

Zusammenhang zwischen Reibung, Anzugsdrehmoment und Vorspannkraft bei Schraubenverbindungen

Reibung spielt in nahezu allen Bereichen der Technik eine bedeutende Rolle. Sie ist für die Verluste in der Energiebilanz von technischen Abläufen, Bewegungen oder auch chemischen Prozessen verantwortlich. So hat Reibung auch in der Verbindungstechnik beim Einsatz von Schraubenverbindungen einen grossen Einfluss auf deren Funktion. Im folgenden Artikel werden die Zusammenhänge zwischen Reibung, Anzugsdrehmoment und Vorspannkraft in der Theorie erläutert und mit praktischen Versuchen veranschaulicht.

Die theoretische Betrachtung

Schraubenverbindungen werden in der Regel gleitfest ausgelegt, d.h. die Mindestklemmkraft ist nach Beaufschlagung der Betriebskraft immer noch so gross, dass sich die zu verbindenden Teile beim Auftreten von Querkraften nicht gegeneinander verschieben können. Dies gewährt, dass die Schraube nicht auf Abscherung in der Trennfuge beansprucht wird bzw. sich die Schraube/Mutter nicht lösen kann.

Um im Betriebszustand eine festgelegte Mindestklemmkraft in der Schraubenverbindung gewährleisten zu können, benötigt es eine gewisse Vorspannkraft, welche durch Aufbringen des Anzugsmomentes auf die Verbindung erreicht werden muss. Ist diese Vorspannkraft im Montagezustand zu gering, kann im Betriebszustand die Mindestklemmkraft soweit abfallen, dass der Reibschluss verloren geht oder sogar die Abhebegrenze erreicht wird.

Die Aufgabe des Konstrukteurs ist es daher, Schraubenparameter wie Dimension, Festigkeitsklasse und Klemmlänge mit den auftretenden statischen und dynamischen Belastungen aufeinander abzustimmen. Sind nach diesem Schritt die Mindestklemmkraft sowie dafür nötige Vorspannkraft bekannt, muss nun das korrekte Anzugsdrehmoment ermittelt werden. Dies kann rechnerisch auf analytischem oder mit entsprechender Software auf numerischem Weg geschehen. In den meisten Fällen werden allerdings die Drehmoment-Tabellen nach VDI 2230 beigezogen.

Bevor wir uns jedoch im Detail der Reibung widmen, sollen noch die Möglichkeiten für den Schraubenanzug erläutert werden.

Die gängigste Methode ist das Anziehen mit entsprechendem Drehmoment. Dies ist auch jene Variante, die in diesem Artikel erläutert wird. An zweiter Stelle steht eine Methode, bei der mit einem Voranziehdrehmoment sowie Weiterdrehwinkel gearbeitet wird – ähnlich wie bei HV-Schrauben. Die genaueste, aber auch am schwierigsten umzusetzende Methode ist das Dehnen des Schraubenbolzens mittels hydraulischem Werkzeug.

Was passiert nun genau, wenn eine Schraube oder Mutter mit Drehmoment montiert wird? Durch die Gewindesteigung von Schraube und Mutter wird die rotatorische Bewegung in eine translatorische Bewegung überführt. Aus dem Verspannungsschaubild ist zu erkennen, dass die Schraube dabei gedehnt wird, während die zu verbindenden Teile gestaucht werden.

Jedoch steht nur ein geringer Teil des Anzugsdrehmomentes zur Verfügung, um die Schraube nach dem Hooke'schen Gesetz zu dehnen und dadurch eine entsprechende Vorspannkraft zu generieren. Der Grossteil wird zur Überwindung des Reibungswiderstandes benötigt, welcher dem Anziehvorgang entgegenwirkt.

Dieser Reibungswiderstand entsteht im Unterkopf der Schraube oder Mutter sowie auch im Gewinde. Der Theorie zufolge gehen bei einer trocken montierten Schraubenverbindung ca. 90% des Anziehdrehmomentes durch die vorherrschende Reibung verloren und nur etwa 10% können zur Dehnung der Schraube genutzt werden (vgl. Abbildung a). Im geschmierten Zustand verschieben sich die Prozentanteile wesentlich zu Gunsten der Schraubendehnung.

