

Grundlagen zur Auslegung von Schraubenverbindungen

Um Schraubenverbindungen, welche hohe Kräfte übertragen müssen und deren Versagen schwerwiegende Folgen haben kann, konstruktiv sicher auszulegen, bedarf es einer Untersuchung der Kräfte und Verformungen an den Schrauben sowie verspannten Bauteilen. Dehnung, Stauchung, Betriebskraft sowie Klemmkraft müssen in Relation zu möglichen Festigkeitsklassen, Durchmessern und Klemmlängen der Schrauben gesetzt werden. Das Kraft-Verformungs-Schaubild, auch Verspannungsschaubild genannt, dient dabei als Grundlage und soll im folgenden Artikel die Basis für weiterführende Betrachtungen bilden.

Text und Bilder: Konstantin Matt

Für die Auslegung von Schraubenverbindungen dient grundsätzlich die Richtlinie VDI 2230 «Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen». Darin werden alle erdenklichen Einflussparameter in die Rechnungen mit einbezogen bzw. mit Korrekturfaktoren berücksichtigt. Wir wollen hier die Schraubenverbindung in einem für das grundlegende Verständnis dienendem Umfang betrachten. Das Prinzip des Kräfte- und Verformungsspiels soll an der einfachsten Form einer Schraubenverbindung erläutert werden (vgl. **Abbildung a**).

Wirken wie Druck- und Zugfeder

Vor dem Festdrehen der Mutter sind Schraube und Bauteile unbelastet. Wird die Mutter festgedreht, dann werden die zu verbindenden Teile zusammengedrückt und gleichzeitig wird die Schraube gedehnt. Somit wirken die Bauteile als Druckfeder und die Schraube als Zugfeder. Dieser Vorgang lässt sich durch Kennlinien darstellen, welche im elastischen Bereich der Werkstoffe nach dem Hooke'schen Gesetz Geraden sind (vgl. **Abbildung b**).

Deutlich zu erkennen sind die unterschiedlichen Längenänderungen. Die Schraube wird wesentlich mehr gedehnt als die Bauteile gestaucht werden. Die axiale Vorspannkraft der Schraube ist zugleich die Klemmkraft, mit wel-

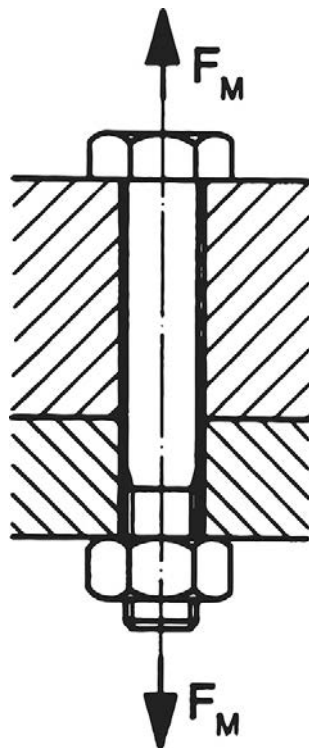


Abbildung a: Standard-Schraubenverbindung im Schnitt.

Illustration a : coupe d'un assemblage vissé standard

cher die Bauteile zusammengedrückt werden. Dieser Zustand gilt jedoch nur, solange noch keine Betriebskraft auf die Verbindung wirkt. Die Vereinigung der Kennlinien ergibt das Verspannungsschaubild im Montagezustand (vgl. **Abbildung c**).

Wirkt auf die Schraubenverbindung nun eine über die äusseren Ebenen der verspannten Teile eingeleitete Betriebskraft – im einfachsten Fall wie hier angenommen eine statische Kraft als Längskraft – so wird die Schraube zusätzlich auf Zug beansprucht und damit nochmals mehr gedehnt. Die verspannten Bauteile hingegen werden entsprechend entlastet. Die Vorspannkraft vermindert sich somit auf eine Restklemmkraft in den Teilen. Diese Verhältnisse lassen sich ebenso im Verspannungsschaubild darstellen (vgl. **Abbildung d**).

