

3 Schraubenverbindungen

3.1 Verschraubung Druckbehälter

3.1.1 Aufgabenstellung Verschraubung Druckbehälter

Druckbehälter werden in den verschiedensten Anwendungsbereichen für unterschiedlichste Medien eingesetzt. In den Bildern 3.1-1 und 3.1-2 ist ein Druckluftbehälter (25 m³, 10 bar) dargestellt. Wie in den Bildern zu sehen verfügen solche Behälter über Öffnungen, in diesem Fall ein Mannloch, die über verschraubte Deckel verschlossen werden.



Bild 3.1-1: Druckluftbehälter mit Mannloch [Büdenbender]



Bild 3.1-2: Verschraubter Deckel auf Mannloch [Büdenbender]

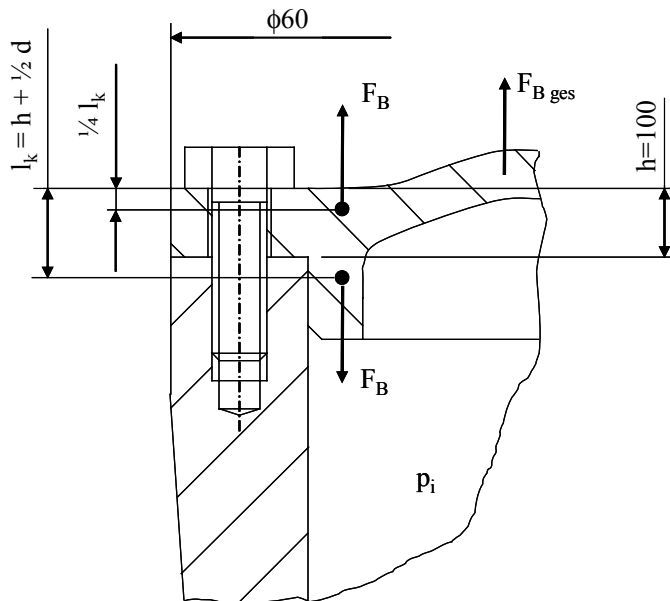


Bild 3.1-3: Schraubenverbindung

Das Bild 3.1-3 zeigt einen Druckbehälter, der wie oben dargestellt durch Schrauben mit einem Deckel verschlossen ist. In dem Behälter befindet sich ein schwellender Innendruck p_i der eine Gesamtbetriebskraft von $F_{B ges} = 300 \text{ kN}$ verursacht.

Der Aluminiumdeckel mit einem E-Modul von $E_p = 1,22 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ ist mit sechs gleichen Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 nach DIN 933 verschlossen. Die Schrauben sind mit einem Drehmomentenschlüssel angezogen. Der Reibwert zwischen sich bewegenden Teilen beträgt $\mu = 0,14$. Es soll pro Schraube stets eine Restklemmkraft $F_{Kl} = 1 \text{ kN}$ wirken. Aufgrund der Oberflächenrauheit soll in Trennfugen von $4 \mu\text{m}$ und im Gewinde von $5 \mu\text{m}$ Setzbetrag ausgegangen werden.

Bearbeitungspunkte:

Teilaufgabe 1:

Dimensionieren Sie die Flanschschrauben überschlägig auf der Grundlage, dass die maximale Schraubenkraft die Schrauben maximal lediglich zu 90 % der Streckgrenze vorspannen soll.

Teilaufgabe 2:

Ermitteln Sie die erforderliche Vorspannkraft der Schrauben.

Teilaufgabe 3:

Wie groß kann die Montagevorspannkraft maximal ausfallen?

Teilaufgabe 4:

Überprüfen Sie, ob die Schraubenverbindung nach Teilaufgabe 1 unter dem Blickwinkel des dynamischen Behälterinnendruckes ausreichend ausgelegt ist.

Teilaufgabe 5:

Mit welchem Drehmoment sind die Schrauben anzuziehen?

Teilaufgabe 6:

Wird die statische Beanspruchungsgrenze von 90 % der Streckgrenze durch die statische Vergleichsspannung tatsächlich nicht überschritten?

