

● Technische Information



● Optimale Schraubenauslastung

Im Bereich der Schrauben werden in Flanschverbindungen die Anforderungen an die Schrauben zur Erreichung einer optimalen Schraubverbindung nicht beachtet. Häufig bestimmen die Eigenschaften der Dichtungen die Auslastung der Schrauben. Dabei ist schon festzustellen, dass die üblichen Dichtverbindungen den grundsätzlichen Anforderungen der Schrauben widersprechen. Im Fachbuch „Schraubenverbindungen“ (Wiegand, Kloos, Thomala; Springer Verlag, ISBN-13 978-3-540-21282-9) findet sich folgender Satz: „Zur Vermeidung unzulässig großer Setz- und/oder Kriechbeträge sollten keinesfalls plastische oder quasielastische Elemente (Dichtungen) mitverspannt werden.“ Damit eröffnet sich schon ein kritischer Blick der Schraubenfachleute auf die Flanschverbindungen (Abb.1), besonders wenn Dichtungen mit hohem Setz- und Fließpotential, wie Dichtungen aus Elastomeren, mit Elastomer gebundenen Fasern oder PTFE, eingesetzt werden.

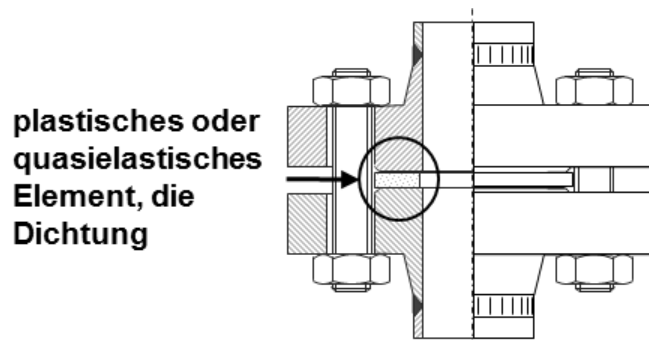


Abb.1: schraubentechnisch ungünstiges System Flanschverbindung

Nun ist die beste Schraubenverbindung die mit hoher Vorspannkraft. Hohe Vorspannkraften sind bei zügig und/oder schwingungsbeanspruchten Schraubenverbindungen erforderlich, sie gewährleisten hohe Restklemmkraften im Betrieb und damit eine zusätzliche Sicherheit bei Vorspannkraftverlusten infolge Setzens und/oder Kriechens. Die Auslastung der Schrauben ist laut „Schraubenverbindungen“ bei 70% Auslastung der Streckgrenze ($R_{p0,2}$) optimal. Zu einem gleichen Schluss kommt Dr. Ing. Marc Seidel in seiner Veröffentlichung „Auslegung von Flanschverbindungen mit hochfesten, vorgespannten Schrauben für Windenergieanlagen“: „Die Schraubenbeanspruchung unter äußerer Last sollte mit 70% der Streckgrenze als Vorspannkraft angesetzt werden. Damit wird Vorspannkraftverlusten, durch Setzen und mögliche geringe Plastifizierung im Betrieb sowie dem Einfluss der Torsion während des Vorspannens Rechnung, getragen.“

Der Vorspannkraftverlust nach 10.000 Minuten (ca. 7 Tage) ist, bei voller Streckgrenzauslastung 100% $R_{p0,2}$ mit ca. 12% oder höher, bei 90/80% $R_{p0,2}$, mit ca. 10/6% deutlich höher als bei niedrigerer Streckgrenzauslastung ($R_{p0,2} \leq 70\%$) mit $\leq 1,5\%$ (Abb.2). Dies ist ein Indikator für die optimale Streckgrenzauslastung von 70%, wie sie in der Literatur zu finden ist.