Diese Zusammenhänge liefern eine spannende Erkenntnis: Wird die Schraubenkennlinie flacher bei gleichbleibender Steifigkeit der Teile, so wird der Anteil der Betriebskraft, welcher die Schraube zu tragen hat, geringer. Allerdings verringert sich auch die Klemmkraft entsprechend. Die Kunst ist es nun, die Schraubenverbindung so flach zu gestalten, dass ein möglichst geringer Anteil der Betriebskraft von der Schraube getragen werden muss, aber immer noch ausreichend Klemmkraft üb-

TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE

Principes de base du dimensionnement d'assemblages vissés

Pour un dimensionnement sûr de la construction d'assemblages vissés devant transmettre des forces élevées et dont la défaillance pourrait avoir de graves conséquences, il faut étudier les forces et déformations au niveau des vis et des éléments assemblés. L'allongement, la déformation sous pression, la force opérationnelle et la force de serrage doivent être mises en relation avec les classes de résistance, diamètres et longueurs de serrage des vis. Le diagramme force-déformation sert de référence à cet égard et constitue la base d'observations complémentaires dans cet article.

Le dimensionnement des assemblages vissés s'appuie d'une manière générale sur la directive VDI 2230 « Calcul systématique d'assemblages vissés soumis à de fortes

sollicitations ». Tous les facteurs d'influence concevables sont pris en compte dans les calculs, de même que les facteurs de correction correspondants. Nous allons étudier ici

l'assemblage vissé dans une mesure qui permet de comprendre les caractéristiques de base. Le principe du jeu de force et de déformation sera expliqué à l'aide de la forme la plus

simple d'un assemblage vissé (cf. **illustration a**).

