

Berechnung querbelasteter Schraubenverbindungen

Hofmann, S.

Die Querbelastung von Schrauben stellt im klassischen Maschinenbau eine der typischen Belastungsarten für Schraubenverbindungen dar. Für die Berechnung dieser Belastungssituation bzw. Schraubenverbindungen im Allgemeinen existieren verschiedene Richtlinien und Normen. Im folgenden Artikel sollen einige davon bezüglich ihrer Aussagen für den Berechnungsfall der Querbelastung vorgestellt werden.



Bolted joints under transverse loads are a typical load situation for classical mechanical engineering. Several technical guidelines and standards exist for the calculation of this type of joint loads or bolted joints in general. The statements of some of these concerning this issue are to be presented in the following article.

Querbelastete Schraubenverbindungen

Eine typische Anwendung von Befestigungsschrauben im klassischen Maschinenbau ist z.B. die Flanschverschraubung, bei der zwei Kreisflansche in einem Wellenstrang miteinander verbunden werden. Ein Beispiel für eine Flanschverschraubung zeigt Abbildung 1. Aufgabe der Verbindung ist hierbei ein Drehmoment M_T von einem Wellenteil auf das nächste zu übertragen. Dies wird durch die Übertragung von Querkraften an den Verschraubungsstellen F_Q auf dem Lochkreis r_T der Verschraubung gewährleistet.

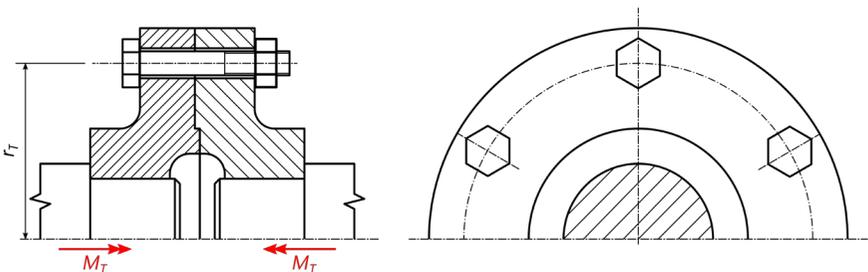


Abbildung 1: Beispiel für eine querbelastete Schraubenverbindung

Schraubenverbindungen zählen zu den lösbaren, kraftschlüssigen Verbindungen, weshalb die Querkräfte F_q in der Regel durch einen Reibschluss zwischen den durch die Schraubenvorspannkraft F_S verspannten Teilen übertragen werden. Weiterhin können Schraubenverbindungen natürlich auch unmittelbar durch Querkräfte beansprucht werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Berechnungswerke für querbelastete Schraubenverbindungen angegeben sowie die Berechnung erläutert. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Aussagen bezüglich der Lastverteilung, dynamischen Festigkeit und gegebenenfalls form-schlüssigen Belastung gelegt. Eine mögliche Einteilung querbelasteter Schraubenverbindungen zeigt Abbildung 2.

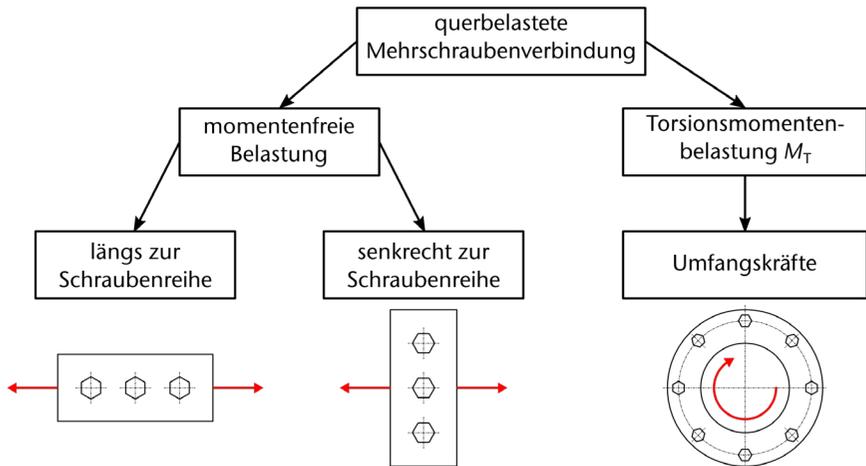


Abbildung 2: Systematik querbelasteter Schraubenverbindungen (nach /2/)

Berechnung nach VDI 2230

Die für den klassischen Maschinenbau wohl bedeutendste Berechnungsvorschrift für Schraubenverbindungen stellt die VDI-Richtlinie 2230 für die „Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen“ dar. Sie besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil („Blatt 1“; /1/) stellt das Grundlagenwerk dar und behandelt die Berechnung für „Zylindrische Einschraubenverbindungen“. Hierzu sei angemerkt, dass für die Berechnung einer Schraubenverbindung nach /1/ nur einzelne Schrauben berechnet werden. Die der Berechnung einer Schraubenverbindung nach /1/ zugrunde liegende Vorstellung ist die zweier gegeneinander verspannten Federn, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Schraube wird hierbei durch eine Zugfeder symbolisiert, da sie sich unter Vorspannung längt und hierbei durch die Schraubenkraft F_S auf Zug beansprucht wird. Die verspannten

Teile (Flansch) werden infolge der Schraubenvorspannkkräfte gestaucht und auf Druck beansprucht. Hierbei wirken sie mit der Flanschkraft F_p der Schraubenvorspannung entgegen. Sie werden deshalb in der nachfolgenden Abbildung durch eine Druckfeder symbolisiert.