Teilaufgabe 7:

Wie kann der Deckel umkonstruiert werden, damit die aus der Betriebskraft resultierende Spannungsamplitude in der Schraube abnimmt?

Gewinde	Spannungsquerschnitt A_S in mm ²	Kernquerschnitt A_3 in mm ²	Schraubenkraft an der Streckgrenze $R_{p0,2}$ in N		
			8.8	10.9	12.9
M10 × 1,5	58	52,3	37100	54500	64000
M12 × 1,75	84,3	76,2	54000	79000	92500
M14 × 2	115	105	73500	108000	127000
M16 × 2	157	144	100000	148000	173000
M18 × 2,5	192	175	127000	180000	211000
M20 × 2,5	245	225	162000	230000	270000

Bild 3.1-4: Schraubendaten [ähnlich Esser, S.34]

Verschraubungsklasse	Streuung der Vorspannkkräfte	Anziehungsfaktor A	Anziehverfahren bei der Montage
I	entspricht der Streckgrenze der Schraube	1,0	Winkelkontrolliertes Anziehen Streckgrenzenkontrolliertes Anziehen
II	± 20 %	1,6	Drehmomentschlüssel Drehschrauber
III	± 40 %	2,5	Schlagschrauber mit Einstellkontrolle
IV	± 60 %	4,0	Schlagschrauber ohne Einstellkontrolle Anziehen von Hand

Bild 3.1-5: Anziehungsfaktoren [ähnlich Esser, S.29]

Festigkeitsklassen		Dauerhaltbarkeit $\pm \sigma_A$ in N/mm ² für Gewindedurchmesser in mm			
		< 8	8 – 12	14 – 20	> 20
	4.6 und 5.6	50	40	35	35
	8.8 bis 12.9	60	50	40	35
	10.9 und 12.9 schlussgerollt	100	90	70	60

Bild 3.1-6: Dauerfestigkeitswerte [ähnlich Esser, S.21]

3.1.2 Mögliche Lösung zur Aufgabe Verschraubung Druckbehälter

Teilaufgabe 1: Schraubenauswahl

Ausnutzung der Streckgrenze durch Restklemmkraft, Betriebskraft und Anziehungsfaktor zu 90 %.
Gemäß Vorgabe: $F_{K1} = 1 \text{ kN}$

$$F_B = \frac{F_{Bges}}{n} = \frac{300 \text{ kN}}{6} = 50 \text{ kN}$$

Bild 3.1-5: Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel → Anziehfaktor $A = 1,6$

$$F_{max} = A(F_{Kl} + F_B) = 1,6(1 \text{ kN} + 50 \text{ kN}) = 81,6 \text{ kN}$$

$$F_{max} < 0,9 F(R_{p0,2})$$

$$F(R_{p0,2}) > \frac{F_{max}}{0,9} = \frac{81,6 \text{ kN}}{0,9} = 90,7 \text{ kN}$$

Bild 3.1-4: Werkstoff 8.8, $F(R_{p0,2}) > 90,7 \text{ kN}$ → M16 × 2 mit $F(R_{p0,2}) = 100 \text{ kN}$

Teilaufgabe 2: Montagevorspannkraft

$$F_{VM} = ((1 - \varphi)F_B + F_{Kl} + \Delta F_V)$$

F_B und F_{Kl} sind bereits bekannt.

$$\Phi = n\Phi' = n \frac{1}{1 + \frac{c_p}{c_s}}$$

$$n = \frac{l_{k \text{ entlastet}}}{l_k} = \frac{0,75l_k}{l_k} = 0,75$$

$$\frac{1}{c_s} = \frac{1}{E_s} \left(\frac{h}{A_s} + \frac{d}{2} \frac{1}{A_s} \right) = \frac{h + \frac{d}{2}}{E_s A_s}$$

$$\frac{1}{c_s} = \frac{100 \text{ mm} + \frac{16 \text{ mm}}{2}}{2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2 \cdot 157 \text{ mm}^2} = 3,275 \cdot 10^{-6} \text{ mm/N}$$

