

Warum Reibung bei Schrauben- verbindungen ausschlaggebend für die Prozessfähigkeit ist

White Paper

Warum Reibung bei Schraubenverbindungen ausschlaggebend für die Prozessfähigkeit ist

von Martin Rüedy

Bossard Expert Team,
Bossard Central Europe

www.bossard.com

Alle Rechte vorbehalten © 2020 Bossard

Die erwähnten Empfehlungen und Hinweise sind im praktischen Einsatz durch den Leser hinreichend zu überprüfen und für deren Anwendung als geeignet zu erklären. Änderungen vorbehalten.



ASSEMBLY
TECHNOLOGY
EXPERT

WARUM REIBUNG BEI SCHRAUBENVERBINDUNGEN AUSSCHLAGGEBEND FÜR DIE PROZESSFÄHIGKEIT IST

Einleitung

«Lean Production» liegt im Trend und steht für noch schlankere und zielgerichtete Prozesse. An Lösungen für höhere Effizienz, niedrigeren Verbrauch und längere Lebensdauer wird weltweit geforscht. Bei der Beurteilung neuartiger Materialien oder Verfahren zur Oberflächenbehandlung oder Veredelung kommen fast immer auch tribologische Eigenschaften wie Reibung, Schmierung und Verschleiss ins Spiel.

In industriellen Produkten sind lösbare Schraubenverbindungen weiterhin ein wichtiger Bestandteil mit Berücksichtigung der neuen Bauweisen und Materialien. Hinsichtlich der Werkstoffausnutzung und Prozessfähigkeit werden dabei immer höhere Anforderungen an die Montageprozesse gestellt.

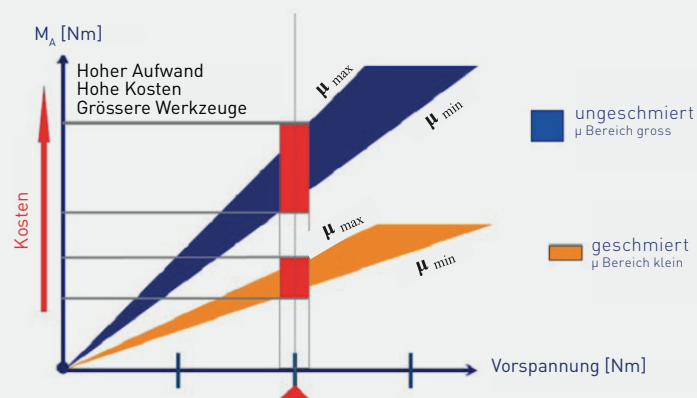


Abbildung 1 Bossard, eigene Darstellung

Themen und Erkenntnisse für wirtschaftliche Verbindungslösungen

- Prozessfähigkeit
- Prozesssicherheit in der Montage
- Tribologie als Herausforderung

Herausforderung in der Schraubentechnik

Der Markt verlangt zuverlässige Endprodukte mit einer hohen Verfügbarkeit und immer längeren Wartungszyklen. Um diese Anforderungen unter Berücksichtigung der Funktionssicherheit der Schraubenverbindungen erfüllen zu können, werden geeignete Oberflächentechnologien verlangt. Die Werkstoffpaarung und ein geeigneter Korrosionsschutz haben den äusseren Einflüssen und Beanspruchungen zu genügen. Sie sollen beispielsweise auch bei höheren Betriebstemperaturen, wie bei der Befestigung des Abgasstrangs von Verbrennungsmotoren, die Sicherheit der Verbindungen gewährleisten.

Die technischen Oberflächen müssen neben der Schutzfunktion im Betriebseinsatz jedoch auch den tribologischen Anforderungen in der Montagelinie genügen. Die klassische Schraubenmontage erfolgt mit den gegebenen Reibungseinflüssen zwischen den relativ zueinander bewegenden Flächen, womit die wirksame Schraubenvorspannung durch das applizierte Montage-Drehmoment massgebend beeinflusst wird.

Eine prozessfähige Schrauben-Montage verlangt eine konstante und kleine Reibwertstreuung (Abbildung 1) für das Gewinde und die Schraubenkopfauflagefläche. Das Schmieren der Verbindungselemente ist daher eine Grundvoraussetzung für eine gesicherte Qualität der Verbindung.