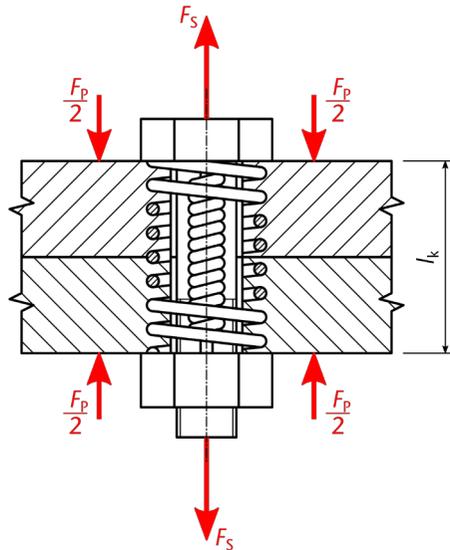


Abbildung 3: Modellvorstellung einer Schraubenverbindung (Federmodell)

Der genaue Berechnungsgang einer Schraubenverbindung nach /1/ berücksichtigt nicht nur die reinen Längenänderungen der Schraube und des Flanschs, sondern auch die Beeinflussung der Verformungsverhältnisse an der Stelle der Verschraubung durch die Betriebslasten. Ein großer Anteil der Richtlinie /1/ behandelt auch die Problematik der Schraubenmontage, bei der in der Regel nur mittelbar auf die infolge des Anziehens mit einem Drehmoment erreichte Schraubenvorspannung geschlossen werden kann. In der Regel geht ein Großteil der Montagearbeit durch Reibung unter dem Schraubenkopf und im Gewinde verloren und nur ein Bruchteil des Drehmoments wird wirklich in die gewünschte Vorspannung umgesetzt. Für genauere Ausführungen zu den bisher genannten Themen sei auf den Volltext in /1/ verwiesen, da in diesem Artikel hauptsächlich die Aussagen bezüglich einer Quer- bzw. Scherbelastung der Schrauben vorgestellt werden sollen.

Bezüglich einer Scherbelastung der Schrauben besteht in /1/ die Aussage, dass „es nicht zu Relativbewegungen zwischen der Schraube und/oder den verspannten Teilen (Gleiten) kommen darf. Bei SV [Schraubenverbindungen], wo diese Forderung nicht erfüllt werden kann bzw. nicht besteht, ist bei der Auslegung

sicherzustellen, dass bei Überlastung eine eingeschränkte weitere Nutzung möglich ist oder aber andere im Kraftfluss liegende Komponenten durch das Versagen an einer Sollbruchstelle geschützt werden“¹. Dies bestärkt zum einen den kraftschlüssigen Anspruch an Schraubenverbindungen, erlaubt jedoch unter bestimmten Voraussetzungen auch die Benutzung von Schrauben als formschlüssige Verbindungselemente.

Bevor auf die kraftschlüssige und formschlüssige Berechnung der Einschraubenverbindungen eingegangen wird, ist zuerst zu klären, wie aus einer Mehrschraubenverbindung einzelne Schrauben (gedanklich) herausgelöst werden können. Dies ist erforderlich, da wie bereits anfangs erwähnt, die Berechnungen nach /1/ nur für „Einschraubenverbindungen“ gelten. Hierzu gibt bereits „Blatt 1“ (/1/) der VDI-Richtlinie 2230 entsprechende Hinweise, welche in „Blatt 2“ (/2/) nochmals detaillierter erläutert werden.

In /2/ werden Hinweise gegeben, wie über Verfahren der Starrkörper-, Elastomechanik oder numerische Methoden (FEM) auf die Lastverteilung und somit die Schraubenbelastung der einzelnen Schrauben einer Mehrschraubenverbindung geschlossen werden kann. Bei Verfahren der Starrkörpermechanik werden nur Axial- und Querkräfte an den Einschraubenverbindungen berücksichtigt, Biegemomente infolge exzentrischer Krafteinleitungen werden jedoch vernachlässigt. Eine genauere Abschätzung der Belastungen an den einzelnen Schrauben einer Mehrschraubenverbindung kann durch die Erweiterung der Betrachtungen um elastische Verformungen und Nachgiebigkeiten erreicht werden. Die grundlegende Vorgehensweise zur analytischen Berechnung von Mehrschraubenverbindungen (MV) und dem anschließenden Herauslösen von Einschraubenverbindungen (EV) nach /2/ ist in Abbildung 4 dargestellt. Hierzu sei angemerkt, dass bei Betrachtung der MV als Starrkörpermodell sich automatisch ein unterhalb des Schraubenkopfs wirkender ($n = 1$) zentrischer Kraftangriff ($a = 0$) an der EV ergibt. Hieraus können sich zum Teil erhebliche Unsicherheiten für die ermittelten Belastungen an den anschließend nach /1/ zu berechnenden EV ergeben.

Rotationssymmetrische Schraubenfelder (sogenannte Kreisflansche), stellen einen im Maschinen- und Anlagenbau weit verbreiteten Sonderfall von Mehrschraubenverbindungen dar. Nach /2/ liegen für diese Art der MV in der Regel axialzentrische, also durch den Schwerpunkt des Schraubenfelds verlaufende Belastungen vor, sodass für diese von einer gleichmäßigen Belastung aller Schrauben des Kreisflansches ausgegangen werden kann. Bei zusätzlicher Belastung mit einem Biegemoment würde sich diese Situation jedoch natürlich ändern. Weißt ein Kreisflansch mehrere konzentrische Lochkreise auf, so wird sich die Momentenübertragung auf diese aufteilen. Nach /2/ ist hierbei zu beachten, dass „die höchstbelastete Verschraubungsstelle nicht zwingend den höchsten Beitrag zur Momentenübertragung liefert“².