$$c_s = 3,05 \cdot 10^5 \text{ N/mm}$$

$$c_p = \frac{E_p}{l_k} A_z = \frac{E_p}{l_k} \frac{\pi}{4} \left(\left(S + \frac{l_k}{a} \right)^2 - D^2 \right)$$

$$c_p = \frac{1,22 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2}{108 \text{ mm}} \frac{\pi}{4} \left(\left(22,5 \text{ mm} + \frac{108 \text{ mm}}{6} \right)^2 - (17,5 \text{ mm})^2 \right)$$

$$c_p = 1,18 \cdot 10^6 \text{ N/mm}$$

Somit ergibt sich der Verspannungsfaktor zu:

$$\Phi = 0,75 \frac{1}{1 + \frac{1,18 \cdot 10^6}{3,05 \cdot 10^5}} = 0,154$$

$$\Delta F_V = s \Phi c_p = 13 \mu\text{m} \cdot 0,205 \cdot 1,18 \cdot 10^6 \text{ N/mm} = 3144 \text{ N}$$

$$F_{VM} = ((1-f) F_B + F_{Kl} + \Delta F_V) = ((1-0,154) 50 \text{ kN} + 1 \text{ kN} + 3,14 \text{ kN}) = 46,4 \text{ kN}$$

Die Schraube ist nach Aufbringung der minimalen Montagevorspannkraft zu 47 % der Streckgrenze beansprucht.

Teilaufgabe 3: Maximale Vorspannkraft

$$F_{VM \max} = A \cdot F_{VM} = 1,6 \cdot 46,4 \text{ kN} = 74,3 \text{ kN}$$

Die Schraube ist nach Aufbringung der maximalen Montagevorspannkraft zu 75 % der Streckgrenze beansprucht.

Teilaufgabe 4: Dynamische Beanspruchung

$$\sigma_a = \frac{1}{2} \frac{F_{Bs}}{A_s} = \frac{1}{2} \frac{0,154 \cdot 50 \text{ kN}}{157 \text{ mm}^2} = 24,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_a = 24,5 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{a \text{ zul}}(8,8, 14 - 20 \text{ mm}) = 40 \text{ N/mm}^2$$

Die dynamische Beanspruchung ist zulässig. Es liegt eine dauerfeste Auslegung vor.

Teilaufgabe 5: Anzugsmoment

$$M = F_V \left(\frac{d_2}{2} \tan(\varphi + \rho) + \mu_K r_m \right)$$

$$M = 46,4 \text{ kN} \left(\frac{12,701 \text{ mm}}{2} \tan(2,87^\circ + 7,97^\circ) + 0,14 \cdot 9,9 \text{ mm} \right) = 120,7 \text{ Nm}$$

Teilaufgabe 6: Maximalspannung

Die Vergleichsspannung aus überlagertem Zug und Torsion in der Schraube ergibt sich zu:

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_Z^2 + 3\tau_t^2} = \sqrt{\left(\frac{F_{V \max}}{A_s} \right)^2 + 3 \left(\frac{M_t}{W_t} \right)^2}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{F_{VM} + \phi F_B}{A_s} \right)^2 + 3 \left(\frac{F_V \frac{d_2}{2} \tan(\varphi + \rho)}{\frac{\pi}{16} d_s^3} \right)^2}$$

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{74,3 \text{ kN} + 0,154 \cdot 50 \text{ kN}}{157 \text{ mm}^2} \right)^2 + 3 \left(\frac{74,3 \text{ kN} \frac{12,701 \text{ mm}}{2} \tan(2,87^\circ + 7,97^\circ)}{\frac{\pi}{16} (14,1 \text{ mm})^3} \right)^2}$$

$$\sigma_V = 696 \text{ N/mm}^2$$

Die Forderung danach, dass die Maximalspannung in der Schraube 90 % der Streckgrenze nicht überschreiten soll, wird nicht erfüllt. Vielmehr wird sogar die Streckgrenze deutlich überschritten.