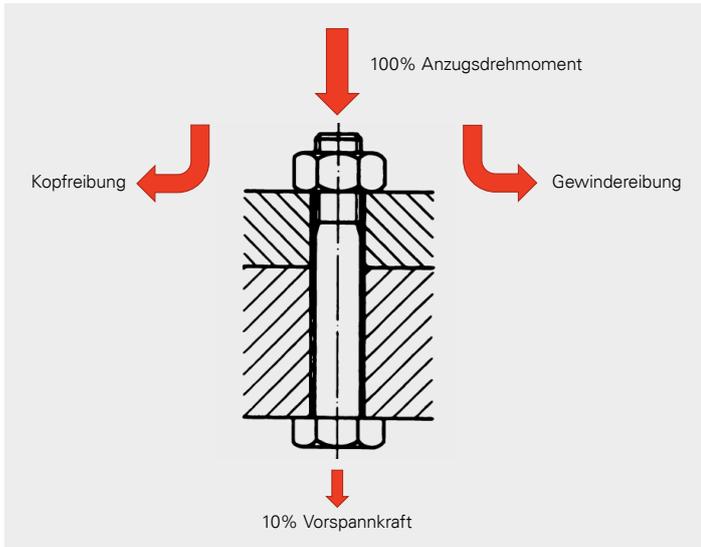


Abbildung a: Energiebilanz beim Schraubenanzug mittels Drehmoment

Dieser Umstand zeigt deutlich, wie gross der Einfluss der Reibung auf die erreichbare Vorspannkraft ist. Umso wichtiger ist es, dass mit den korrekten Reibungskoeffizienten gearbeitet wird. Reibwerte sollen in diesem Beitrag jedoch nicht detailliert behandelt werden.

Bei einer Schraubenverbindung kann nie von einem exakten Gesamtreibungskoeffizienten ausgegangen werden, man spricht immer von einem Reibwertfenster. Umso enger dieses Reibwertfenster gestaltet werden kann, zum Beispiel durch entsprechende Beschichtungen und Schmierstoffe, umso weniger wird auch die generierte Vorspannkraft streuen. Folgende Abbildungen b und c sollen den Zusammenhang verdeutlichen.

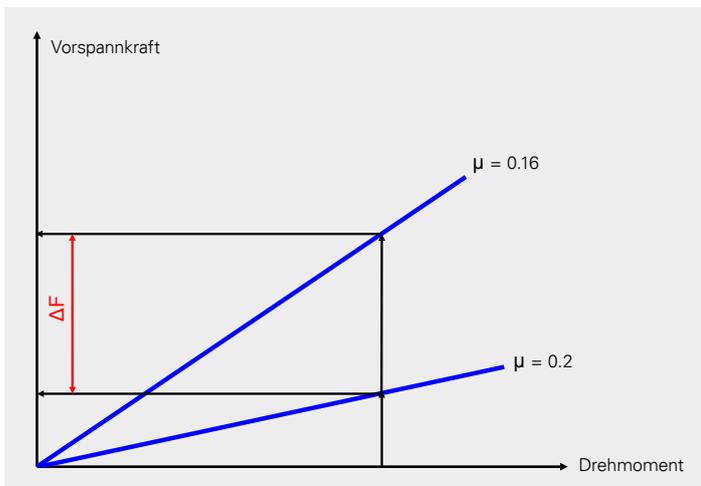


Abbildung b: Hohe und stark gestreute Reibwerte bei trockener Montage haben niedrige sowie ebenfalls weit gestreute Vorspannkraft zur Folge

Es wird verdeutlicht, dass bei konstantem Anziehdrehmoment die Vorspannkraft in Abhängigkeit des Reibbeiwertes stark variiert. Je höher die Reibung, desto weniger Vorspannkraft kann bei gleichem Montagemoment generiert werden.