¹ Kapitel 5.5.6 in /1/

² Anhang A1 in /2/

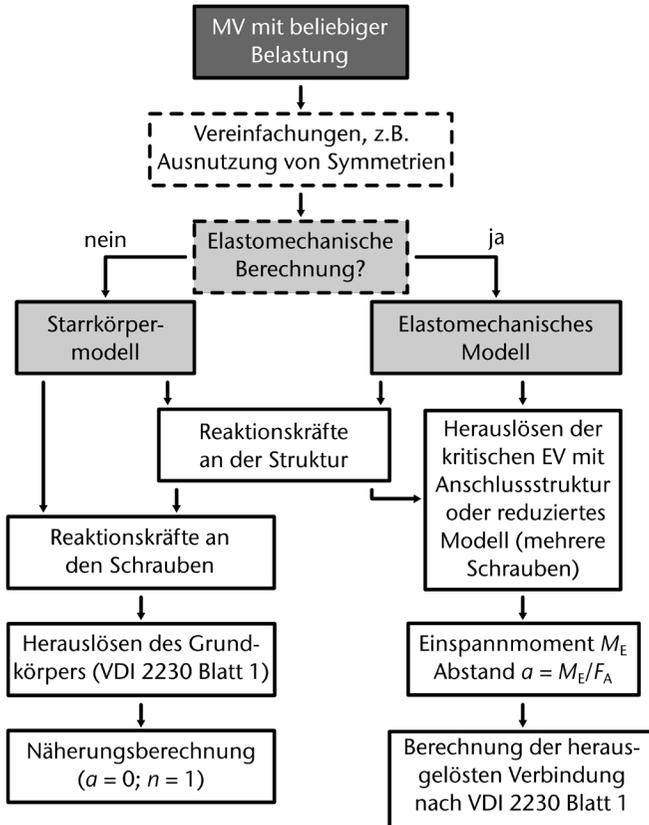


Abbildung 4: Grundlegende Vorgehensweise zur analytischen Berechnung von MV und Herauslösen einer EV (nach /2/)

Einen besonderen Einfluss auf die Lastaufteilung an Schraubenfeldern unter Torsionsbelastung hat die relative Lage der n_s Verschraubungsstellen zu den Stellen der Momenteneinleitung und -ausleitung. Wird das Moment M_T sowohl innerhalb des Schraubenfelds eingeleitet, als auch ausgeleitet, so lässt sich nach /2/ die daraus am Lochkreis $r_{T,i}$ resultierende Querbelastung $F_{q,i}$ nach Gleichung 1 bestimmen. Weiterhin folgt aus Gleichung 1, dass sich die höchsten Belastungen am kleinsten Lochkreis $r_{T,min}$ des Kreisflansches ergeben. In diesem Fall sind zwar die Schrauben auf einem Teilkreis gleichbelastet, die Belastung der Schrauben verschiedener Teilkreise kann jedoch durchaus unterschiedlich ausfallen.

$$F_{q,i} = \frac{M_T}{n_s \cdot r_{T,i}}$$

Wird das Moment wiederum sowohl außerhalb des Schraubenfelds eingeleitet, als auch ausgeleitet, so gilt nach /2/ für die sich ergebenden Querbelastrungen Gleichung 2.

$$F_{q,i} = \frac{M_T \cdot r_{T,i}}{\sum_{i=1}^{n_k} r_{T,i}^2} \quad 2$$

Die höchstbelastete Einschraubenverbindung liegt somit auf dem größten Lochkreis. Liegt eine Mischung aus außen- und innenliegender Momentenein- und -ausleitung vor, so ist mit Gleichung 1 zu rechnen.

Anzumerken ist, dass für die Einstellung des berechneten Kräftegleichgewichts ein geringer Schlupf (Relativverschiebung) in der Trennfuge erforderlich ist. Dieser verhält sich direkt proportional zum Lochkreisradius. Ist eine schlupffreie Drehmomentübertragung erforderlich oder eventuell konstruktiv sichergestellt, so ist nur mit dem Lochkreis als lasttragend zu rechnen, der den geringsten Abstand von der Lasteinleitungsstelle hat.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass in Blatt 2 (/2/) eine Abgrenzung zu den im Stahlbau üblichen Berechnungsregeln (nach DIN EN 1090-2 [/3/] und DIN EN 1993-1-8 [/4/]) vorgenommen wurde. Diese besagt, dass die „Schraube grundsätzlich von einer Scherbelastung (ausgenommen Passschrauben) frei zu halten“³ ist. Im Betrieb ist deshalb höchsten falls geringer Schlupf zwischen Verbindungselementen und/oder verspannten Teilen zulässig. Diese Aussage entspricht den Grundaussagen von Blatt 1 (/1/), wird jedoch von der oben bereits beschriebenen Ausnahme in /1/ ebenfalls eingeschränkt.

