

● Technische Information



● Flanschberechnung nach DIN EN 1591-1 – Absurdität der Betrachtung der Streuung verschiedener Montageverfahren

Einleitung

Die Berechnung der Flanschverbindungen nach der DIN EN 1591-1 [1] ist unter Fachleuten seit ihrem Erscheinen umstritten. Viele Fehler stellen die Anwendung in Frage.

Bei der Konstruktion geschraubter Verbindungen, besonders auch der Dicht- bzw. Flanschverbindungen, ist die Betrachtung der Montagefehler und damit die Auswahl des Montagewerkzeugs von entscheidender Bedeutung. Die Qualität der Montage ist wesentlich abhängig vom ausgewählten Montagewerkzeug, weil je nach Werkzeug und Kontrollmechanismus mit erheblichen Streuungen des Montageergebnisses von ± 5 bis zu ± 60 % zu rechnen ist. Dies wird in der anerkannten Berechnung von Schraubenverbindungen nach VDI 2230 [2] seit Jahrzehnten entsprechend betrachtet.

Das Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG [3] fordert in §5 und §22 die grundsätzliche Minimierung schädlicher Emissionen. Die im Juni 2012 herausgegebene VDI 2290 [4] hat Folgen für die Betreiber von Anlagen, in denen gefährliche flüssige oder gasförmige Stoffe des Absatzes 5.2.7 der TA Luft [5] gefördert oder gelagert werden. Sie wendet sich an Betreiber von Anlagen und Apparaten, Hersteller von Flanschverbindungen, Konstrukteure, Projekt Ingenieure. Sie stellt den Stand der Technik dar und gibt Hinweise zur Montage und Instandhaltung, die somit im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes BImSchG (§3 Abs.6) und nach der Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV (§4 und §12) anzuwenden sind. Sie besitzt nicht nur einen empfehlenden Charakter, sondern unterstützt Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden im Rahmen ihrer Tätigkeit. Sie unterstützt das Ziel des BImSchG §5 und §22 zur Minimierung schädlicher Emissionen. Sie gilt für Stahlflanschverbindungen und kann als Erkenntnisquelle für emaillierte Flansche, Flansche aus Glas, Kunststoff oder mit Kunststoffauskleidungen herangezogen werden. Erstmals sollen die Dichtverbindungen rechnerisch auf Leckage nachgewiesen werden. Folgende Anforderungen werden gestellt:

- Minimierung von Emissionen, Minimierungsgebot → Abschnitt 7, 1. und 6. Absatz
- zulässige Leckrate → Abschnitt 7, 4. Absatz
- rechnerischer Nachweis der Dichtheit (z.B. nach EN 1591-1 oder Finite Elemente Methode) → Abschnitt 7, 2. Absatz
- Ausschöpfen der zulässigen Spannungen der Bauteile → Abschnitt 7, 4. Absatz
- Anziehverfahren mit Kontrolle der Schraubkraft → Abschnitt 6, 3. Und 6. Absatz
- Verfahrensanweisungen zur Montage → Abschnitt 7, 2. Absatz
- technisch sachgerechte Durchführung der Montage durch sachkundiges Personal * → Abschnitt 7, 1. und 4. Absatz
- Verfahrensanweisung zur Dokumentation und Qualitätssicherung → Abschnitt 6, 6. Absatz
- stichprobenartige Kontrolle nach Gefährdungsbeurteilung oder sicherheitstechnischer Bewertung → Abschnitt 6, 6. Absatz

* Das deutsche Recht, das Arbeitsschutzgesetz ArbSchG [6], die umsetzende Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV [7] kennt keinen „sachkundigen Monteur“ und verlangt einen „fachkundigen Monteur“, siehe §10, Absatz 2 und beschreibt in §2, Absatz 5 was darunter zu verstehen ist.

Das wirklich einzig Neue in der TA Luft ist der geforderte rechnerische Nachweis der Dichtheit. Alle anderen Anforderungen bestehen schon in gültigen Gesetzen, Regeln und Vorschriften. Für die Berechnung der Dichtheit einer Flanschverbindung wird gemäß der TA Luft, nach VDI 2290, gefordert.

Die Forderung nach einem rechnerischen Nachweis ist in die TA Luft vom 18. August 2021 übernommen sowie eine zulässige Höchstgrenze für schädliche Emissionen festgelegt worden. Das Festlegen der Höchstgrenze widerspricht der Forderung des BImSchG nach Minimierung schädlicher Emissionen, dem Minimierungsgebot.