>

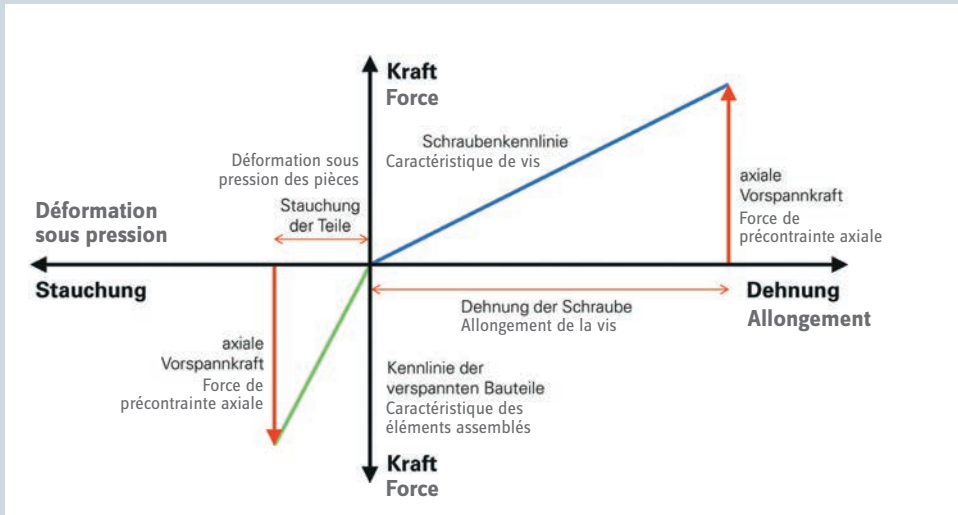


Abbildung b: Verspannungsschaubild
Illustration b : diagramme force-déformation

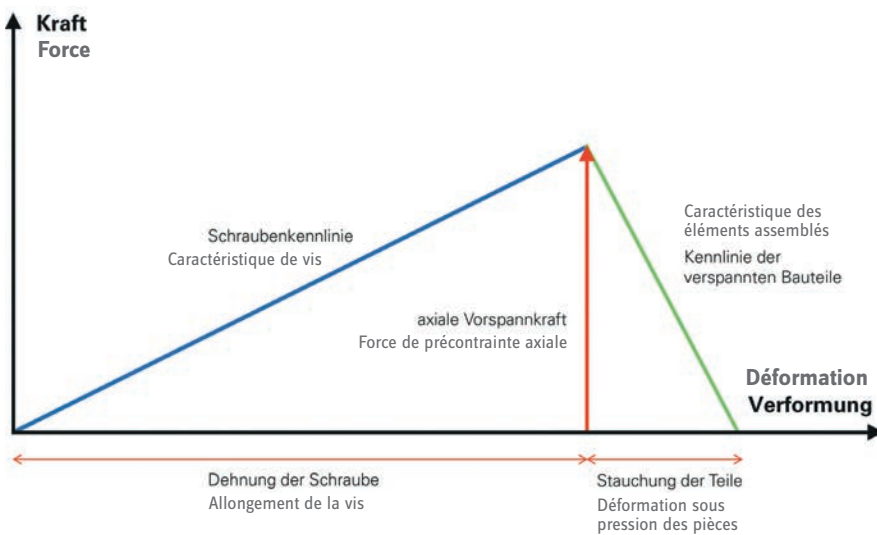


Abbildung c: Zusammenführen der Kennlinien im Verspannungsschaubild
Illustration c : réunion des caractéristiques dans le diagramme force-déformation

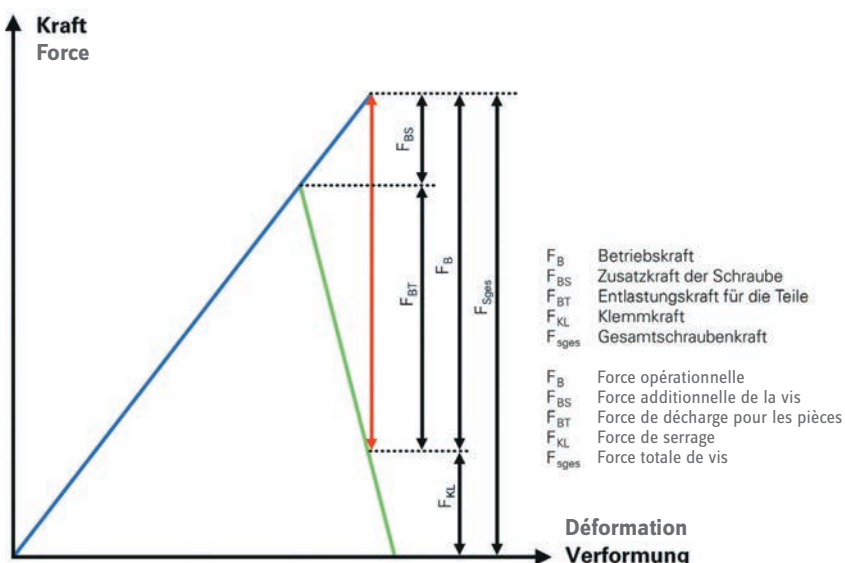


Abbildung d: Verspannungsschaubild mit Betriebskraft
Illustration d : diagramme force-déformation avec force opérationnelle

rig bleibt, um eine gleitfeste Verbindung garantieren zu können. Dabei darf die Streckgrenze der Schraube nicht überschritten werden, um bleibende Verformungen zu vermeiden. Abbildung e soll diesen Zusammenhang grafisch darstellen.

Abschliessend soll noch erklärt werden, wie man die Steigung einer Schraubenkennlinie bestimmen kann. Grundlage dafür bildet das allseits bekannte Hooke'sche Gesetz für die elastische Längenänderung. Es lautet:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Durch Umformen erhält man:

$$\Delta l = \varepsilon * l_0 = \frac{\sigma}{E} * l_0 = \frac{F * l_0}{A * E}$$

Somit ergibt sich für die elastische Längenänderung einer Schraube folgender formelmässige Zusammenhang:

$$\Delta l = \frac{F * l_0}{A * E}$$

- ε Dehnung
- σ mechanische Spannung
- E Elastizitätsmodul
- l_0 Schraubenlänge
- Δl Längenänderung der Schraube
- A Spannungsquerschnitt der Schraube
- F Schraubenkraft

Festigkeitsklasse und Kennlinie

Will man diesen formelmässigen Zusammenhang graphisch darstellen, so ergeben sich im Verspannungsschaubild folgende Kennlinien (vgl. Abbildung f). Vorausgesetzt wird hier eine konstante Schraubenlänge sowie ein konstanter Schraubendurchmesser.