Nach /1/ kann bei kreisförmigen Flanschverbindungen unter Torsionsbelastung, unabhängig von der Schraubenanzahl, von einer gleichmäßigen Lastverteilung auch für Scherbelastungen ausgegangen werden. Eine ausreichende Sicherheit der verspannten Teile gegen Ausfall durch Versagen in Querkraftrichtung ist gegeben, wenn die in Tabelle 1 angegebenen Mindestabstände zwischen den einzelnen Schrauben und Körperkanten eingehalten werden.

Tabelle 1: Mindestabstände für abschersichere Verbindungen nach /1/ (als Vielfache des Durchmessers d_h der Schraubendurchgangsbohrung)

	Randabstand	Lochabstand
In Querkraftrichtung	$3 \cdot d_h$	$3 \cdot d_h$
Senkrecht zur Querkraftrichtung	$1,5 \cdot d_h$	$3 \cdot d_h$

³ Kapitel 6.3.1.2 in /2/

Nach Überschreiten der Haftreibung geraten die Schrauben in Anlage und werden auf Scherung beansprucht. Die hierbei maximal ertragbare Scherbelastung hängt natürlich von der Scherfestigkeit τ_B der Schraube ab. Für Schrauben mit Festigkeitsklassen nach DIN EN ISO 898-1 (/5/) gelten nach /7/ die in Tabelle 2 wiedergegebenen (Mindest-)Scherfestigkeiten.

Tabelle 2: Scherfestigkeiten für Schrauben nach /7/

Festigkeitsklasse nach DIN EN ISO 898-1	4.6	5.6	8.8	10.9	12.9
τ_B / R_m	0,70	0,70	0,65	0,62	0,60
τ_B in MPa	280	350	520	620	720

Je nach Lage der Trennfuge bzw. Scherfuge ist mit dem entsprechend an dieser Stelle vorhandenen Scherquerschnitt A_t zu rechnen. Liegt der Schaft in der Scherfuge ist für den Scherquerschnitt mit dem an dieser Stelle liegenden Schaftdurchmesser d_i zu rechnen. Liegt das Gewinde in dem auf Scherung beanspruchten Bereich, so ist nach /1/ mit dem Spannungsquerschnitt A_s zu rechnen.

Nach /1/ ist davon auszugehen, dass sich die Vorspannkraft bis zum Versagen der Verbindung weitestgehend abbauen wird. Deshalb kann der Einfluss der Vorspannkraft auf die maximal zulässige Scherkraft $F_{Q,zul,S}$ vernachlässigt werden und es kann für die Schrauben eines querbelasteten Schraubenfelds einheitlich angenommen werden:

$$F_{Q,zul,S} = A_t \cdot \frac{\tau_B}{S_A} \quad 3$$

Hierbei stellt S_A die gewünschte Sicherheit gegen Abscheren dar. Bei einer kombinierten Zug- und Scherbelastung ist eine Berücksichtigung beider Anteile nur dann erforderlich, wenn beide Anteile 25 % der jeweils zulässigen Grenzkkräfte überschreiten.

Neben dem Abscheren der Schrauben, stellt die plastische Verformung der Durchgangsbohrung bzw. in Sonderfällen der Schrauben, die sogenannte Lochleibung, eine weitere wichtige Ausfallursache für querbelastete Schraubenverbindungen dar. Nach /1/ ist bei ausreichenden Rand- und Lochabständen nach Tabelle 1 und typischen Flanschdicken h von mindestens dem 0,2-fachen des Durchmessers der Schraubendurchgangsbohrung d_h von einer gleichmäßigen Beanspruchungsverteilung innerhalb der Bohrung auszugehen. Mit der Streckgrenze des in der Regel niedrigfesteren Bauteilwerkstoffs $R_{p0,2}$ ergibt sich für die maximal ohne plastische Verformung übertragbare Querkraft $F_{Q,zul,L}$ der in Gleichung 4 wiedergegebene Zusammenhang.

$$F_{Q,zul,L} = h \cdot d_t \cdot \frac{R_{p0,2}}{S_L} \quad 4$$

Hierbei ist d_t der in der Durchgangsbohrung wirkende Durchmesser der Schraube und S_L die Sicherheit gegen plastische Verformung durch Lochleibungsdruck. Bei hoch vorgespannten Schraubenverbindungen kann unter Verweis auf /4/ und infolge der an der Bohrungsoberfläche vorherrschenden Druckspannungen die Grenzbelastung um das bis zu 2,5-fache erhöht werden. Werden wiederum die in Tabelle 1 angegebenen Randabstände nicht eingehalten, verringert sich die zulässige Lochleibungskraft um die Hälfte.

Stoßartige dynamische Belastungen mit wechselnder Lastrichtung sind durch geeignete Maßnahmen zu verhindern. Weiterhin ist dynamischer Mikroschlupf (und die damit verbundene Reibkorrosion) durch eine ausreichende Gleitfestigkeit oder andere Maßnahmen zu vermeiden.