Im Zuge der gesetzlichen Auflagen für eine umwelt- und gesundheitsgerechte Handhabung von industriellen Produkten sind auch die wirtschaftlichen Aspekte zunehmend im Fokus. Das flüssige Schmieren wird zunehmend durch Schmiermittelzusätze in den funktionalen Trockenbeschichtungen der Schraubenelemente berücksichtigt (TopCoats) und auf den Grundbeschichtungen (Basecoats) aufgetragen. Inzwischen haben sich diverse neue Oberflächenschutzsysteme mit guten Korrosionsschutzeigenschaften etabliert, die den abgelösten Cr(VI)-haltigen Chromatierungen gleichwertig oder sogar überlegen sind. Die Normierung der Oberflächentechnik hinkt jedoch hinter der industriellen Beschichtungstechnologie her. Die Standardisierung für abgestimmte Reibwert- und Korrosionsschutzangaben wird durch die Vielzahl an Cr(VI)-freien Oberflächenüberzügen kombiniert mit TopCoats immer schwieriger.

Fazit

Die Automobilindustrie ist eigentlicher Technologietreiber hinsichtlich der Vorgaben an den Korrosionsschutz und die Reibwertfenster für eine prozesssichere Werksmontage und Abdeckung aller Ansprüche an den sicheren Betrieb. Die Unternehmen sind im internationalen Umfeld immer stärker unter dem Druck noch bessere Lösungen zu finden, die effizientere Montagebedingungen und längere Betriebszyklen unterstützen.

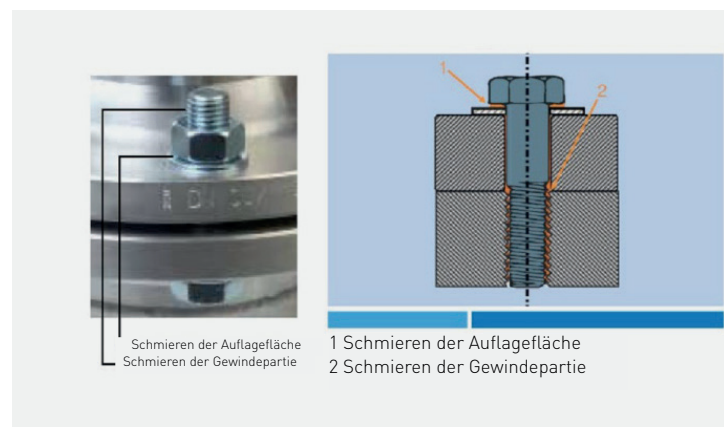


Abbildung 2 Darstellung aus Broschüre ecosyn®-lubric (Seite 3)

WARUM REIBUNG BEI SCHRAUBENVERBINDUNGEN AUSSCHLAGGEBEND FÜR DIE PROZESSFÄHIGKEIT IST

Prozessfähigkeit

Für sicherheitsbestimmende Schraubenverbindungen, bei denen die richtige Vorspannkraft gewährleistet sein muss, ist die Handmontage ohne kontrolliertes Anziehverfahren nicht geeignet. Die Erfassung aller relevanten Einflussgrößen für die Prozesssicherheit ist notwendig, damit insbesondere die Berücksichtigung der Reibwertstreuung, als auch die erfolgreiche Wahl des richtigen Schraubers berücksichtigt werden kann.

Im Sinne eines rationellen Ansatzes kann ein zweckmässiges Vorgehen aus dem Automotive-Bereich aufgrund der Risikoanalyse im Verschraubungsprozess abgeleitet werden. Die VDI 2862 ist dabei eine mögliche Grundlage für die Klassifizierung von Schraubverbindungen und ein Leitfaden für die Auswahl und den Einsatz entsprechender Schraubensysteme. Diese Richtlinie unterteilt die Schraubverbindungen im Automotivbereich in drei Risikoklassen. Die prozesssichere Montage wird demnach u.a. mit dem richtigen Einsatz der Werkzeuge verbunden.

Risikoklasse A

„Mittelbare oder unmittelbare Gefahr für Leib und Leben“ greift, wenn das Versagen dieser Schraubstelle mit hoher Wahrscheinlichkeit zum sicherheitstechnischen Versagen bzw. zur Zerstörung der Maschine/Gerätschaft/Fahrzeug führen kann und damit eine direkte oder indirekte Gefahr für Leib und Leben gegeben ist.