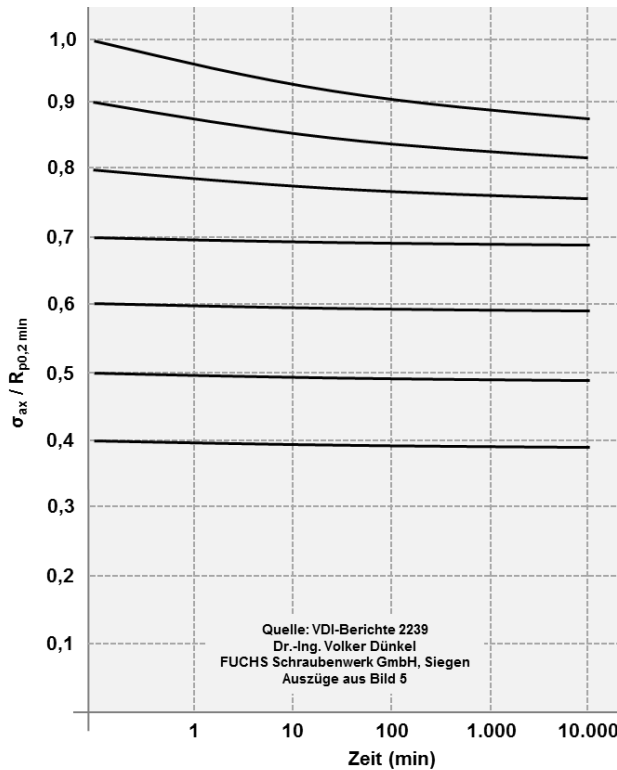


Abb.2: Rückgang der Vorspannkraft streckgrenzgesteuert vorgespannter Schrauben

Im Stahl- und Maschinenbau werden Schrauben noch höher ausgelastet. Während es im Maschinenbau durchaus auch üblich ist, die Schrauben oberhalb der Streckgrenze zu verspannen, siehe auch streckgrenzgesteuerte Anzugsverfahren, wird im Stahlbau mit 70% der Zugfestigkeit F_m angezogen. Im sogenannten Eurocode (DIN EN 1090-2:2008-12, Ersatz für DIN 18800-7:2008-11) findet sich unter 8.5 Anziehen planmäßig vorgespannter Schrauben:

$$\text{Nennwert der Mindestvorspannkraft } F_{p,C} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

$$f_{ub} = \text{Nennfestigkeit des Schraubenwerkstoffs}$$

$$A_s = \text{Spannungsquerschnitt}$$

Das entspricht einer Auslastung der Mindeststreckgrenze $R_{p0,2}$ von ca. 77% bis 88%, je nach der Festigkeitsklasse der Schrauben. Die übliche Auslastung der Streckgrenze $R_{p0,2}$ hochfester Schrauben (10.9 und 12.9) ist von 90% auf 77% zurückgenommen und deckt sich damit mit den allgemeinen Erkenntnissen. Niedrig legierte Schrauben, wie die der Festigkeitsklasse 5.6, werden im Stahlbau nicht mehr verwendet, dürften aber höher ausgelastet werden.

Nach der DIN EN 1993-1-8, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen, werden die Kategorien von Schraubverbindungen festgelegt.

Kategorie A	Scher- und Lochleibungsverbindung
Kategorie B	Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
Kategorie C	Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit
Kategorie D	nicht vorgespannt
Kategorie E	vorgespannt

Im nationalen deutschen Anhang DIN EN 1993-1-8/NA, werden die Anforderungen an die Vorspannkraft festgelegt:

Kategorie B und C	mit 70% f_{ub} (Zugfestigkeit)
Kategorie E	mit 70% f_{ub} (Zugfestigkeit) = volle Vorspannkraft
Kategorie E	mit 70% f_{yb} (Streckgrenze) = nicht voll vorgespannte Verbindung

Als Sicherung gegenüber Lockern, reicht in der Regel eine Vorspannkraft größer 50% f_{yb} (Streckgrenze) aus.

In der folgenden Tabelle (Tab.1) werden die unterschiedlichen Auslastungen, je nach Schraubenfestigkeit, einmal vergleichend dargestellt.