Für eine gleitfeste Verbindung nach /1/ ist eine erforderliche Mindestklemmkraft sicherzustellen, welche bei einer Haftreibungszahl μ in den q_F kraftübertragenden Trennfugen die angreifende Querkraft F_Q und/oder in den q_M drehmomentübertragenden Trennfugen das Drehmoment M_T übertragen kann. Für die erforderliche Mindestklemmkraft $F_{K,Q,erf}$ gilt:

$$F_{K,Q,erf} = \frac{F_Q}{q_F \cdot \mu} + \frac{M_T}{q_M \cdot r_T \cdot \mu} \quad 5$$

Die erforderliche Mindestklemmkraft muss durch die nach der Schraubenmontage verbleibende minimale Restklemmkraft $F_{KR,min}$ sichergestellt werden. Die minimale Restklemmkraft in der Trennfuge berechnet sich nach /1/ zu:

$$F_{KR,min} = \frac{F_{M,zul}}{\alpha_A} - F_{PA} \quad 6$$

Die minimale Restklemmkraft ergibt sich somit aus der maximal zulässigen Montagekraft $F_{M,zul}$ vermindert um die Unsicherheit des Anziehverfahrens, ausgedrückt durch den Anziehungsfaktor α_A , und die Flanscentlastungskraft F_{PA} . In der Flanscentlastungskraft ist die Entlastung der Trennfuge infolge der Betriebskräfte, eventuell auftretender Setzeffekte und thermischer Zusatzkräfte berücksichtigt. Letztlich kann somit eine Grenzgleitkraft $F_{Q,zul,\mu}$ mit einer Sicherheit gegen Gleiten S_G berechnet werden:

$$F_{Q,zul,\mu} = \mu \cdot \frac{F_{KR,min}}{S_G} \quad 7$$

Eine Hauptproblematik bei der Berechnung von Schraubenverbindungen bzw. kraftschlüssigen Verbindungen im Allgemeinen ist die bestmögliche Schätzung der wirkenden Reibwerte. Hierzu sind in /1/ Richtwerte unter Hinweis auf eine empfohlene experimentelle Absicherung gegeben. Üblicherweise können

zwischen technischen Oberflächen unter trockener Reibung Haftreibwerte von $0,1 \leq \mu \leq 1,0$ auftreten.

In /1/ werden für schwingend und zugleich formschlüssig beanspruchte Passschrauben folgende Aussagen zur Dauerfestigkeit getroffen: Die lastübertragende Trennfuge muss im Bereich des Passschachts liegen und es kann mit einer Dauerfestigkeit von $\tau_D = 23 \text{ MPa}$ gerechnet werden.

Berechnung nach DIN EN 1993 (Eurocode 3)

Um die Unterschiede und Gemeinsamkeiten bezüglich der Berechnung querbelasteter Schraubenverbindungen besser herausstellen zu können, werden im Folgenden – soweit möglich und sinnvoll – die im Maschinenbau üblichen Begrifflichkeiten verwendet.

Die unter dem Namen „Eurocode 3“ (EC3) bekannten Normen für die „Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten“ stellen die gängige Berechnungsgrundlage für Schraubenverbindungen im Stahlbau dar, wobei hier Schrauben im „Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen“ (/4/) der Richtlinie behandelt werden. Während im Maschinenbau Schrauben in so gut wie allen Fällen vorgespannt werden, wird im Stahlbau zwischen planmäßig vorgespannten, nicht planmäßig vorgespannten und nicht vorgespannten Verbindungen unterschieden. Weiterhin wird im Stahlbau in der Regel von Schraubengarnituren gesprochen, diese bestehen aus einer Schraube mit einer Mutter und je nach Bedarf einer oder mehrerer Scheiben. Wobei nach DIN EN 1090-2 (/3/) bei Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 die Scheiben an der Seite angebracht werden muss an der die Schraubenverbindungen beim planmäßigen Vorspannen gedreht wird. Bei Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 sind sowohl unterhalb des Schraubenkopfs als auch unterhalb der Mutter Scheiben vorzusehen. Weiterhin dürfen planmäßig vorgespannte Schraubengarnituren nicht mit zusätzlichen Sicherungselementen versehen werden.

Nach /3/ sind nicht planmäßig vorgespannte Schrauben mindestens handfest und so anzuziehen, dass die miteinander zu verbindenden Bauteile eine weitgehend flächige Anlage erreichen. Demgegenüber sind nach /3/ planmäßig vorgespannte Schrauben mit einer Mindestvorspannkraft $F_{p,c}$ anzuziehen, die 70% der Zugfestigkeit R_m der Schraube im der Schraubengröße entsprechenden Spannungsquerschnitt A_s ausnutzt. Hierzu sei angemerkt, dass die typischen Schraubengrößen im Stahlbau erst bei M12 beginnen. Soll die Schraubenverbindung gleitfest (also kraftschlüssig) ausgelegt werden, so ist dieses Vorspannkraftniveau einzuhalten. Weiterhin sind nach /3/ für die Sicherstellung eines möglichst hohen Reibwerts die Oberflächen der zu verbindenden Bauteile zu reinigen und von Graten oder eventuell vorhandenen („übermäßig dicken“) Farbanstrichen zu befreien. Für dementsprechend vorbereitete Kontaktflächen können nach /3/ die in Tabelle 3 aufgeführten Haftreibwerte angenommen werden.