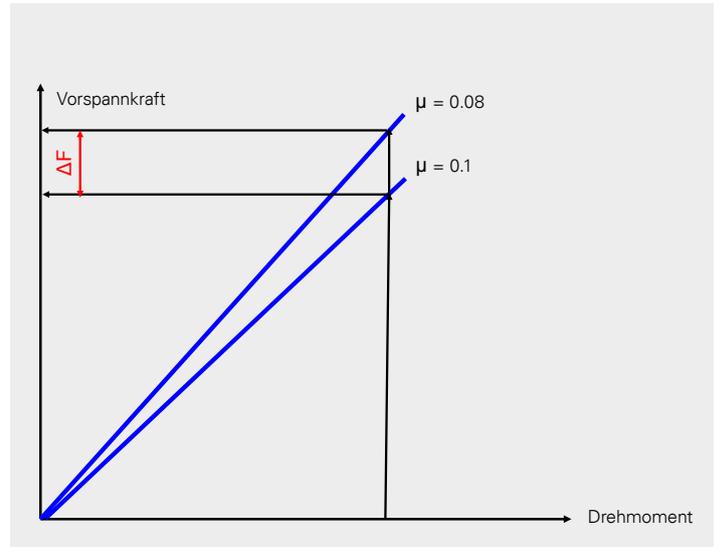


Abbildung c: Kleine Reibungskoeffizienten sowie weniger Streuung durch Verwendung von geeigneten Schmiermitteln bei der Montage

Wird die Verbindung geschmiert, so verringert sich der Reibungskoeffizient bzw. das Reibfenster wird enger (vgl. Abbildung c). Zudem wird nun mit dem gleichen Montagemoment wesentlich mehr Vorspannkraft erzeugt. Oder anders ausgedrückt, mit einer geschmierten Schraubenverbindung benötigt man wesentlich weniger Drehmoment, um auf ein bestimmtes Vorspannkraftniveau zu kommen, als bei trockener Montage. Und darin liegt ein weiterer wesentlicher Vorteil, nämlich die Verringerung der Torsionsspannung.

Je grösser die Gewindereibung, desto mehr wird der Spannungsquerschnitt der Schraube neben der durch die Dehnung erzeugten Zugspannung auch auf Torsion beansprucht. Abbildung d soll schematisch den Zusammenhang darstellen:

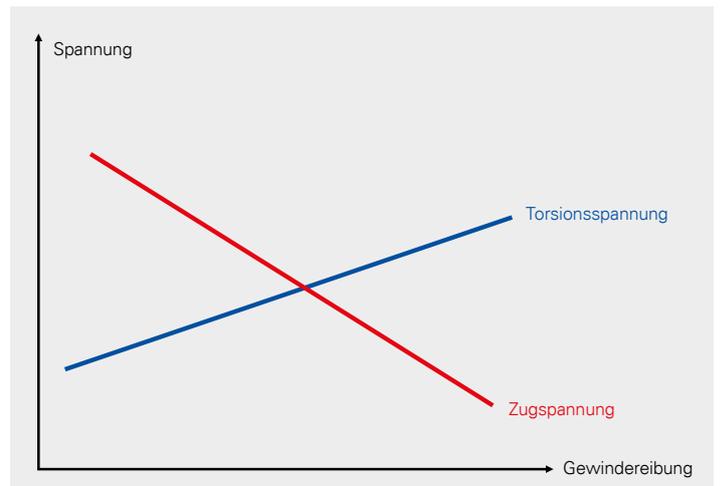


Abbildung d: Mit steigender Gewindereibung steigt auch die Torsionsspannung im Spannungsquerschnitt der Schraube

Zwecks visueller Vereinfachung wurden die Zug- sowie die Torsionsspannung linearisiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Gewindereibung die Torsionsspannung zunimmt bzw. die Zugspannung abnimmt.