Es ist allgemein bekannt, dass die Dichtheit und damit die Emissionen von der, auf dem Dichtelement, aufgetragenen Flächenpressung abhängen. Die tatsächlich aufgetragene Flächenpressung ist von der Qualität des Montageverfahrens und des Montagepersonals entscheidend abhängig. Im Folgenden wird nachgewiesen, dass die Betrachtung der Montagestreuung nach der DIN EN 1591-1 keine belastbare Basis hat, somit als absurd zu bezeichnen ist.

DIN EN 1591-1, Anhang B, „Anziehen der Schrauben“

Abschnitt B.1

Im Abschnitt B.1 werden die Richtwerte für die Streuung der Einbau-Schraubenkraft einer einzelnen Schraube – Richtwerte ε_{1-} und ε_{1+} in Tabelle B.1 festgelegt.

Streuwert der Montagevorspannkraft																				
Richtwerte ε_{1-} und ε_{1+} nach DIN EN 1591-1:2014-04, Anhang B, Tabelle B.1 und Ergänzungen nach VDI 2230 Blatt 1																				
©Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de																				
Montageverfahren		Einflussgrößen für die Streuung		Streuwert ^{a b c d}				ε_{1-} und ε_{1+} nach Reibungskoeffizient μ aus Formel gerechnet												
DIN EN 1591-1 Anhang B Tabelle B.1	übliche Bezeichnung angewandeter Werkzeuge	DIN EN 1591-1 Anhang B Tabelle B.1	zusätzliche tatsächliche Einflussgrößen	DIN EN 1591-1 Anhang B Tabelle B.1		VDI 2230 Bl. 1: 2003-02/2015-11, Tab. A8		Reibungskoeffizient μ												
				ε_{1-}	ε_{1+}	Streu- ung in %	Anzieh- faktor α_A	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
Schraubenschlüssel: nach Gefühl des Mechanikers oder unkontrolliert	Ring- oder Maulschlüssel	Reibung Steifigkeit Qualifikation des Monteurs		0,3 + (0,5 x μ)		-	-	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
Schlag- schraubenschlüssel	Schlagschlüssel Schlagschrauber	Reibung Steifigkeit Kalibrierung	Kalibrierung nur für Schrauber Qualifizierung des Montagepersonals Schmierung	0,2 + (0,5 x μ)		$\pm 43\%$ bis $\pm 60\%$	2,5 - 4,0	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
Drehmomentschlüssel = Schraubenschlüssel mit (ausschließlich) Drehmomentmessung	Drehmoment- schlüssel	Reibung Kalibrierung Schmierung	Qualifizierung des Montagepersonals	0,1 + (0,5 x μ)		$\pm 26\%$ bis $\pm 43\%$	1,7 - 2,5	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
Hydraulische Spannvorrichtung; Messung des Hydraulikdrucks	Hydraulische Spannzylinder zur Längendehnung (Bolt-Tensioning)	Steifigkeit Schraubenlänge Kalibrierung	Kopplungsfehler bei Ultraschall- messung Planlauf toleranz der Mutter Qualifizierung des Montagepersonals	0,20	0,40	$\pm 5\%$ bis $\pm 9\%$	1,1 - 1,2													
Schraubenschlüssel oder hydraulische Spannvorrichtung; Messung der Schraubenlänge	Schrauben- schlüssel Drehmoment- schlüssel elektrischer, pneumatischer, hydraulischer Schrauber	Steifigkeit Schraubenlänge Kalibrierung	Kopplungsfehler bei Ultraschall- messung Qualifizierung des Montagepersonals Schmierung	0,15		$\pm 5\%$ bis $\pm 20\%$	1,1 - 1,5													
Schraubenschlüssel, Messung des Drehwinkels der Mutter (nahezu bis zur Streckgrenze der Schraube)	streckgrenz- gesteuerter Schrauber	Steifigkeit Reibung Kalibrierung	Reibung hat keinen Einfluss auf dieses Montageverfahren Qualifizierung des Montagepersonals Schmierung	0,10		$\pm 9\%$ bis $\pm 17\%$	1,2 - 1,4													
Schraubenschlüssel Messung des Drehmoments und des Drehwinkels der Mutter (nahezu bis zur Streckgrenze der Schraube)	streckgrenz- und drehwinkel- gesteuerter Schrauber	Kalibrierung	Qualifizierung des Montagepersonals Schmierung	0,07		$\pm 9\%$ bis $\pm 17\%$	1,2 - 1,4													

Die Werte für ε_{1-} und ε_{1+} müssen in Abhängigkeit vom Reibwert μ berechnet werden. Diese Werte sind in der Tabelle ergänzt.