Tabelle 3: Anzunehmende Haftreibwerte für Reibflächen nach /3/

Oberflächenbehandlung	Haftreibwert μ
kugel- oder sandgestrahlte Oberflächen, loser Rost entfernt, nicht körnig	0,5
kugel- oder sandgestrahlte Oberflächen: <ul style="list-style-type: none"> spritzaluminiert oder mit zinkbasiertem Produkt spritzverzinkt mit Alkali-Zink-Silikat-Anstrich versehen (Dicke von 50 μm bis 80 μm) 	0,4
mittels Drahtbürsten oder Flammstrahlen gereinigte Oberflächen, loser Rost entfernt	0,3
Oberflächen im Walzzustand	0,2

Nach /4/ können querbelastete Schraubenverbindungen in drei Kategorien aufgeteilt werden:

- Kategorie A: Scher-/Lochleibungsverbindungen
- Kategorie B: Gleitfeste Verbindungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- Kategorie C: Gleitfeste Verbindungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Schraubenverbindungen der ersten Kategorie A können als formschlüssige Verbindungen bezeichnet werden. Als solche bedürfen sie in der Regel keiner Vorspannung oder besonderen Oberflächenbehandlung zur Sicherstellung eines (Mindest-)Haftreibwerts. Verwendet werden können Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9. Aufgrund der mit zunehmender Festigkeit abnehmenden Zähigkeit ist von der Verwendung von Schrauben der Festigkeitsklasse 12.9 abzusehen. Dies gilt insbesondere bei einer möglichen formschlüssigen Belastung.

Als Belastungsgrenzen sind bei formschlüssiger Beanspruchung, wie bereits bei VDI 2230 (/1/), die Schertragfähigkeit und der Lochleibungswiderstand zu berücksichtigen. Für die Schertragfähigkeit bzw. die damit verbundene maximal zulässige Scherkraft $F_{v,Rd}$ gilt nach EC3 (/4/):

$$F_{v,Rd} = A_t \cdot \frac{\alpha_v \cdot R_m}{S_A} \quad 8$$

Hierbei ist R_m die Zugfestigkeit der verwendeten Schraube, A_t der entsprechend wirkende Scherquerschnitt (Berechnung wie nach /1/) und S_A die Sicherheit gegen Abscheren. Der Faktor α_v gibt das Verhältnis zwischen der Scherfestigkeit τ_B und der Zugfestigkeit der Schraube R_m an. Im Gegensatz zu den Aussagen in /1/

die auf /7/ aufbauen (vergleiche Tabelle 2), werden in /4/ leicht unterschiedliche Werte für die Scherfestigkeitsverhältnisse angegeben (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Scherfestigkeiten für Schrauben mit Gewinden in der Scherfuge (in diesem Fall ist als Scherquerschnitt A_τ der Spannungsquerschnitt A_S anzusetzen) nach /4/

Festigkeitsklasse nach DIN EN ISO 898-1	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
α_v	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,5
τ_B in MPa	240	200	300	250	300	480	500

Weiterhin werden in /4/ abhängig von der Lage der Scherfuge unterschiedliche Werte angegeben. Liegt das Gewinde innerhalb der Scherfläche, so ist bei einem hohen Streckgrenzenverhältnis mit einer geringeren Scherfestigkeit für Schrauben gleicher Zugfestigkeit zu rechnen. Liegt stattdessen der Schraubenschaft in der Scherfuge, so gilt für α_v in diesem Fall ein einheitlicher Wert von 0,6.

Werden Passschrauben verwendet, so darf nach /4/ das Gewinde in der Regel nicht in der Scherfuge liegen. Weiterhin sollte die Länge des auf Lochleibung beanspruchten Gewindes nicht mehr als 1/3 der Blechdicke t des beanspruchten Blechs betragen. Abbildung 5 stellt diese Aussage nochmals bildlich dar.

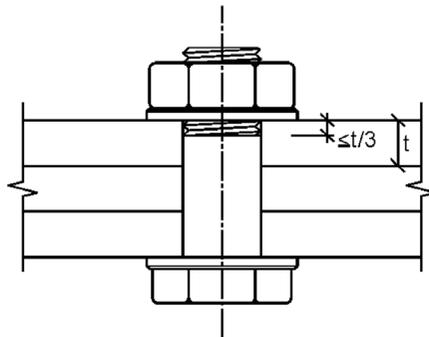


Abbildung 5: Ins Schraubenloch hineinragendes Gewinde einer Passschraube /4/

Für die Lochleibungstragfähigkeit $F_{b,Rd}$ gilt nach /4/ die folgende Formel:

$$F_{b,Rd} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot \frac{R_m}{S_A} \cdot d \cdot t$$

Auffallend ist, dass nach /4/ mit der Zugfestigkeit R_m der verspannten Bauteile gerechnet wird, anstatt wie bei /1/ mit der Streckgrenze. Für den Faktor α_b ist mit dem kleinsten Wert aus α_d , dem Verhältnis der Zugfestigkeiten von Schraube zu verspannten Teilen $R_{m,Schraube}/R_{m,Flansch}$ oder dem Wert 1,0 zu rechnen. Der Faktor α_d beträgt für in Krafrichtung am Rand eines Schraubenfelds liegende Schrauben, mit dem Abstand zum Rand e_1 und dem Durchmesser der Durchgangsbohrung d_h

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_h} \quad 10$$

und für innen liegende Schrauben, mit dem Lochabstand p_1

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_h} - \frac{1}{4} \quad 11$$

Der Faktor k_1 ist bei quer zur Krafrichtung am Rand liegenden Schrauben mit dem kleinsten Wert aus Gleichung 12 anzusetzen, wobei e_2 der Randabstand und p_2 der Lochabstand ist (siehe hierzu Abbildung 6).

$$k_1 = \min\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_h} - 1,7; 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_h} - 1,7; 2,5\right) \quad 12$$

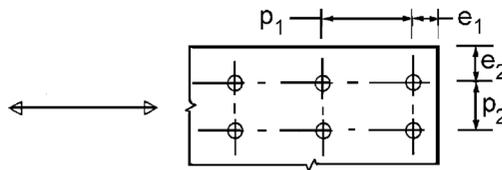


Abbildung 6: Bezeichnung der Rand- und Lochabstände /4/

Für quer zur Krafrichtung innenliegende Schrauben gilt für k_1

$$k_1 = \min\left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_h} - 1,7; 2,5\right) \quad 13$$

Die nach /4/ für obige Abbildung minimal einzuhaltenden Rand- und Lochabstände bei statischer Belastung sind in Tabelle 5 wiedergegeben.