Tab.1: Schraubenkennwerte nach DIN EN ISO 898 und Vergleich der unterschiedlichen Auslastungsverfahren			
Festigkeitsklasse nach DIN EN ISO 898	8.8	10.9	12.9
Mindeststreckgrenze $R_{p0,2}$ in MPa ¹⁾	640	900	1080
Mindestzugfestigkeit F_m in MPa	800	1000	1200
Auslastung mit 70% $R_{p0,2}$ - optimale Auslastung	448	630	756
Auslastung mit 90% $R_{p0,2}$ - üblich im Stahl- und Maschinenbau	576	810	972
Auslastung mit 70% F_m - nach Eurocode DIN EN 1090 f. Stahlbau	560	700	840
Auslastung $R_{p0,2}$ nach Eurocode	88%	77%	77%

¹⁾ 1 MPa = 1 N/mm²

Die jeweils erreichbaren Schraubenkräfte werden in Tabelle 2 (Tab.2) dargestellt.

Tab.2: Schraubenkräfte für Schrauben M20 in kN			
Festigkeitsklasse nach DIN EN ISO 898	8.8	10.9	12.9
Auslastung mit 70% $R_{p0,2}$ - optimale Auslastung	113	161	189
Auslastung mit 90% $R_{p0,2}$ - üblich im Stahl- und Maschinenbau	145	207	241
Auslastung mit 70% F_m - nach Eurocode DIN EN 1090 f. Stahlbau	142	179	209
Auslastung $R_{p0,2}$ nach Eurocode	88%	77%	77%

In der folgenden Tabelle werden die Streckgrenzen üblicher Schrauben, z.B. aus nichtrostenden Werkstoffen nach DIN EN ISO 3506 und für Druckgeräte nach DIN EN 10269, dargestellt (Tab.3).

Tab.3: Streckgrenzen unterschiedlicher üblicher Schrauben-/Mutterwerkstoffe in N/mm ²						
5.6 oder YK (CK35, C35E)	8.8	A2/A4-50	A2/A4-70	KG (25CrMo4)	GA (21CrMoV5-7)	GC / B7 (42CrMo4 / ASTM A193 Gr. B7)
300	640	210	450	440	550	730

Die empfohlenen Anzugsmomente verschiedener Werkstoffe und Schraubenformen, wie z. B. mit Vollschaft (Tab.4) oder Dehnschaft (Tab.5) bzw. mit Vollschaft und zölligen, imperialen Gewinden (Tab.6) werden in den nächsten Tabellen gelistet. Ebenfalls sind die Vorspannkräfte bei 70% Streckgrenzauslastung $R_{p0,2}$ genannt.

Achtung: Wichtige Hinweise zu Schraubenverbindungen mit Kunststoff-U-Scheiben oder Dichtungen im Krafthaupschluss

Zur elektrochemischen Potentialtrennung dürfen, auf keinen Fall, Unterlegscheiben aus Kunststoffen mitverspannt werden. Dies wurde bereits 1962 im Fachbuch: Berechnung und Gestaltung von Schraubenverbindungen, 3. Auflage, Springer Verlag, von Prof. Dr.-Ing. H. Wiegand und Dr.-Ing. K.-H. Illgner, veröffentlicht.

Weichstoffdichtungen aus Gummi, gummigebundener Faserstoff oder PTFE/ePTFE verursachen durch ihr Setzverhalten starke Relaxation, diese liegt je nach Werkstoff zwischen 40 und 70%, bei PTFE sogar bei 90%. Früher verwendete Asbestdichtungen (IT) verursachen eine Relaxation von ca. 50%, dies wurde bereits 1940, im Fachbuch: Berechnung und Gestaltung von Schraubenverbindungen, Erstausgabe, Verlag Julius Springer, von Dr.-Ing. H. Wiegand und Ing. B. Haas, veröffentlicht.

Bei Flanschverbindungen sollten grundsätzlich Dichtungen, wie Grafit- oder Metall-Weichstoffdichtungen eingesetzt werden, die ein möglichst niedriges Fließ- bzw. Setzpotential haben, wie Wellring-, Spiral- oder Kammprofil-dichtungen. Hier kann dann auch PTFE als Weichstoff verwendet werden.