Zusätzlich wurden in der Tabelle die Werkzeuge, weil sie in der DIN EN 1591-1 nicht klar beschrieben sind, sachlich richtig ergänzt beschrieben sowie die Werte für die Streuung in % und dem Anziehungsfaktor α_A aus der Tabelle A8 der VDI 2230 aus den Versionen von 2003 und 2015 ergänzt worden. Die Nutzung beider Tabellen war erforderlich, weil die VDI 2230 von 2015 eine Montage ohne Kontrollgröße, wegen der hohen Streuungen nicht zulässt.

Das erstaunliche Ergebnis ist, dass der Wert für die Streuung für einen üblichen Drehmomentschlüssel, ohne Kontrollgröße, bei einer Reibzahl

$$\mu = 0,10 \text{ mit } \varepsilon_{1-} \text{ und } \varepsilon_{1+} = 0,15$$

genau so groß definiert ist, wie der für einen Drehmomentschlüssel und zusätzlicher Kontrolle über eine Längenmessung. Das ist nicht nachvollziehbar, eher technischer Unsinn.

Nach der VDI 2230 Blatt 1 werden, wie in der Tabelle ergänzt die Streuung für den üblichen Drehmomentschlüssel ohne Kontrollgröße mit bis

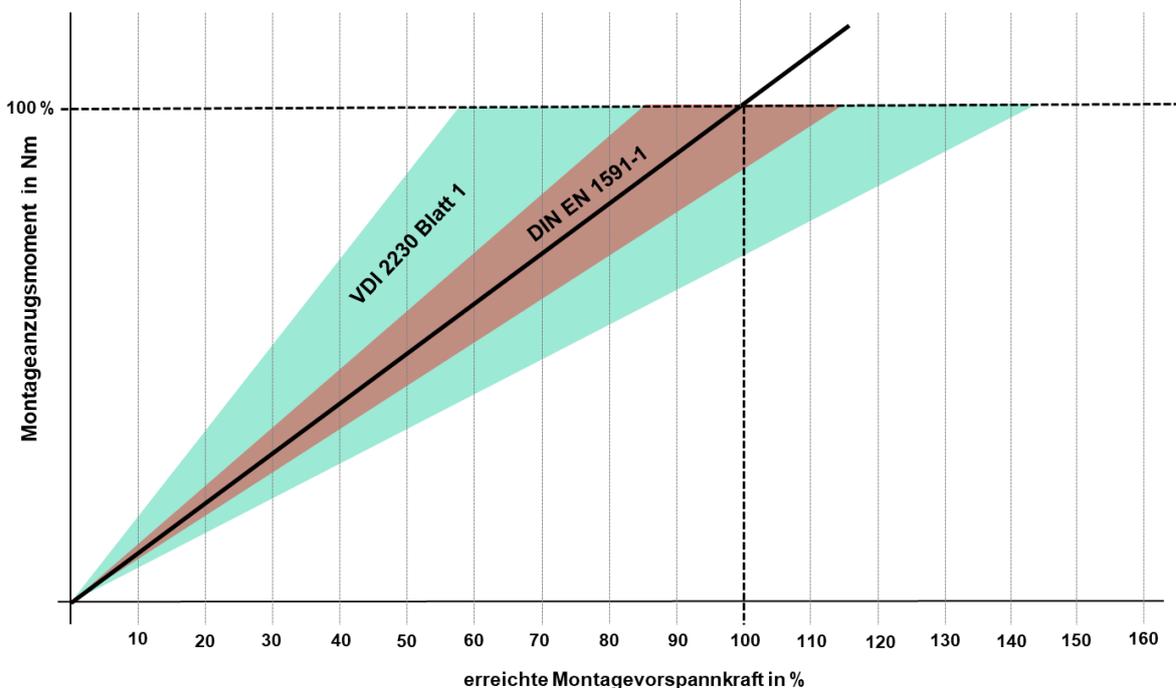
$$\pm 43\% \text{ (Anziehungsfaktor } \alpha_A = 1,7 \text{ bis } 2,5)$$

angegeben. Für den Drehmomentschlüssel mit Kontrolle der Längendehnung mit bis

$$\pm 20\% \text{ (Anziehungsfaktor } \alpha_A = 1,1 \text{ bis } 1,5).$$

Streuung der Montagevorspannkraft gemäß DIN EN 1591-1 und VDI 2230 Blatt 1 für Montage mit üblichem Drehmomentschlüssel ohne Kontrollgröße

© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de



Die Grafik zeigt deutlich die unterschiedliche Annahme zur Streuung der Montagevorspannkräfte.

