1=1,$$

$$\text{Preis}_2 = P_{224h} \cdot 0,2 \text{ DM/kWh} = -17,52 \cdot 0,2 = \underline{\underline{3,504 \text{ DM}}} \text{ f. } d_2=2,$$

$$\text{Preis}_3 = P_{324h} \cdot 0,2 \text{ DM/kWh} = -70,08 \cdot 0,2 = \underline{\underline{14,02 \text{ DM}}} \text{ f. } d_3=4,$$



He-Behälter 1.) Berechnung der Schallgeschwindigkeit lokal für Pkt. 2

$$a_2 = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_2}$$

$$a_2 = 1,657 \cdot 2077,3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273,15 - 70) \text{K} = \underline{\underline{836,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

$$R = \frac{R_u}{M_{\text{He}}} = \frac{8315}{4} = 2077,3 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$2.) \quad Ma = \frac{c_2}{a_2} \quad \wedge \quad c_2 = Ma \cdot a_2 \quad c_2 = 1,5 \cdot 836,22 \text{ m/s} = \underline{\underline{1254,33 \text{ m/s}}}$$

3.) Berechnung der Temperatur T_1 an der Eintrittsstelle:

$$a.) \quad c_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)}$$

meist für Dampf
mit Formel b.)

$$b.) \quad c_2 = \sqrt{2 \cdot c_{pm} \cdot \Delta t}$$

meist für Gase

$$\Delta t = T_1 - T_2$$

$$\wedge \quad T_1 = T_2 + \frac{c_2^2}{2 \cdot c_{pm}}$$

$$T_1 = (273,15 - 70) \text{K} + \frac{(1254,33 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 5237,7 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}} = \underline{\underline{353,34 \text{ K} \approx 353 \text{ K} \approx 80^\circ \text{C}}}$$

1. Lösung der Aufgabe

4.) Berechnung von p_1 an der Eintrittsstelle:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Für Isobare

$$\wedge \quad p_1 = p_2 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$p_1 = 2,5 \text{ bar} \cdot \left(\frac{353 \text{ K}}{(273 - 70) \text{ K}} \right)^{\frac{1,657}{1,657-1}} = \underline{\underline{10,09 \text{ bar} \approx 10 \text{ bar}}}$$

2. Lösung der Aufgabe

5) Berechnung der kritischen Daten:Bemerkung: Kritische Daten heißt für die Lavalstelle der Düse5.1) Berechnung des Druckes p_L :

$$\boxed{\frac{p_L}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}} \quad \downarrow \quad p_L = p_1 \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$p_L = 10 \text{ bar} \cdot \left(\frac{2}{1,657+1}\right)^{\frac{1,657}{1,657-1}} = \underline{\underline{4,93 \text{ bar}}}$$

3. Lösung der Aufgabe5.2) Berechnung der Temperatur T_L :

$$\boxed{\frac{T_L}{T_1} = \left(\frac{p_L}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad \downarrow \quad T_L = \left(\frac{p_L}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_1 \quad T_L = \left(\frac{4,93 \text{ bar}}{10 \text{ bar}}\right)^{\frac{1,657-1}{1,657}} \cdot 353 \text{ K}$$

$$T_L = \underline{\underline{266,7 \text{ K}}} \approx \underline{\underline{-6,5^\circ \text{C}}}$$

4. Lösung der Aufgabe5.3) Berechnung der Geschwindigkeit c_L :

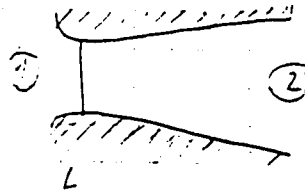
$$\boxed{c_L = \sqrt{\kappa \cdot T_L \cdot R}} \quad c_L = \sqrt{1,657 \cdot 266 \text{ K} \cdot 2077 \text{ J/kgK}} = \underline{\underline{956,8 \text{ m/s}}} \\ \approx \underline{\underline{957 \text{ m/s}}}$$

5. Lösung der Aufgabe

3.5

$$p_1, t_1 = ?$$

$$p_2, t_2 = ?$$



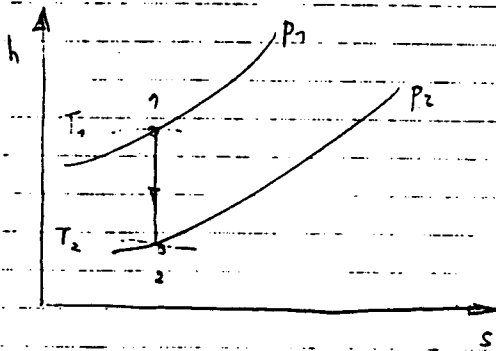
$$a_2 = \sqrt{\gamma R T_2} = \sqrt{1,667 \cdot 2077 \cdot 203} \quad , \quad R = \frac{R}{M} = \frac{8315}{4} = 2077 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

$$a_2 = 838,37 \approx 838 \text{ m/s}$$

$$c_2 = Ma_2 \cdot a_2 = 1,5 \cdot 838 = 1257,55 \approx 1258 \text{ m/s}$$

$$\frac{c_2^2}{2} = h_1 - h_2 = c_p (T_1 - T_2)$$

$$T_1 = T_2 + \frac{c_2^2}{2 c_p} = 203 + \frac{1258^2}{2 \cdot 5140 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}} = 354 \text{ K}$$