Es wird verdeutlicht, dass die Kennlinie nicht flacher oder steiler wird, indem man die Festigkeitsklasse ändert. Will man eine höhere Festigkeitsklasse bis zur Streckgrenze dehnen, benötigt man dazu mehr Zugkraft. Mehr Kraft bedeutet nach obiger Formel auch mehr Dehnung bei gleichbleibender Steigung der Kennlinie.

> Will man somit eine flachere Kennlinie, gibt es zwei Möglichkeiten: Entweder man wählt einen kleineren Durchmesser oder eine grössere Klemmlänge oder natürlich beides.

Die **Abbildung g** zeigt den Einfluss der Klemmlänge auf die Steigung der Kennlinie. Wählt man beispielsweise die doppelte Schraubenlänge, so wird diese bei gleicher Kraft um das Doppelte gedehnt. Somit ergibt sich eine flachere Kennlinie.

Abbildung h zeigt den Einfluss des Schraubendurchmessers auf die Steigung der Kennlinie. Wählt man beispielsweise den halben Durchmesser, so wird die Schraube bei gleicher Kraft um das Vierfache gedehnt. Somit ergibt sich ebenfalls eine flachere Kennlinie.

Wird eine Schraubenverbindung konstruktiv richtig ausgelegt sowie fachgerecht montiert, so ist die Klemmkraft der Schraube so hoch, dass sie Relativbewegungen der miteinander verschraubten Teile verhindert, welche durch axial oder normal zur Schraubenachse wirkende Kräfte und Momente hervorgerufen werden. Zudem fängt eine ausreichend grosse Klemmkraft die Elastizität der Schraubenverbindung ab, die durch Setz- und Kriecherscheinungen hervorgerufen wird. Daher ist es unabdingbar, kritische Verbindungen entsprechend nachzuprüfen.

Weitere Informationen:
Ing. Konstantin Matt, M.Sc.
Produktmanager Norm- und Sonderteile
konstantin.matt@sfs.ch
Telefon 071 727 65 44
SFS unimarket AG
Befestigungstechnik
9435 Heerbrugg

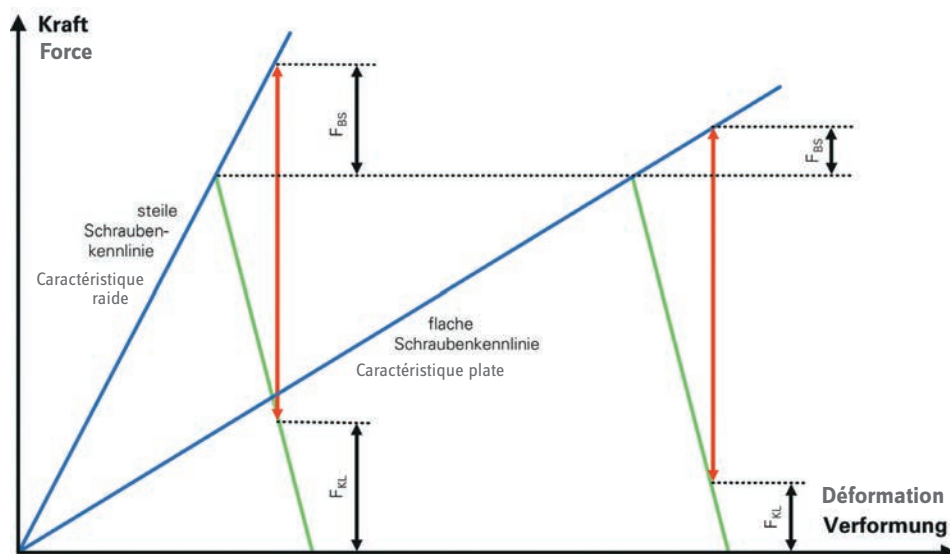


Abbildung e: Auswirkungen einer flachen sowie steilen Schraubenkennlinie auf die Schraubenzusatzkraft sowie Klemmkraft