Für einen sicheren Betrieb eines geschraubten Systems müssen die erforderlichen Vorspannkräfte um die Streuung erhöht werden, um mindestens die erforderliche Betriebskraft zu erzeugen. Die maximal zulässige Vorspannkraft muss um die Streuung gesenkt werden, um Schäden durch Überlastung von Bauteilen zu vermeiden.

Die Fußnoten ^{a b c d} zum Streuwert der Tabelle B.1, werden in der folgenden Tabelle aufgezeigt und kommentiert.

Fußnoten ^{a b c d} zum Streuwert der Tabelle B.1		
© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de		
Note	Text der Fußnote	Kommentar

a	Sehr erfahrene Mechaniker erreichen kleinere Streuwerte als angegeben (z. B. $\mathcal{E} = 0,2$ statt $\mathcal{E} = 0,3$ mit Drehmomentschlüssel); bei unerfahrenen Mechanikern können die Streuwerte jedoch größer als angegeben sein.	Was ist hiermit gemeint? Ein Wert für die Verwendung von Drehmomentschlüssel von 0,3 ergibt sich nicht aus Tabelle B.1. Die Werte liegen in Abhängigkeit von der Reibzahl zwischen 0,13 und 0,25.
b	Die Streuwerte in der Tabelle gelten für eine einzelne Schraube; die Streuung der Gesamtschraubenkraft aller Schrauben ist aus statistischen Gründen geringer, siehe B.2.	Nach den Ausführungen im Text, ergeben sich erhebliche Zweifel an der Richtigkeit der Streuwerte. Die tatsächlichen Streuwerte bei Reibungsabhängigen Montageverfahren sind deutlich höher.
c	Bei Verwendung einer hydraulischen Spannvorrichtung sind \mathcal{E}_{1+} und \mathcal{E}_{1-} nicht gleich, da bei der Montage eine zusätzliche Kraft auf die Schraube aufgebracht wird, bevor die Kraft auf die Mutter übertragen wird.	Die tatsächlich von der Mutter übertragene Kraft streut aus der Qualität der Mutter, im Wesentlichen aus den Gesamtplanlauf toleranz der Mutter nach DIN EN ISO 4759-1 aus Abschnitt 4.2.2.2 [8].
d	μ ist der für die Reibung zwischen Schraube und Mutter anzunehmende Reibungskoeffizient.	Hier wird die Reibung zwischen Mutter und Bauteil komplett vergessen. Diese Fläche hat einen größeren Einfluss auf das Drehmoment. Die nicht geschmierte Mutternauflagefläche der, bei der Montage, zu drehenden Mutter kann zu drastischen Vorspannkraftverlusten führen. ¹⁾
¹⁾ Mehr zu diesen Folgen der Reibung wird in der Technischen Information auf der Homepage www.thomsen-bremen.de in der Rubrik „Montage“ mit den Informationen zum Einfluss der Reibung beschrieben.		

Es zeigt sich, dass die Aussagen der Fußnoten fehlerhaft sind und das tatsächliche Streuverhalten und somit die tatsächlich sicher aufgebrachte Schraubenkraft nicht aufzeigen können.

Die gleichen Anforderungen gelten auch für die Berechnungen für unbefeuerte Druckbehältern nach der DIN EN 13445-3 [9], Anhang G, Abschnitt G.8.3.1., Tabelle G.8-2.

Abschnitt B.2

Im Abschnitt B.2 wird die Streuung der Gesamt-Schraubenkraft für alle Schrauben einer Verbindung betrachtet.

Zitat:

Alle Schrauben-Anziehverfahren sind bis zu einem gewissen Grad ungenau. Die sich daraus ergebenden Streuwerte für n_B Schrauben (Anmerkung des Verfassers: n_B = Anzahl der verwendeten Schrauben) liegen bei \mathcal{E}_+ und \mathcal{E}_- über und unter dem Sollwert. Tabelle B.1 enthält Richtwerte für \mathcal{E}_{1+} und \mathcal{E}_{1-} für einzelne Schrauben.

Wenn die Genauigkeit des Anziehens einer Schraube nicht durch die übrigen beeinflusst wird, lassen sich die Streuwerte \mathcal{E}_+ und \mathcal{E}_- für die Gesamtschraubenkraft sinnvoll durch n_B , \mathcal{E}_{1+} und \mathcal{E}_{1-} ausdrücken, wie nachfolgend beschrieben:

$$\mathcal{E}_+ = \mathcal{E}_{1+} \left(1 + 3 / \sqrt{n_B} \right) / 4$$

$$\mathcal{E}_- = \mathcal{E}_{1-} \left(1 + 3 / \sqrt{n_B} \right) / 4$$

Zitatende

Die gleichen Anforderungen gelten auch für die Berechnungen für unbefeuerte Druckbehältern nach der DIN EN 13445-3 [9], Anhang G, Abschnitt G.6.5.2, Tabelle G.8-2.