Risikoklasse B

„Liegenbleiber“ ist gegeben, wenn das Versagen der Schraubstelle zu einer Funktionsstörung des Fahrzeugs führt.

Risikoklasse C

„Verärgerung des Kunden“ gilt dann, wenn das Versagen der Schraubstelle eine Verärgerung des Kunden hervorruft.

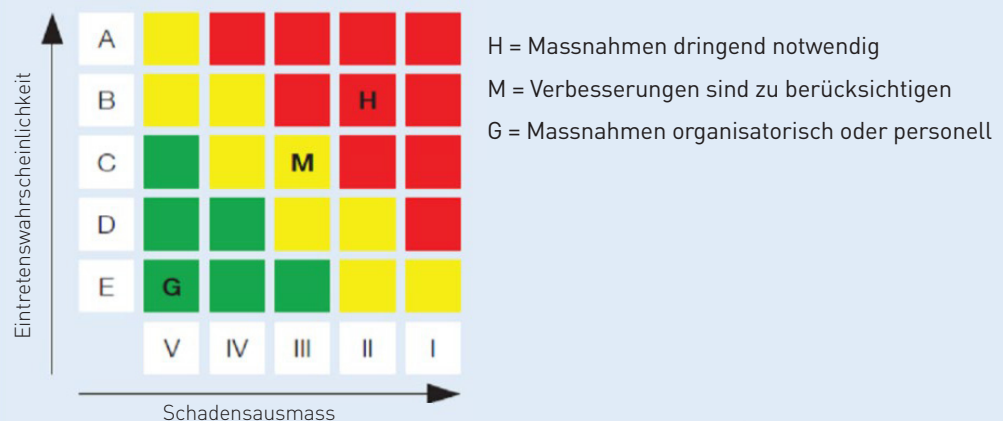


Abbildung 3 Bossard, eigene Darstellung

Messbare Prozessverbesserungen mit Hilfe von Kennzahlen

Die Prozessfähigkeitsindizes C_p und C_{pK} sind Kennzahlen zur statistischen Bewertung eines Prozessmerkmals. Sie geben an, wie sicher die laut Spezifikation vorgegebenen Zielfenster eingehalten werden. So kann der Reibwert, das abgegebene Moment oder auch die zu erzielende Vorspannung im Bauteil als Prüfmerkmal definiert sein.

Der C_{pK} -Wert wird folgendermassen aus dem Mittelwert μ , der dazugehörigen Standardabweichung σ und der oberen (OSG) beziehungsweise unteren (USG) Spezifikationsgrenze definiert:

$$C_{pK} = \frac{\min(\mu - USG; OSG - \mu)}{3\sigma}$$

Je höher dieser Wert ist, desto sicherer befindet sich die gesamte Messreihe innerhalb der Spezifikation.

Der C_p -Wert ist definiert als:

$$C_p = \frac{OSG - USG}{6\sigma}$$

Der C_p -Wert lässt sich nur dann berechnen, wenn sowohl eine obere als auch untere Spezifikationsgrenze definiert ist.

Während der C_p -Wert nur das Verhältnis der vorgegebenen Toleranz zur Prozessstreuung angibt, beinhaltet der C_{pK} -Wert auch die Lage des Mittelwertes zur vorgegebenen Toleranzmitte. Im besten Fall (Prozessmittelwert liegt genau in der Mitte des Toleranzbereichs) ist $C_{pK} = C_p$; sonst ist $C_{pK} < C_p$.

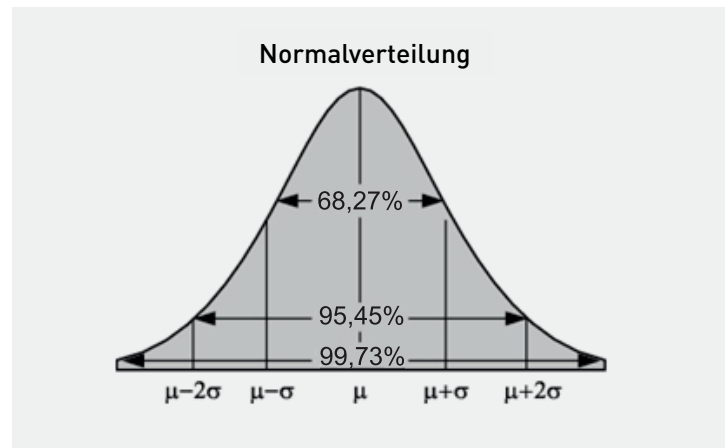


Abbildung 4 Normal- oder Gauss-Verteilung (nach Carl Friederich Gauss)