Die aus dem vorliegenden zweiachsigen Spannungszustand resultierende Gesamtbeanspruchung lässt sich mit der Gestaltungsenergie-Hypothese auf einen gleichwertigen einachsigen Spannungszustand zurückführen:

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\sigma_M^2 + 3\tau_t^2}$$

σ_{red} Vergleichsspannung

σ_M Montagezugspannung

τ_t Torsionsspannung

Häufig nimmt die Torsionsspannung nach dem Anziehen durch Relaxation um ca. 50 Prozent ab.

Die praktische Betrachtung

Im Maschinenbau werden bezüglich Reibungskoeffizient sehr häufig folgende Empfehlungen genannt:

Verzinkte sowie blanke Schrauben/Muttern trocken montiert:
0.12 bis 0.14

Verzinkte sowie blanke Schrauben/Muttern geschmiert montiert:
0.08 bis 0.1

Diese Angaben wollen wir nun in einem Drehmoment-Vorspannkraft-Versuch mit folgendem Aufbau nach Abbildung e überprüfen.

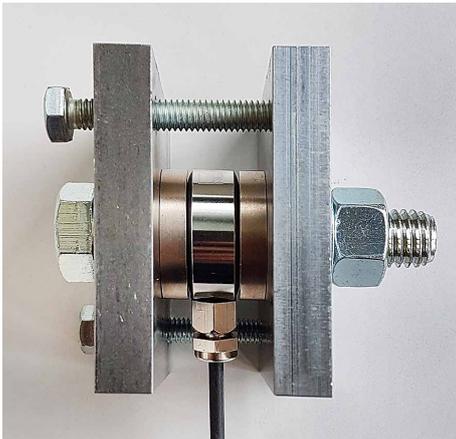


Abbildung e: Versuchsaufbau

Verwendetes Equipment:

Drehmomentschlüssel Garant TWdrive 20–200 Nm

Ringkraftmesser SM70-M12-100 kN

DMS Wägeindikator VT-100

Schmiermittel: Molykote 1000 Schraubenpaste

Schmierung: Gewinde plus Unterkopf

Versuch 1:

Sechskantschraube nach ISO 4014 – M12x65-8.8 – galvanisch verzinkt

Sechskantmutter nach ISO 4032 – galvanisch verzinkt

Scheiben: ISO 7089-200 HV – galvanisch verzinkt

Verbindung nicht geschmiert

Werte nach Tabelle aus VDI 2230 – Blatt 1:

Drehmoment bei Reibwert 0.12: 84 Nm/Vorspannkraft 43.0 kN

Anzug Nr.	1	2	3	4
Drehmoment	84.6	85.7	84.6	86.4
Vorspannkraft	44.1	31	23.1	19.5

Beim Erstanzug werden etwas mehr als 44 kN erreicht – beim vierten Anzug nur noch etwa 19.5 kN. Bei jedem Anzug/Lösen erfolgt ein Zinkabrieb von Schraube und Mutter, was für den nächsten Anzug eine wesentlich höhere Reibung zur Folge hat. Bereits beim zweiten Anzug liegt man weit unterhalb der theoretischen Vorspannkraft. Beim Erstanzug wurde die Vorspannkraft von 43.0 kN nach Tabelle erreicht.

Versuch 2:

Sechskantschraube nach ISO 4014 – M12x65-8.8 – galvanisch verzinkt

Sechskantmutter nach ISO 4032 – galvanisch verzinkt

Scheiben: ISO 7089 – 200 HV – galvanisch verzinkt

Verbindung geschmiert

Werte nach Tabelle aus VDI 2230 – Blatt 1:

Drehmoment bei Reibwert 0.08: 63 Nm / Vorspannkraft 45.2 kN

Anzug Nr.	1	2	3	4
Drehmoment	63.8	64.8	63.7	64.1
Vorspannkraft	41.5	41.4	40	39.6

Beim Erstanzug werden etwas mehr als 41 kN erreicht – beim vierten Anzug noch etwa 40 kN. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das Schmiermittel den Zinkabrieb bei der Montage sehr positiv beeinflusst. Die generierte Vorspannung bleibt selbst nach dem vierten Anzug nahezu konstant. Jedoch kommt man mit dem gewählten Reibwert nicht auf die theoretische Vorspannkraft von 45.2 kN.