Warnung:

Die im Markt, auf Grund der fehlenden oder falschen Normung der Geometrie, angebotenen Dichtungen, sind nicht immer von ausreichender Qualität. Besonders gilt dies für Kammprofil-dichtungen, denn nach Norm wird für PTFE eine zu dicke Auflage vorgeschrieben und dadurch hat diese Dichtung ähnliche Fließeigenschaften wie eine Flachdichtung aus Plattenmaterial.

Die Verwendung von Kunststoffunterlegscheiben und fließenden Dichtungen in Schraubenverbindungen, im Kraftschluss, entspricht nicht dem Stand der Technik!

Es ist grundsätzlich die Festigkeit der Flansche zu beachten, gegebenenfalls ist diese rechnerisch zu überprüfen. Diese Berechnungen führen wir gerne für Sie durch. Bei Vorschweißflan-schen hat sich seit Jahrzehnten die Anwendung von Grafit- und Metall-Weichstoffdichtungen, mit 70% ausgelasteten Schrauben, bewährt.

Tab.4: Anzugsmomente in Nm und Vorspannkraft in kN für Vollschraffen für übliche Schraffen-
größen und Werkstoffe bei Reibungskoeffizient 0,12 für eine Streckgrenzauslastung um ca.70% $R_{p0,2}$ ^{A)}

Nenngröße des Gewindes M Steigung P in mm	Maß- einheit Dreh- moment Vorspann- kraft	5.6 oder YK (CK35, C35E)	8.8	A2/A4 -50	KG (25CrMo4) oder A2/A4-70 bis M39	GA (21CrMoV5- 7)	GC (42CrMo4)	$R_{p0,2}$ 1.000 N/mm ²
10 1,5	Nm kN	20 12,2	45 26,0	15 8,5	30 17,9	40 22,3	50 29,6	70 40,6
12 1,75	Nm kN	35 17,6	75 37,6	25 12,3	50 26,4	70 32,3	90 42,9	120 58,8
14 2,0	Nm kN	60 24,2	120 51,5	40 16,9	80 35,4	100 44,3	140 58,8	190 80,5
16 2,0	Nm kN	90 33,0	180 70,3	60 23,1	130 49,4	160 60,4	220 80,2	280 109,9
18 2,5	Nm kN	120 40,3	260 88,7	80 28,2	170 60,3	220 73,9	300 98,1	400 134,4
20 2,5	Nm kN	170 51,5	360 113,0	120 36,0	250 76,9	300 94,3	400 125,1	550 171,5
22 2,5	Nm kN	220 63,6	500 140,0	150 44,6	330 95,1	400 116,5	550 154,8	740 212,3
24 3,0	Nm kN	300 74,1	650 163,0	200 51,9	420 110,7	520 136,0	700 180,4	950 247,3
27 3,0	Nm kN	400 96,4	900 212,0	300 67,5	600 143,5	750 176,5	1000 234,6	1400 321,6
30 3,5	Nm kN	600 118,0	1300 259,0	400 82,5	850 177,4	1100 216,0	1400 286,8	1900 392,9
33 3,5	Nm kN	800 146,0	1700 321,0	550 102,1	1100 218,0	1400 267,0	1900 354,6	2600 486,4
36 4,0	Nm kN	1000 172,0	2200 377,0	700 120,1	1500 256,5	1800 315,0	2400 417,1	3300 572,2
39 4,0	Nm kN	1300 205,0	2800 451,0	900 143,5	1900 307,0	2300 376,0	3000 497,1	4200 682,8
42 4,5	Nm kN	1600 235,0	3500 517,0	1100 164,6	2300 352,0	2900 431,0	3800 570,9	5200 783,6
45 4,5	Nm kN	2000 273,0	4300 601,0	1400 191,1	3000 408,0	3600 500,0	4700 662,4	6500 910,2
48 5,0	Nm kN	2400 309,0	5200 679,0	1700 216,1	3500 462,0	4300 566,0	5700 748,8	7900 1029,2
52 5,0	Nm kN	3000 370,0	6700 813,0	2100 258,7	4500 553,0	5600 678,0	7300 896,5	10000 1232
56 5,5	Nm kN	3800 426,0	8500 938,0	2700 289,4	5500 637,0	6900 782,0	9000 1034,8	12500 1421,0