Fazit

Eine Montageprozessfähigkeit ist demnach eine wichtige Voraussetzung, um die Montagedurchlaufzeit klein zu halten. Reibwertabweichungen oder gar Schraubenbrüche führen in der Montagepraxis oft zu ungeplanten Stillständen. Dies gilt es mittels den richtigen Rahmenbedingungen für die Verschraubung und den entsprechenden Montagevorgaben zu verhindern. Eine hohe Prozessfähigkeit heisst demnach, die Vorspannung gemäss den Erwartungen richtig umsetzen zu können.

WARUM REIBUNG BEI SCHRAUBENVERBINDUNGEN AUSSCHLAGGEBEND FÜR DIE PROZESSFÄHIGKEIT IST

Prozesssicherheit in der Montage

Die Sicherheit wird massgebend von der Montagevorspannung bestimmt. Die Montage erfolgt anhand der Montagevorgaben und der tribologischen Randbedingungen. Die Montagevorspannkraft wird während des Montageprozesses durch die Reibwirkung der Gewindepaarung und der Auflageflächen (Verbindungselement–Bauteil) stark beeinflusst. Der Montagewirkungsgrad bei der Schraubenmontage beläuft sich gerade einmal auf ca. 10 bis 20%! (siehe dazu auch Abbildung 8)

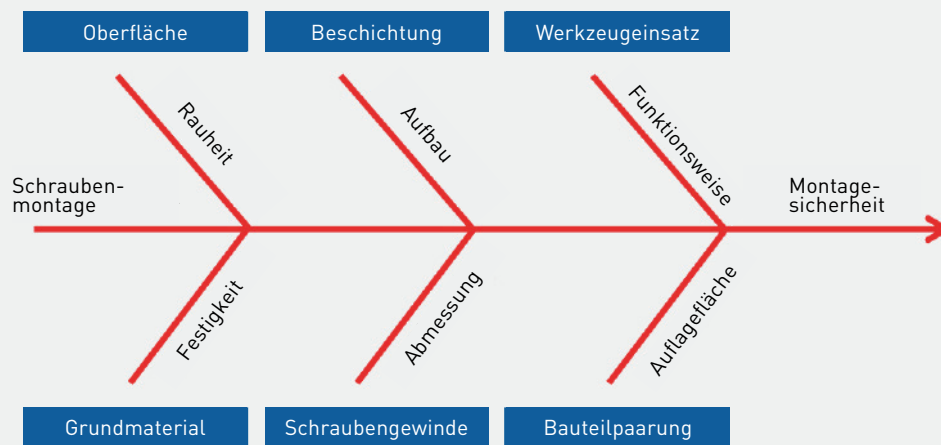


Abbildung 5 Bossard, eigene Darstellung

Tribologische Randbedingungen in der Schraubenverbindung

Damit wird klar, dass die zu erreichende Vorspannung gemäss der Auslegungsrechnung nur mit klar definierten tribologischen Randbedingungen erreicht werden kann. Eine prozesssichere Montage bedingt zusätzlich eine kleine Streuung der Reibung. Die Praxis verlangt demnach für sicherheitsbestimmende Verbindungen eine definierte Schmierung.

Ganz im Sinne einer «Lean Production» für kürzere Durchlaufzeiten und einer Kostenreduktion soll der Fluss aller Tätigkeiten von der Bedarfsmeldung bis zur Abnahme des Produktes optimal ausgelegt sein. Tätigkeiten in der Produktion wie vorbereitende Massnahmen schöpfen keinen eigentlichen Wert und sind daher zu vermeiden (z.B. Rüsten, Reinigen, Nassschmieren, etc.).

Fazit

Eine wirtschaftliche Montage beruht auf einfachen Montageprozessen mit den richtigen Montagemitteln. Die Schraubenelemente mit ihren tribologischen Eigenschaften sind dabei ausschlaggebend für das Erreichen der geforderten Montagevorspannung.