$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$p_1 = p_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 2,5 \left(\frac{354}{203} \right)^{\frac{1,667}{0,667}}$$

$$p_1 = 10,03 \approx 10 \text{ bar}$$

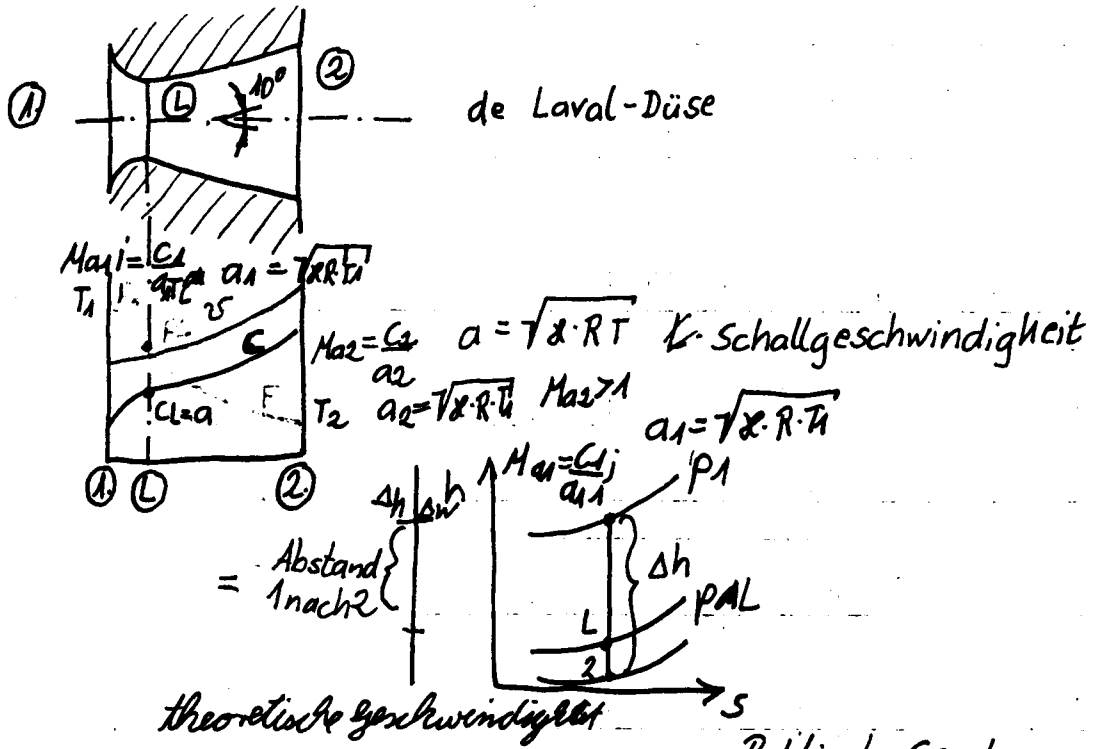
$$\frac{p_L}{p_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$= 0,476 \Rightarrow p_L = 4,76 \text{ bar}$$

$$\frac{T_L}{T_1} = \left(\frac{p_L}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow T_L = T_1 \left(\frac{p_L}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 354 \left(\frac{4,76}{10} \right)^{0,4002} = 263 \text{ K}$$

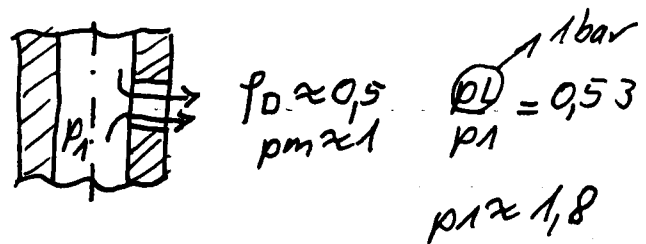
$$c_L = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma+1} \cdot R T_1} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,667}{2,667} \cdot 2077 \cdot 354} = 958,7 \approx 959 \text{ m/s}$$

$$c_L = \sqrt{\gamma R T_L} = \sqrt{1,667 \cdot 2077 \cdot 263} = 954,3 \approx 954 \text{ m/s}$$



$$\Delta w = C_2 = \sqrt{2 \cdot \Delta h} = 44,72 \cdot \sqrt{\Delta h}$$

Δh
 $\uparrow$
 kJ/kg



Expansionsverlauf in der Düse