Illustration e : effet d'une caractéristique de vis plate et raide sur la force de vis additionnelle et la force de serrage

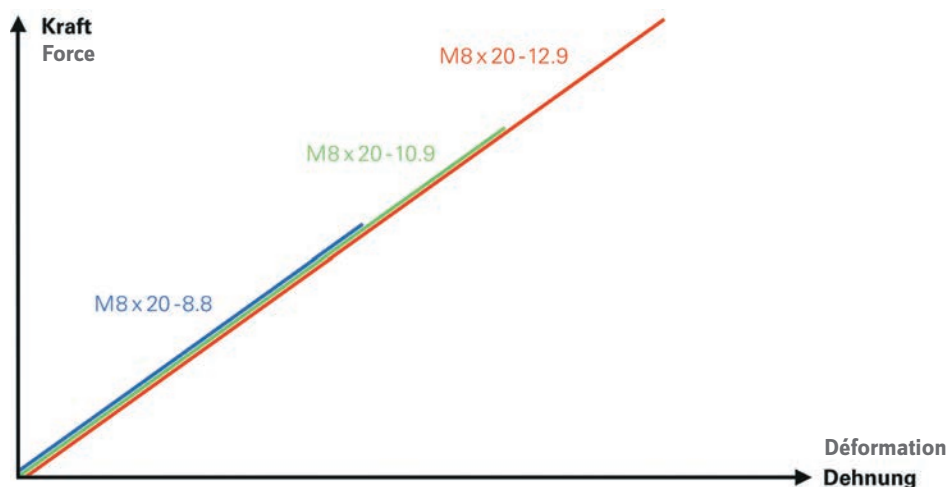


Abbildung f: Zusammenhang von der Festigkeitsklasse der Schraube zur Steigung der Kennlinie bei konstanten Schraubendimensionen

Illustration f : relation entre la classe de résistance de la vis et la pente de la caractéristique pour des dimensions de vis constantes

TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE

> **Action semblable à un ressort de pression et à un ressort de traction**
Avant le serrage de l'écrou, les vis et éléments ne subissent aucune contrainte. Au serrage de l'écrou, les pièces sont comprimées et la vis s'allonge simultanément. Les éléments agissent ainsi comme ressort de pression et la vis comme ressort de traction. Cette opération peut être représentée à l'aide de caractéristiques, qui sont des droites dans la plage élastique des

matériaux, selon la loi de Hooke (cf. **illustration b**).

Les différentes variantes de longueur sont faciles à reconnaître. L'allongement de la vis est nettement plus grand que la déformation sous pression des éléments. La force de précontrainte axiale de la vis est aussi la force de serrage qui comprime les éléments. Cet état dure tant qu'aucune force opérationnelle n'agit sur l'assemblage.

L'union des caractéristiques donne le diagramme force-déforma-

tion à l'état monté (cf. **illustration c**).

Si une force opérationnelle induite par les niveaux supérieurs des pièces assemblées agit sur l'assemblage vissé - dans le cas le plus simple, comme supposé ici, une force statique constituant une force longitudinale - la vis est en plus soumise à une tension et s'allonge davantage. Les éléments assemblés par contre sont déchargés en conséquence. La force de précontrainte se réduit ainsi à une force de serrage résiduelle dans les éléments. Ces

relations peuvent aussi être reproduites dans le diagramme force-déformation (cf. **illustration d**).

De ces rapports découle une observation passionnante : une caractéristique de vis plus plate pour une même rigidité des pièces diminue la part de la force opérationnelle que la vis doit supporter. Mais la force de serrage diminue aussi en conséquence. L'exploit consiste donc à concevoir un assemblage vissé assez plat pour minimiser la force opérationnelle subie par la vis tout >

Kompakt-Seminare speziell für Sie

In unserem halbtägigen Kompakt-Seminar zur Verschraubungstechnik werden Ihnen die Grundlagen der Schraubverbindung auf einfache und verständliche Weise vermittelt. Profitieren Sie vom Know-how unserer Fachspezialisten und nutzen Sie die Gelegenheit, Ihre Kenntnisse aufzufrischen und sich neue anzueignen.