Sicherheitsbestimmende Verbindungen sind daher immer mit neuwertigen Schraubenelementen zu versehen und ggf. mittels Ihrer Etikettenzuordnung zu dokumentieren (Herstellunglos).

WARUM REIBUNG BEI SCHRAUBENVERBINDUNGEN AUSSCHLAGEBEND FÜR DIE PROZESSFÄHIGKEIT IST

Tribologie als Herausforderung

Schon in der Zeit um 1880 v. Chr. haben die Ägypter den Transport des Alabaster-Kolosses mittels Massnahmen zur Reduktion der Reibung ermöglicht. Ein eigentliches Schmierkonzept mit klaren Zuständigkeiten für die Beherrschung der tribologischen Bedingungen kann aus den überlieferten Aufzeichnungen abgeleitet werden.

Nach DIN 51834-2 ist Tribologie wie folgt umschrieben: „Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung“. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiss, einschliesslich Schmierung und schliesst entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten und Gasen ein.

Reibung ist eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Oberflächen von Körpern. Sie wirkt einer Relativbewegung entgegen und ist der Verlust an mechanischer Energie beim Ablaufen, in Bewegung halten oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Oberflächenbereiche. Reibung kann auch als ein irreversibler thermodynamischer Prozess bezeichnet werden.

Eine mögliche Zuordnung von Reibungszahlklassen mit Richtwerten zu verschiedenen Werkstoffen/Oberflächen und Schmierzuständen bei Schraubverbindungen kann aus VDI 2230 entnommen werden.

Die veröffentlichten Angaben sind meist unter Laborbedingungen und Raumtemperaturen gültig und daher für die jeweilige Anwendung und spezifische Einsatzbedingung immer wieder neu zu beurteilen. Die Reibungswerte μ_{tot} , μ_h , μ_b weisen Streuungen auf, da sie von vielen Faktoren abhängig sind, wie z.B. den Werkstoffpaarungen, der Oberflächengüte (Rauhtiefen), der Oberflächenbehandlung (blank, galvanisch verzinkt, zinklamellenbeschichtet, versiegelt, etc.) und der Art der Schmierung (ohne/mit Öl, Molybdändisulfid, Grafitpaste, PTFE-Gleitmittel, etc.).

Definierte Reibverhältnisse sind für die Kopfauflage als auch für das Gewinde eine wichtige Voraussetzung für die Auslegungs- und Montage-Sicherheit.

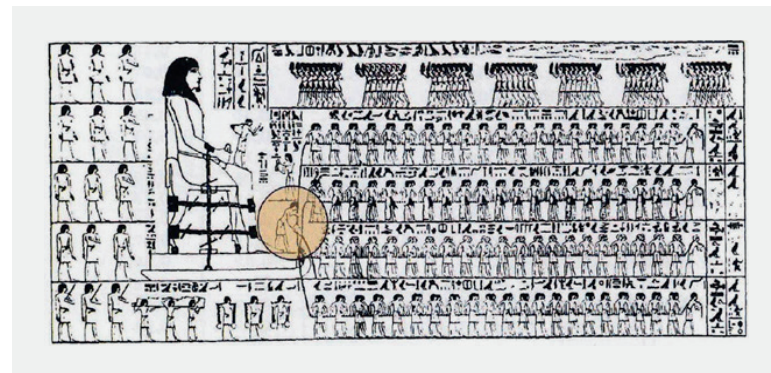


Abbildung 6 Abtransport eines Alabaster-Kolosses in Ägypten

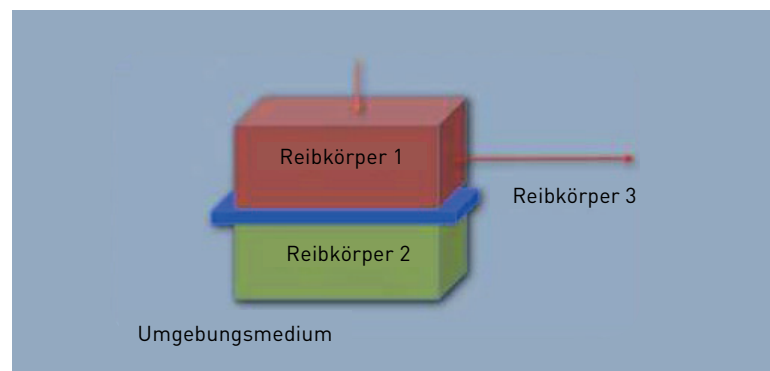


Abbildung 7 Reibung in der Schraubverbindung und Trennfugen und deren Einflussgrössen