Versuch 3:

Sechskantschraube nach DIN 933 – M12x65-8.8 – vergütungs-schwarz

Sechskantmutter nach DIN 934 – blank

Scheiben: ISO 7089 - 200 HV – galvanisch verzinkt

Verbindung nicht geschmiert

Werte nach Tabelle aus VDI 2230 – Blatt 1:

Drehmoment bei Reibwert 0.12: 84 Nm / Vorspannkraft 43.0 kN

Anzug Nr.	1	2	3	4
Drehmoment	85.3	84.9	85.4	85.4
Vorspannkraft	40.5	40.3	38.5	34.1

Beim Erstanzug werden etwas mehr als 40 kN erreicht – beim vierten Anzug noch etwa 34 kN. Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei blanken Schrauben die Vorspannung pro Anzug tendenziell abnimmt, jedoch in einem wesentlich geringeren Ausmass als wie bei verzinkten Schrauben. Beim Erstanzug wurde die Vorspannkraft von 43.0 kN nach Tabelle nicht erreicht.

Versuch 4:

Sechskantschraube nach DIN 933 – M12x65-8.8 – vergütungs-schwarz

Sechskantmutter nach DIN 934 – blank

Scheiben: ISO 7089 - 200 HV – galvanisch verzinkt

Verbindung geschmiert

Werte nach Tabelle aus VDI 2230 – Blatt 1:

Drehmoment bei Reibwert 0.08: 63 Nm / Vorspannkraft 45.2 kN

Anzug Nr.	1	2	3	4
Drehmoment	64.8	63.9	63.8	63.3
Vorspannkraft	39.2	38.4	39.2	40.6

Beim Erstanzug werden etwas mehr als 39 kN erreicht – beim vierten Anzug etwa 40 kN. Die Ergebnisse zeigen, dass das Schmiermittel auch bei der Montage blanker Schrauben einen sehr positiven Einfluss hat. Die generierte Vorspannung bleibt selbst nach dem vierten Anzug nahezu konstant. Jedoch kommt man mit dem gewählten Reibwert nicht auf die theoretische Vorspannkraft von 45.2 kN.

Weitere Informationen:

Ing. Konstantin Matt, M.Sc.

Produktmanager Norm- und Sonderteile

konstantin.matt@sfs.ch

T +41 71 727 65 44

SFS unimarket AG

Befestigungstechnik

Rosenbergsaustasse 4

9435 Heerbrugg

Abbildung f zeigt die verwendeten Verbindungselemente



Abbildung f: Verbindungselemente für die Versuchsdurchführung

Die Versuchsreihe zeigt, dass für nicht geschmierte verzinkte Schrauben ein Reibungskoeffizient von 0.12 zur Auswahl des Anzugsmomentes genommen werden kann. Bei den restlichen Versuchen hätte ein in der Drehmoment-Tabelle gewählter Reibungskoeffizient von 0.1 für geschmierte bzw. 0.14 für trocken montierte Schrauben hinsichtlich generierter Vorspannkraft ein besseres Ergebnis gezeigt. Praktische Versuche haben dies bestätigt.

Allerdings sollen aus dieser Versuchsreihe keine voreiligen Schlüsse gezogen werden, denn Schrauben und Muttern haben zulässige Dimensions-, Form- und Lagetoleranzen. Dadurch kann beispielsweise der mittlere Reibradius variieren und bei einer anderen Charge von Verbindungselementen können sich andere Ergebnisse zeigen. Zudem werden vergütungsschwarze Schrauben nach Norm «leicht geölt» angeliefert. Die Anforderung «leicht geölt» ist ein sehr dehnbarer Begriff, wie die Praxis immer wieder zeigt. Auch bei den Beschichtungen gibt es Toleranzen bzgl. Schichtdicken usw., welche Einfluss auf das Anzugsverhalten haben.

Will man die Montageparameter bei einer Schraubenverbindung fehlerfrei ermitteln, sind Drehmoment-Vorspannkraft-Versuche nach DIN EN ISO 16047 unerlässlich.