Die Schulung richtet sich an Monteure, Facharbeiter sowie Konstrukteure und findet wahlweise bei Ihnen oder an einem SFS Standort statt.

Sichern Sie sich Ihren Vorsprung durch Wissen und melden Sie sich gleich an: konstantin.matt@sfs.biz

Schulungsinhalt

Die Inhalte entsprechen in vereinfachter Form den Themengebieten unserer Seminarreihe, können jedoch nach Ihren Vorgaben individuell mit dem Referenten abgestimmt werden.

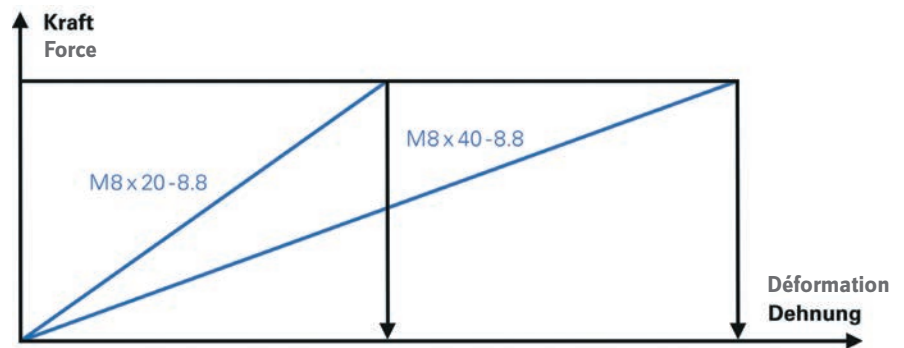


Abbildung g: Einfluss der Klemmlänge auf die Steigung der Kennlinie

Illustration g : effet de la longueur de serrage sur la pente de la caractéristique

- Grundlagen der Schraubverbindung
- Eigenschaften von Stahlschrauben
- Grob-Dimensionierung nach VDI 2230
- Montageparameter inkl. praktischer Demonstration mit Ringkraftmesser: Einfluss der Reibung auf die Vorspannkraft
- Schraubsicherungen inkl. praktischer Vorführung des Junkertests mit unterschiedlichen Sicherungselementen
- Direktverschraubung in Metalle und Kunststoffe
- Korrosion und Oberflächentechnik

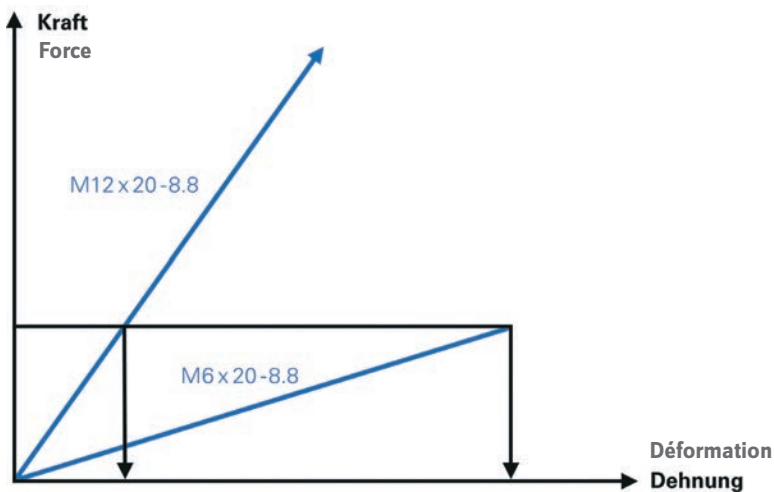


Abbildung h: Einfluss des Durchmessers auf die Steigung der Kennlinie
Illustration h : effet du diamètre sur la pente de la caractéristique

Das Fachregelwerk Metallbauerhandwerk - Konstruktionstechnik enthält im Kap. 1.4 wichtige Informationen zum Thema «Statik und Konstruktion».



TECHNIQUE D'ASSEMBLAGE

> en maintenant assez de force de serrage pour garantir un assemblage sans glissement. Pour éviter une déformation permanente, la limite d'élasticité de la vis ne doit pas être dépassée. L'illustration e reproduit cette situation de façon graphique.