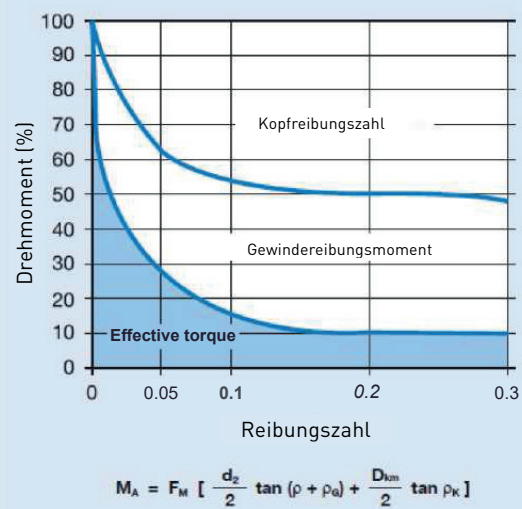


Abbildung 8 Die Reibungszahl μ , ist massgebend abhängig von der: Werkstoffpaarung, Oberflächengüte, Oberflächenbehandlung, Schmierung.

Verschleiss ist definiert als fortschreitender Materialverlust der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers. Er äussert sich im Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen (Verschleisspartikeln) sowie in Stoff- und Formänderungen der tribologisch beanspruchten Oberfläche.

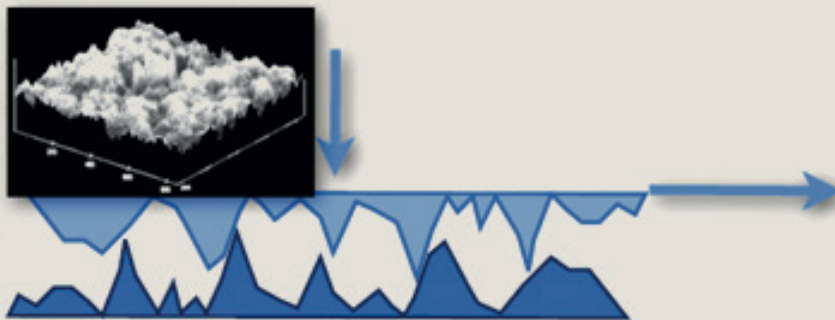


Abbildung 9 Verschleiss

Schmierung

Die Gesamtreibungszahl μ_{tot} eines Schmiermittels ist massgebend für die Bestimmung des Anziehdrehmomentes einer Schraubenverbindung und der daraus resultierenden Montagevorspannkraft.

Der Einsatz von Schmierstoffen ist für sicherheitsbestimmende Verschraubungen vorzusehen, insbesondere bei blanken, galvanischen Oberflächenüberzügen oder Zinklamellenüberzügen sowie rostbeständigen Schrauben. Die mögliche Betriebstemperatur für die Schraubenverbindungen liegt in der Regel zwischen -50°C bis max.+80°C. Die gebräuchlichen Reibwertfenster für ein prozesssicheres Montieren basieren in der Regel auf einer Reibungszahl μ_{tot} von 0.1 (Streubereich $\mu_{tot} = 0.1-0,14$).

Wird ein anderes Schmiermittel mit grösserem Streubereich als $\mu_{tot} = 0.1-0.14$ verwendet, sind weitere Abklärungen und Anpassungen für die Auslegung zu empfehlen oder sogar notwendig. Die realen Reibwerte sind ggf. durch entsprechende Versuche periodisch zu überprüfen.

Der Schmierzustand „trocken“ bedingt einer speziellen Berücksichtigung und kann die Ansprüche an ein kontrolliertes Anziehen nicht abdecken (Reibwerte sind undefiniert).

Anstelle der flüssigen Schmierstoffe werden vermehrt tribologische Trockenbeschichtungen, sogenannte „Anti-Friction-Coatings“ eingesetzt, die für eine wirtschaftliche Montage klare Vorteile bieten.