^{A)} Die Werte sind sinnvoll gerundet, Quelle: Grohmann, Wissenswertes über Edelstahl-schrauben, 1991

Tab.5: Anzugsmomente in Nm und Vorspannkraft in kN für Schrauben mit Dehnschaft für übliche Schraubengrößen und Werkstoffe bei Reibungskoeffizient 0,12 für eine Streckgrenzauslastung um ca. 70% $R_{p0,2}$ ^{A)}

Nenngröße des Gewindes M Steigung P in mm	Maßeinheit Drehmoment Vorspannkraft	5.6 oder YK (CK35, C35E)	8-8	A2/A4 -50	KG (25CrMo4) oder A2/A4-70 bis M39	GA (21CrMoV5-7)	GC (42CrMo4)	$R_{p0,2}$
								1.000 N/mm ²
10 1,5	Nm kN	12 7,5	-	8 5,6	20 11,7	25 14,6	35 19,3	45 26,6
12 1,75	Nm kN	25 11,0	-	15 8,2	36 17,3	45 21,6	60 28,5	80 39,2
14 2,0	Nm kN	35 15,3	-	25 11,5	55 24,0	70 30,0	90 38,2	125 54,6
16 2,0	Nm kN	60 22,2	-	40 16,6	90 34,8	120 43,5	150 57,6	210 79,1
18 2,5	Nm kN	80 25,9	-	50 19,4	130 40,7	160 50,8	200 67,3	280 92,4
20 2,5	Nm kN	110 34,5	-	70 25,9	180 54,2	220 67,8	290 89,6	400 123,2
22 2,5	Nm kN	150 44,3	-	100 33,2	240 69,6	300 87,0	400 114,9	550 158,2
24 3,0	Nm kN	200 49,8	-	120 37,3	300 78,2	370 97,8	500 123,5	675 177,8
27 3,0	Nm kN	280 64,5	-	180 48,4	450 101,5	550 126,5	700 167,4	985 230,3
30 3,5	Nm kN	400 81,3	-	250 290,3	600 128,0	800 160,0	1000 211,6	1400 290,5
33 3,5	Nm kN	500 100,0	-	350 75,0	800 157,0	1000 196,5	1400 260,0	1900 357,0
36 4,0	Nm kN	650 116,0	-	430 87,2	1100 182,5	1300 228,5	1700 302,1	2400 415,1
39 4,0	Nm kN	900 143,0	-	550 107,3	1400 225,0	1800 281,0	2200 372,3	3200 511,0
42 4,5	Nm kN	1100 162,5	-	700 121,9	1700 255,5	2100 319,0	2800 422,2	3900 580,3
45 4,5	Nm kN	1400 194,0	-	900 145,4	2200 305,0	2700 381,0	3600 504,4	4900 692,3
48 5,0	Nm kN	1700 216,5	-	1100 162,3	2600 340,0	3300 425,0	4300 562,6	5900 773,0
52 5,0	Nm kN	2100 258,5	-	1400 194,0	3400 407,0	4200 508,0	5500 672,9	7600 924,0
56 5,5	Nm kN	2700 297,5	-	1700 223,2	4200 468,0	5200 585,0	6900 773,8	9400 1063,0

^{A)} Die Werte sind sinnvoll gerundet, Quelle: Grohmann, Wissenswertes über Edelstahlschrauben, 1991

Tab.6: Anzugsmomente in Nm und Vorspannkräfte in kN für Stud- and Heavy Hex-Bolts mit Gewinde UNC/8 UN aus ASME-Werkstoffen für übliche Schraubengrößen und Werkstoffe bei Reibungskoeffizient 0,12 für eine Streckgrenzauslastung um ca. 70% R_{p0,2}^{A)}