Pour finir, nous allons expliquer comment déterminer la pente d'une caractéristique de vis. La loi de Hooke connue concernant la variation de longueur élastique en constitue la base. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Par adaptation, on obtient :

$$\Delta l = \varepsilon * l_0 = \frac{\sigma}{E} * l_0 = \frac{F * l_0}{A * E}$$

La formule de la variation de longueur élastique d'une vis est donc la suivante :

$$\Delta l = \frac{F * l_0}{A * E}$$

- ε Allongement
- σ Tension mécanique
- E Module d'élasticité
- l_0 Longueur de vis
- Δl Variation de longueur de la vis
- A Section de tension de la vis
- F Force de vis

Classe de résistance et caractéristique

Si l'on souhaite obtenir une représentation graphique de cette relation mathématique, le diagramme force-déformation donne les caractéristiques suivantes (cf. illustration f). On présuppose ici une longueur de vis constante et un diamètre de vis constant.

On observe que la caractéristique ne devient pas plus plate ou plus raide si l'on modifie la classe de résistance. Allonger une classe de résistance supérieure jusqu'à la limite d'élasticité nécessite une force de tension plus élevée. Selon la formule ci-dessus, la force est proportionnelle à l'allongement pour une pente constante de la caractéristique.

Pour obtenir une caractéristique plus plate, il y a deux possibilités : soit on sélectionne un plus petit diamètre, soit une plus grande longueur de serrage ou les deux.

L'illustration g montre l'effet de la longueur de serrage sur la pente de la caractéristique. Si l'on choisit p. ex. une longueur de vis double, l'allongement de cette vis sera aussi deux fois plus grand pour une même force. On obtient ainsi une caractéristique plus plate.

L'illustration h montre l'effet du diamètre de la vis sur la pente de la caractéristique.

Si l'on choisit p. ex. la moitié du diamètre, la vis sera allongée du facteur

4 pour la même force. Cela donne aussi une caractéristique plus plate.

Si l'on dimensionne correctement la construction d'un assemblage vissé et si on le pose de façon professionnelle, la force de serrage de la vis est telle qu'elle empêche des mouvements relatifs des pièces vissées entre elles, sous l'effet de forces et de couples agissant de façon axiale ou perpendiculaire à l'axe de la vis. Une force de serrage suffisante absorbe en outre l'élasticité de l'assemblage vissé, causée par le phénomène de tassement et de fluage. Il est donc indispensable de bien vérifier des assemblages critiques.

Informations supplémentaires :
Ing. Konstantin Matt, M.Sc.
Chef de produits Pièces normalisées et spéciales
konstantin.matt@sfs.ch
Tél. : 071 727 65 44
SFS unimarket SA
Technique de fixation
9435 Heerbrugg

Des séminaires compacts spécialement pour vous

Dans notre séminaire compact d'une demi-journée, les principes de base relatifs à la technique de vissage vous sont expliqués de manière simple et compréhensible. Profitez du savoir-faire de nos spécialistes ainsi que de cette opportunité de rafraîchir et d'élargir vos connaissances.

Ce séminaire s'adresse aux monteurs, travailleurs spécialisés et constructeurs et se déroule, au choix, chez vous ou sur un site SFS.

Consolidez votre avance en acquérant de nouvelles connaissances et inscrivez-vous sans tarder à l'adresse : konstantin.matt@sfs.biz

Contenu du séminaire

Les contenus correspondent, sous forme simplifiée, aux domaines thématiques de notre série de séminaires, mais peuvent être cependant personnalisés, de concert avec l'intervenant, selon vos besoins.

- Principes de base relatifs à la technique du vissage
- Caractéristiques des vis et boulons en acier
- Dimensionnement selon la norme VDI 2230
- Paramètres de montage avec démonstration pratique à l'aide du dynamomètre circulaire : influence de la friction sur la force de précontrainte
- Sécurisation des liaisons vissées avec démonstration pratique de l'essai de vibration de Junker avec différents éléments de sécurisation
- Vissage direct dans les métaux et les plastiques
- Corrosion et technique des surfaces