Tabelle 5: Mindestabstände nach /4/ für statische Belastungen

	Randabstand	Lochabstand
In Quer kraftrichtung	$1,2 \cdot d_h$	$2,2 \cdot d_h$
Senkrecht zur Quer kraftrichtung	$1,2 \cdot d_h$	$2,4 \cdot d_h$

Für dynamische Belastungen (Ermüdungsbelastung) erhöhen sich die nach /4/ einzuhaltenden Rand- und Lochabstände und es gelten die in Tabelle 6 aufgeführten Mindestabstände.

Tabelle 6: Mindestabstände nach /4/ für Ermüdungsbelastung

	Randabstand	Lochabstand
In Querkraftrichtung	$1,5 \cdot d_h$	$2,5 \cdot d_h$
Senkrecht zur Querkraftrichtung	$1,5 \cdot d_h$	$2,5 \cdot d_h$

Liegt eine Kombination von Scher- (F_Q) und Zugbelastung (F_Z) vor, so ist die Interaktion mit folgender Formel zu berücksichtigen:

$$\frac{F_Q}{F_{v,Rd}} + \frac{F_Z}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad 14$$

Hierbei ist $F_{t,Rd}$ die zulässige Grenzkraft für eine Zugbelastung der Schrauben.

Nach /4/ darf die Beanspruchbarkeit einer Schraubengruppe als Summe der Lochleibungstragfähigkeiten $F_{b,Rd}$ der einzelnen Schrauben angenommen werden, sofern die Abschertragfähigkeiten $F_{v,Rd}$ der einzelnen Schrauben mindestens so groß sind wie die jeweilige Lochleibungstragfähigkeit. Ist dies nicht der Fall so ist die Anzahl der Schrauben mit der kleinsten in der Gruppe vorhandenen Abscher- bzw. Lochleibungstragfähigkeit zu multiplizieren, um die Übertragungsfähigkeit der Schraubenverbindung zu bestimmen.

Dynamische Belastungen und die für diese Fälle geltenden Auslegungsformeln werden in Teil 1-9 (/6/) von EC3 behandelt. Querbelastete Schrauben in ein- oder zweischnittigen Scher-Lochleibungsverbindungen ist nach /6/ die Kerbfallzahl $\Delta \tau_C = 100$ MPa zugeordnet. Diese gilt wenn das Gewinde nicht in der Scherfläche liegt und die Schrauben der Festigkeitsklassen 5.6, 8.8 oder 10.9 ohne Lastumkehr dynamisch belastet werden. Die wirkende dynamische Schubbeanspruchung $\Delta \tau$ ist hierbei am Schaftquerschnitt zu ermitteln. /6/ gibt eine anzunehmende Wöhlerkurve für Schubbeanspruchungen $\Delta \tau_R$ an, anhand derer auch eine zeitfeste Auslegung querbelasteter Schraubenverbindungen möglich ist. Die Kerbfallzahl ist hierbei als diejenige Spannungsamplitude (Schubspannungsschwingbreite) definiert, die mit $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen ertragbar ist (Position 1 in Abbildung 7). Der Abknickpunkt für die nach /6/ dauerhaft ertragbare Schubbeanspruchung $\Delta \tau_L$ (Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit; Position 2 in Abbildung 7) ist bei 10^8 Schwingspielen definiert und errechnet sich aus der zugeordneten Kerbfallzahl zu

$$\Delta \tau_L = 0,457 \cdot \Delta \tau_C = 45,7 \text{ MPa} \quad . \quad 15$$

Wie oben bereits erwähnt, unterscheidet /4/ zwischen drei Kategorien querbelasteter Schraubenverbindungen. Während die bisher diskutierte Kategorie A den formschlüssigen Verbindungen zuzuordnen ist, stellen die Kategorien B und C (gleitfeste Verbindungen) kraft- bzw. reibschlüssige Verbindungen dar. Die Kategorien B und C unterscheiden sich hierbei nur durch die anzusetzenden Sicherheiten.