Die folgende Tabelle zeigt die Streuung der Gesamtschraubenkraft aller Schrauben.

Streuung der Gesamtschraubenkraft aller Schrauben $\mathcal{E}+$ und $\mathcal{E}-$					
©Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de					
Schrauben- anzahl n_B	Streuung einzelner Schraube nach Tabelle B.1 $\mathcal{E}1+$ bzw. $\mathcal{E}1-$				
	0,07	0,10	0,15	0,20	0,40
4	0,04	0,06	0,09	0,13	0,25
8	0,04	0,05	0,08	0,10	0,21
12	0,03	0,05	0,07	0,09	0,19
16	0,03	0,04	0,07	0,09	0,18
20	0,03	0,04	0,06	0,08	0,17
24	0,03	0,04	0,06	0,08	0,16
28	0,03	0,04	0,06	0,08	0,16
32	0,03	0,04	0,06	0,08	0,15
36	0,03	0,04	0,06	0,08	0,15
40	0,03	0,04	0,06	0,07	0,15

In der Literatur wurden, trotz umfangreicher Recherche, keine Hinweise gefunden, die eine Belastbarkeit dieser Reduzierung der Streuung der Gesamtschraubenkraft belegen.

Zusammenfassung

Die tatsächliche Streuung ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit viel größer als in der DIN EN 1591-1 angenommen.

In den meisten, der dem Verfasser bekannten Berechnungen nach DIN EN 1591-1 werden die Streuungen nicht beachtet. Fast immer wurde, die bei niedrigerer Schraubenauslastung geforderte Mindestschraubenauslastung von 30% nicht geprüft, bzw. entsprechende Gefahrenhinweise zur Gefahr selbsttätigen Lösens der Verbindung gegeben.

Die Festlegungen der Norm sind zu prüfen und anzupassen.

Wichtiger Hinweis!

Eine niedriger eintretende als die geplante Schraubenkraft führt zu deutlich höheren Emissionen, somit darf auf Grund der, in dieser Ausarbeitung ermittelten Probleme die Berechnung nach DIN EN 1591-1 unter diesen Voraussetzungen nicht zum Nachweis einer Dichtigkeit der geschraubten Dichtverbindung herangezogen werden.

Der rechnerische Nachweis der Dichtheit einer Flanschverbindung ist unter den genannten Umständen seriös nicht möglich.

Bitte beachten Sie die Technische Information zum rechnerischen Nachweis von Flanschverbindungen auf meiner Homepage.

Weitere interessante Informationen zu verschiedenen Themen finden Sie auf der Homepage www.thomsen-bremen.de.

Zur technischen Beratung stehe ich Ihnen selbstverständlich gerne auch kurzfristig persönlich zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen aus Bremen
Peter Thomsen

Haftungsausschluss:

Die Inhalte der Regeln sind zum Teil zitiert, zum Teil in den Worten der Regeln wiedergegeben, die Anmerkungen und Auslegungen beruhen auf langjähriger Erfahrung, dienen der Entscheidungshilfe und begründen keinen Anspruch auf Gewährleistung.

© Peter Thomsen · www.thomsen-bremen.de

Stand 16.08.2023

Quellenverzeichnis

- [1] DIN EN 1591-1:2014-04, Flansche und ihre Verbindungen - Regeln für die Auslegung von Flanschverbindungen mit runden Flanschen und Dichtung - Teil 1: Berechnung
- [2] VDI 2230 - Blatt 1:2015-11, Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen
- [3] Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG, Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge, Ausfertigungsdatum: 15.03.1974
- [4] VDI 2290:2012-06, Emissionsminderung - Kennwerte für dichte Flanschverbindungen
- [5] TA Luft, Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), vom 18. August 2021
- [6] Arbeitsschutzgesetz ArbSchG, Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit, vom 07.08.1996, Stand vom 18.3.2022
- [7] Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV, Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln, Ausfertigungsdatum: 03.02.2015
- [8] DIN EN ISO 4759-1:2001-04, Toleranzen für Verbindungselemente, Teil1: Schrauben und Muttern
- [9] DIN EN 13445-3: :2018-12, Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 3: Konstruktion