Nenngröße des Gewindes “ (Imperial)	Steigung P Nennung mm	Maßeinheit Drehmoment Vorspannspannkraft	A193 B7, B16 oder A 320 L7	A354 BC	A193 B8, B8C, B8T, B8M, B8P Streckgrenze vom Ø abhängig		KG (25CrMo4) oder A2/A4- 70 bis 1 1/2“ B)	8.8 B)	R _{p0,2} 1.000 N/mm ²
					warm-kalt- verfestigt	abge- schreckt			
1/2“	UNC 1,95	Nm kN	100 46,1	110 47,9	100 43,9	30 13,2	60 28,0	90 40,1	140 63,7
5/8“	UNC 2,31	Nm kN	200 74,0	210 76,9	190 70,4	60 21,2	120 45,0	180 64,3	280 102,2
3/4“	UNC 2,54	Nm kN	350 109,0	360 113,0	330 103,7	100 31,2	210 66,2	300 94,8	480 150,5
7/8“	UNC 2,82	Nm kN	560 151,0	580 156,9	420 115,1	160 43,2	340 91,8	490 131,4	770 208,6
1“	UNC 3,18	Nm kN	850 198,2	860 205,8	630 151,1	240 56,7	500 120,4	730 172,4	1150 273,7
1 1/8“	8 UN 3,18	Nm kN	1200 258,5	1300 268,5	750 159,9	340 73,9	730 157,1	1000 224,9	1650 357,0
1 1/4“	8 UN 3,18	Nm kN	1700 326,9	1700 339,5	800 155,8	470 93,5	1000 198,7	1500 284,4	2300 451,5
1 3/8“	8 UN 3,18	Nm kN	2200 402,9	2300 418,5	1100 192,0	640 115,2	1400 244,8	2000 350,6	3100 556,5
1 1/2“	8 UN 3,18	Nm kN	2900 488,0	3000 506,9	1400 232,6	830 139,5	1800 296,6	2500 424,7	4000 674,1
1 5/8“	8 UN 3,18	Nm kN	3800 581,8	4000 604,3	-	1100 166,4	2300 353,6	3300 506,3	5200 803,6
1 3/4“	8 UN 3,18	Nm kN	4700 680,1	4900 706,4	-	1300 194,5	2900 413,3	4100 591,8	6500 939,4
1 7/8“	8 UN 3,18	Nm kN	5800 788,0	6000 818,6	-	1700 225,3	3500 478,9	5000 685,8	8000 1088,5
2“	8 UN 3,18	Nm kN	7000 905,7	7300 940,7	-	2000 258,9	4300 550,4	6100 788,0	9700 1250,9
2 1/4“	8 UN 3,18	Nm kN	10000 1164,1	10500 1209,1	-	2900 332,8	6200 707,5	8800 1012,4	14000 1607,9
2 1/2“	8 UN 3,18	Nm kN	14000 1452,0	14500 1508,1	-	4000 415,1	8500 881,1	12200 1263,5	19300 2005,5

^{A)} Die Werte sind sinnvoll gerundet, Quelle: Grohmann, Wissenswertes über Edelstahlschrauben, 1991

^{B)} Die Werte gelten wegen der abweichenden Größe der Auflageflächen nicht für Schrauben mit Muttern nach DIN 934 oder ISO 4032, siehe Poster „Gegenüberstellung der Schlüsselweiten verschiedener Muttern“ unter www.flangevalid.com/Downloads/Schrauben

Mehr zu Schrauben, Flanschen, Dichtungen und Dichtsystemen und deren Montage finden Sie in dem von uns herausgegebenen Dichtungsvademecum (ISBN-13: 978-3-934736-23-8, PP Publico Publications, www.pp-publico.de), in der lizenzierten Übersetzung der ASME PCC-1-2010 zur Montage von genormten Stahlflanschverbindungen (ISBN-13: 978-3-934736-22-1, PP Publico Publications, www.pp-publico.de) und in unserem Handbuch „Technische Informationen für Dichtverbindungen“ (www.flangevalid.com). Unser neustes Buch „10 Schritte zur optimalen, auf Dauer technisch dichten Dichtverbindung“ (ISBN-13: 978-3-934736-27-6) ist beim Verlag PP Publico Publications herausgekommen.

Weitere interessante Informationen zu verschiedenen Themen finden Sie auf der Homepage www.flangevalid.com.

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 / ®flangevalid

Stand 16.07.2019