Teilaufgabe 7: Konstruktive Maßnahmen

Deckel herunterziehen, um den entlasteten Klemmlängenanteil so klein wie möglich ausfallen zulassen.

Anmerkung:

Bei der Bearbeitung dieser Aufgabe wird wegen des Anziehens mit einem Drehmomentenschlüssel von einem Anzugsfaktor von $A = 1,6$ ausgegangen. Die Tabelle für die Anzugsfaktoren weist allerdings aus, dass dieser Faktor keine Gültigkeit für das Anziehen von Schrauben auf Platten aus Aluminium hat. Insofern ist der Anzugsfaktor hier nicht endgültig zu bestimmen. Z.B. durch Literaturrecherche, Abfrage bei Schraubenherstellern oder eigene Versuche kann und sollte der zu berücksichtigende Faktor konkretisiert werden.

Anmerkung:

Entscheidend ist zu erkennen, dass die dynamische Beanspruchung einer Schraube nicht alleine durch Höhe der Lasten und die Eigenschaften der Schraube bestimmt wird. Ein zentraler Einflussfaktor ist die Steuerung des so genannten „Kraftflusses“ durch die verspannten Platten. Dieser Fluss der Kräfte entscheidet über die Größe von belastetem und entlastetem Klemmlängenanteil und damit auch über die Größe der auf die Schraube einwirkenden Kraftamplitude – bei gleich großen äußeren Lasten.

3.2 Entlastung Schraubenverbindung

3.2.1 Aufgabenstellung Entlastung Schraubenverbindung

Die im Bild 3.2-1 gezeigte taillierte Schraube mit Unterlegscheibe wird mit einer dynamischen Betriebskraft beaufschlagt.

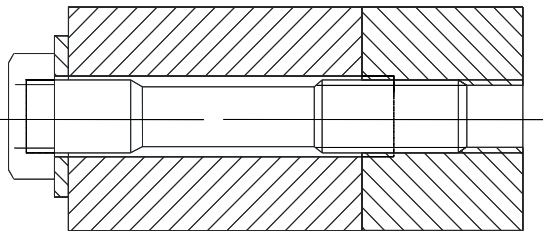


Bild 3.2-1:
Schraubenverbindung [Tedata]

Daten der Schraubenverbindung:

Schraube $M20 \times 120$, 10.9, ähnlich DIN EN ISO 4014, mit Werkstoffkennwert $a = 10$

Tailldurchmesser	$d_T = 15 \text{ mm}$
Durchmesser der Schraubenkopfaufgabe	$d_a = 28,2 \text{ mm}$
Länge Schaft ohne Taille	$l_1 = 30 \text{ mm}$
Länge Taille	$l_2 = 50 \text{ mm}$
Scheibendicke	$t_s = 3 \text{ mm}$
Klemmlänge	$l_k = 90 \text{ mm}$
Setzbetrag pro Fuge	$s = 5 \text{ }\mu\text{m}$

Plattenwerkstoff S355J2G3, theoretisch unendliche Plattenausdehnung

Betriebskraft	$F_B = 200 \text{ kN}$
Vorspannkraft	$F_{vM} = F (0,8 \cdot R_{p0,2})$

Entlastete Klemmlänge
Anzugsfaktor

$$l'_k = 0,3 l_k$$

$$A = 1,0$$

Bearbeitungspunkte:

Teilaufgabe 1:

Besteht für die Schraube die Gefahr des Dauerbruchs?

Teilaufgabe 2:

Überlegen Sie konstruktive Maßnahmen, durch welche tendenziell eine Entlastung der Schraubenverbindung hinsichtlich der dynamischen Beanspruchung erreicht werden kann.

Teilaufgabe 3:

Als eine Maßnahme wird die Vergrößerung des Schraubendurchmessers um eine Größe vorgeschlagen. Wird hierdurch eine Entlastung der Schraubenverbindung hinsichtlich der dynamischen Beanspruchung erreicht?

Teilaufgabe 4:

Als weitere Maßnahme wird die Verringerung des Schraubendurchmessers um eine Größe vorgeschlagen. Welches Ergebnis wird hierdurch hinsichtlich der dynamischen Beanspruchung erreicht?