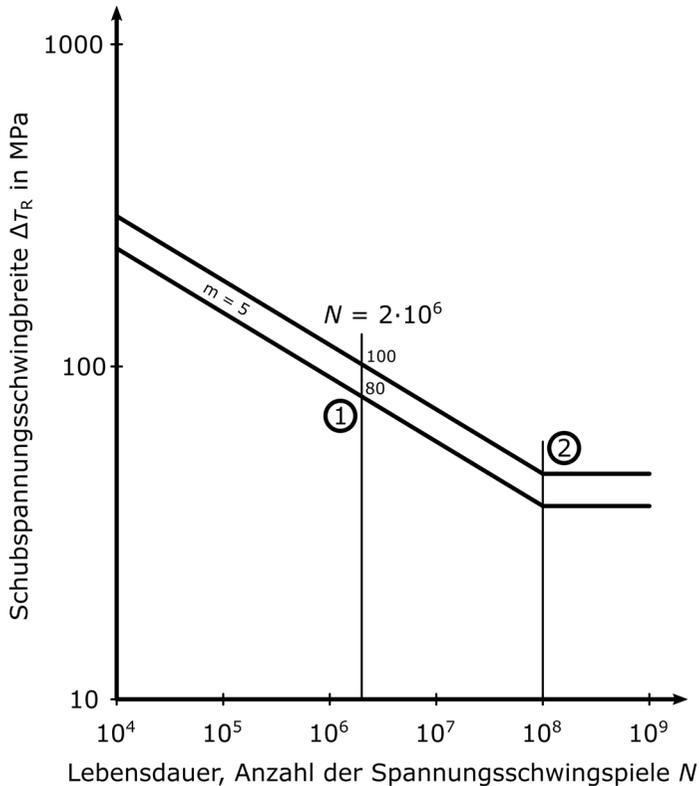


Abbildung 7: Ermüdungsfestigkeitskurve für Schubspannungsschwingbreiten (nach /6/)

Nach /4/ sind für gleitfeste Verbindungen Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9 mit kontrollierter Vorspannung zu verwenden. Die Vorspannkraft $F_{p,C}$ wird hierbei in der Regel auf eine 70 % Ausnutzung der Zugfestigkeit R_m der Schraube in ihrem Spannungsquerschnitt A_S ausgelegt.

$$F_{p,C} = 0,7 \cdot R_m \cdot A_s \quad 16$$

Werden die für diesen Anwendungsfall im Maschinenbau eher unüblichen Langlöcher außer Acht gelassen, so errechnet sich die maximal reibschlüssig übertragbare Querkraft (Gleitwiderstand) $F_{s,Rd}$ nach /4/ zu

$$F_{s,Rd} = \frac{n \cdot \mu}{S_G} \cdot F_{p,C} \quad 17$$

Hier ist S_G die Sicherheit gegen Gleiten und n die Anzahl der Reiboberflächen. Der wirkende Haftreibwert μ kann dabei nach Tabelle 3 (/3/) angenommen werden.

Wird eine gleitfeste Verbindung zusätzlich zur Scherkraft F_Q durch eine Zugkraft F_Z belastet, wird sich die wirkende Vorspannung in der Verbindung verringern und sich dementsprechend ein geringerer Gleitwiderstand ergeben. Dieser Effekt wird nach /4/ durch einen für den Regelfall anzuwendenden pauschalen Ansatz berücksichtigt. Hierbei wird nach /4/ angenommen, dass 80 % der einwirkenden Zugkraft F_Z eine direkte Verringerung der Vorspannkraft $F_{p,C}$ bewirken. Es gilt in diesem Fall

$$F_{s,Rd} = \frac{n \cdot \mu}{S_G} \cdot (F_{p,C} - 0,8 \cdot F_Z) \quad 18$$

Zusammenfassung

Prinzipiell sind sich die Berechnungsweisen querbelasteter Schraubenverbindungen nach VDI 2230 (/1/ und /2/) und EC3 (/4/ und /6/) sehr ähnlich. Im Detail sind jedoch einige Unterschiede zu finden, die im Folgenden kurz dargestellt werden sollen.

Ein erster Unterschied sind die in EC3 gegenüber denen in VDI 2230 höheren Reibwertniveaus und die höheren dynamischen Scherfestigkeiten. Weiterhin sind auch die statischen Scherfestigkeiten unterschiedlich, diese sind jedoch in diesem Fall in EC3 geringer als in VDI 2230. Ebenso sind die einzuhaltenden Mindestrand- und -lochabstände nach EC3 geringer als nach VDI 2230. Während in VDI 2230 Hinweise gegeben werden, wie an Mehrschraubenverbindungen die am höchsten belasteten Schrauben bestimmt werden, sind in EC3 keinerlei derartige Hinweise zu finden. Die reibschlüssige Schraubenberechnung nach VDI 2230 bietet die Möglichkeit viele Einflussfaktoren und Effekte auf die Vorspannkraft zu berücksichtigen. Die entsprechenden Berechnungen nach EC3 beschränken sich hierbei auf die Haupteffekte.

Ein Hauptunterschied zwischen beiden Berechnungswerken bezüglich des in diesem Artikel behandelten Spezialfalls ist jedoch, dass in EC3 eine formschlüssige

Beanspruchung querbelasteter Schrauben explizit vorgesehen ist, während dies in VDI 2230 nur in Ausnahmefällen zulässig ist.

Abschließend sei angemerkt, dass die in diesem Artikel wiedergegebenen Aussagen zur Auslegung und Berechnung querbelasteter Schraubenverbindungen nur einen Auszug aus den gängigen Normen und Richtlinien zu diesem Thema darstellen. Für detaillierte Ausführungen und besonders im Zweifel sei auf die Originaltexte der in diesem Artikel zitierten Normen und Richtlinien verwiesen.

Literatur

- /1/ VDI 2230 Blatt 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Zylindrische Einschraubenverbindungen. Dez. 2014
- /2/ VDI 2230 Blatt 2: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen – Mehrschraubenverbindungen. Dez. 2014
- /3/ DIN EN 1090-2: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken. Okt. 2011
- /4/ DIN EN 1993-1-8: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen. Dez. 2010
- /5/ DIN EN ISO 898-1: Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde. Mai 2013
- /6/ DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung. Dez. 2010
- /7/ Thomala, W.: Beitrag zur Berechnung der Haltbarkeit von Schraubenköpfen mit Kraft-Innenangriff. VDI-Z 126 (1984) 9