- Definierte Schmierverhältnisse mit hoher Montagesicherheit in der Werksmontage und Wartung
- Schmierung kann nicht vergessen werden
- Wirtschaftliche Montage, Demontage ohne zusätzliche Arbeitsvorbereitung
- Reduktion der Montagekosten durch eine effiziente Arbeitsweise

Die tribologischen Trockenbeschichtungen sind Systemlösungen für mechanisch belastete Befestigungselemente (Schrauben, Muttern, Scheiben). Die Beschichtungen bestehen meist aus nicht elektrolytisch aufgetragenen, Dünnsschichten mit integrierten Schmiereigenschaften. Die sogenannten TopCoats (z.B. Bossard ecosyn®-lubric) bilden einen glatten Film, der alle Unebenheiten der Oberfläche ausgleicht und dadurch die Reibverhältnisse selbst bei extremen Belastungen und Arbeitsbedingungen optimiert.

Effekt der Schmierung aufgezeigt an unverbindliche Richtwerten für Reibwerte ohne/mit Schmierung:

Gewindereibwerte ohne Schmierung

Schraubenwerkstoff	Mutterwerkstoff	Bereich	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.4	0.41	0.42					
blank - unbehandelt	blank - unbehandelt	0.18-0.35																																										
blank- phosphatbeschichtet	blank - unbehandelt	0.25-0.40																																										
galvanisch verzinkt	blank - unbehandelt	0.11-0.36																																										
blank- phosphatbeschichtet	blank- phosphatbeschichtet	0.13-0.24																																										
galvanisch verzinkt	galvanisch verzinkt	0.18-0.42																																										

Gewindereibwerte leicht geschmiert

Schraubenwerkstoff	Mutterwerkstoff	Bereich	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.23	0.24	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.39	0.4	0.41	0.42						
blank - unbehandelt	blank - unbehandelt	0.14-0.26																																											
blank- phosphatbeschichtet	blank - unbehandelt	0.17-0.30																																											
galvanisch verzinkt	blank - unbehandelt	0.11-0.20																																											
blank- phosphatbeschichtet	blank- phosphatbeschichtet	0.11-0.17																																											
galvanisch verzinkt	galvanisch verzinkt	0.13-0.22																																											

Gewindereibwerte mit spezifizierter tribologischer Beschichtung auf der Schraube

galvanisch verzinkt + Tribobeschichtet nach Vorgaben VDA235-104	galvanisch verzinkt	0.09-0.14																																											
galvanisch verzinkt + Tribobeschichtet Bossard ecosyn®-lubric Black	galvanisch verzinkt	0.09-0.12																																											

Abbildung 10 Effekt der Schmierung

Fazit

Die Tribologie kann als eigenes interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleissbedingter Energie- und Stoffverluste bezeichnet werden. Da die Oberflächenschichten im Betriebseinsatz einem Funktionsabbau unterworfen sind, sind die Farbgebung, der Oberflächenzustand und je nach eingesetztem Schraubenwerkstoff das Restrisiko eines Versagens ein Anlass für den Austausch. Eine geplante Beobachtung und wiederkehrende Kontrolle (Beurteilung) für sicherheitsrelevante Schraubenverbindungen ist zu empfehlen.

Ziele tribologischer Massnahmen zur Optimierung maschinentechnischer Systeme	Häufigkeit der Zielnennungen von Anwendern (100% = 978 Nennungen)
1. Lebensdauerverlängerung	32
2. Wartungsfreiheit	22
3. Belastungs/Drehzahl-Steigerung	9
4. Produktionsverbesserung	8
5. Minderung elektr. Verlustleistung	7
6. Verminderung von Leckage, Abdichtung	6
7. Geräuschreduzierung	5
8. Hochtemperaturanwendung	4
9. Vibrationsreduzierung	4
10. Gewichtsreduzierung	2
11. Sonstiges	1

Abbildung 11 Charakteristische Aufgabenstellungen in der Tribologie



Wenn Sie noch Fragen zum Thema Reibung bei Schraubenverbindungen haben, können Sie sich jederzeit direkt an uns wenden. Wir sind Ihnen gerne behilflich. Kontaktieren Sie uns unter: www.bossard.com.