Teilaufgabe 5:

Führt eine Verlängerung der Schraube im Tailenbereich bei gleichzeitigem Unterlegen einer Buchse von 20 mm Länge zum Ziel der Entlastung hinsichtlich der dynamischen Beanspruchung der Verbindung?

Teilaufgabe 6:

Wie sind die durchgerechneten Varianten bzgl. der minimal verbleibenden Restklemmkraft zu beurteilen?

Teilaufgabe 7:

Welche der betrachteten Varianten würden Sie aus welchen Gründen zum Einsatz bringen?

Gewinde	Spannungsquerschnitt A_S in mm ²	Kernquerschnitt A_3 in mm ²	Schraubenkraft an der Streckgrenze $R_{p0,2}$ in N		
			8.8	10.9	12.9
M12 × 1,75	84,3	76,2	54000	79000	92500
M14 × 2	115	105	73500	108000	127000
M16 × 2	157	144	100000	148000	173000
M18 × 2,5	192	175	127000	180000	211000
M20 × 2,5	245	225	162000	230000	270000
M22 × 2,5	303	282	200000	285000	333000

Bild 3.2-2: Schraubendaten [ähnlich Esser, S.34]

		Dauerhaltbarkeit $\pm\sigma_A$ in N/mm ² für Gewindedurchmesser in mm			
		< 8	8 – 12	14 – 20	> 20
Festigkeits- klassen	4.6 und 5.6	50	40	35	35
	8.8 bis 12.9	60	50	40	35
	10.9 und 12.9 schlußgerollt	100	90	70	60

Bild 3.2-3: Dauerfestigkeitsdaten [ähnlich Esser, S.21]

3.2.2 Mögliche Lösung zur Aufgabe Entlastung Schraubenverbindung

Teilaufgabe 1: Gefahr des Dauerbruchs

Kriterium: Die vorhandene Spannungsamplitude muss kleiner sein als die zulässige Spannungsamplitude:

$$\sigma_a \text{ vorh} < \sigma_a \text{ zul}$$

$$\sigma_a \text{ vorh} = \frac{\phi F_B}{2 A_s} = \frac{n \phi' F_B}{2 A_s} = \frac{n F_B}{2 A_s} \frac{c_s}{c_s + c_p}$$

Welcher Anteil der Betriebskraft F_B die Schraube zusätzlich belastet wird also im Wesentlichen durch den entlasteten Klemmlängenanteil sowie die Steifigkeiten von Schraube und Platten bestimmt:

$$n = \frac{l'_k}{l_k} = \frac{0,3 l_k}{l_k} = 0,3$$

$$A_s (M20 \times 2,5) = 245 \text{ mm}^2$$

Die Steifigkeit der Schraube ermittelt sich hier als Reihenschaltung dreier Querschnittsbereiche: Schaft, Taille und Gewinde.

$$\frac{1}{c_s} = \frac{1}{c_{\text{sch}}} + \frac{1}{c_T} + \frac{1}{c_G}$$

$$\frac{1}{c_s} = \frac{30 \text{ mm}}{2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \frac{\pi}{4} (20 \text{ mm})^2} + \frac{50 \text{ mm}}{2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \frac{\pi}{4} (15 \text{ mm})^2} + \frac{20 \text{ mm}}{2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} 245 \text{ mm}^2}$$

$$c_s = 456454 \text{ N/mm}$$

Die Steifigkeit der Platte ist im Wesentlichen mit bestimmt durch den äußeren Durchmesser der komprimierten Zone:

$$c_p = \frac{E A_z}{l_k} = \frac{E \pi}{l_k 4} \left\{ \left(d_a + \frac{l_k}{a} \right)^2 - d_h^2 \right\}$$

$$c_p = \frac{2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \pi}{90 \text{ mm}} \left\{ \left(28,2 \text{ mm} + \frac{90 \text{ mm}}{10} \right)^2 - (22 \text{ mm})^2 \right\}$$