

VDA QMC

Verband der Automobilindustrie
Qualitäts-Management-Center

5 Teil 2

Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie

Prüfprozesseignung für das Weiterdrehmoment von Schraubverbindungen

2., überarbeitete Auflage, Februar 2024

Prüfprozesseignung für das Weiterdrehmoment von Schraubverbindungen

2., überarbeitete Auflage, Februar 2024

Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA)

ISSN 0943-9412

Copyright 2024 by

Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA)
Qualitäts Management Center (QMC)
10117 Berlin, Behrenstraße 35

Online-Download-Dokument

Unverbindliche Empfehlung des VDA

Der Verband der Automobilindustrie (VDA) empfiehlt seinen Mitgliedern, die nachstehende Richtlinie bei der Einführung und Aufrechterhaltung von QM-Systemen anzuwenden.

Haftungsausschluss

Dieser VDA-Band ist eine Empfehlung, die allen frei zur Anwendung steht. Wer sie anwendet, hat im konkreten Fall für die richtige Anwendung Sorge zu tragen.

Dieser VDA-Band berücksichtigt die zum Zeitpunkt der jeweiligen Ausgabe bekannten technischen Verfahrensweisen. Durch das Anwenden der VDA-Empfehlungen entzieht sich niemand der Verantwortung für sein eigenes Handeln. Alle handeln selbstverantwortlich.

Eine Haftung des VDA und der Personen, die an der Erstellung der VDA-Empfehlungen beteiligt sind, ist ausgeschlossen.

Wer bei der Anwendung dieser VDA-Empfehlung auf Unrichtigkeiten oder die Möglichkeit einer unrichtigen Auslegung stößt, wird gebeten, dies dem VDA umgehend mitzuteilen, damit etwaige Mängel beseitigt werden können.

Urheberrechtsschutz

Diese Schrift ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des VDA unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Übersetzungen

Diese Schrift wird auch in anderen Sprachen erscheinen. Der jeweils aktuelle Stand ist bei VDA QMC zu erfragen.

Gender-Hinweis

Aus Gründen der Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen die männliche Form gewählt, es ist jedoch immer die weibliche Form mitgemeint.

Vorwort

Das Messen von Weiterdrehmomenten bei Schraubverbindungen unterliegt vielfältigen Einflüssen. Somit gestaltet sich die Interpretation der Messergebnisse in Bezug auf ihre Richtigkeit – wenn man davon überhaupt sprechen kann – nicht immer einfach.

Die große Herausforderung und vor allem die Voraussetzung für eine qualitätsrelevante Aussage stellt sich u. a. in der Generierung reproduzier- und messbarer Merkmale dar.

Die Prüfprozesseignung ist Gegenstand des VDA-Bandes 5.2. Den Lesenden wird ein „Kochrezept“ an die Hand gegeben, was sie in die Lage versetzen soll, bei drehmomentgestützten Prüfverfahren die für ihre Schraubfallcharakteristik (unabhängig davon, ob es sich um ein Drehmoment- oder Drehmoment-Drehwinkel-Verfahren handelt) ideale Messmethode anzuwenden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	4	
Inhaltsverzeichnis		5
1	Normen und Richtlinien	7
2	Nutzen und Anwendungsbereich	8
3	Begriffe und Definitionen	9
3.1	Mechanische Zusammenhänge im Schraubverbund	9
3.1.1	Allgemeines	9
3.1.2	Vorspannkraft und Drehmoment	13
3.2	Drehmomentspezifische Begriffe	14
3.3	Toleranzgrenzen des Weiterdrehmoments	16
3.4	Abgrenzung zwischen Werkzeug und Messmittel	17
4	Prüfprozessmanagement	18
4.1	Rollen und Kompetenzen im Prüfprozessmanagement	18
4.2	Prüfprozessplanung	18
4.3	Risikogerechte Absicherung	18
4.4	Prüfmittelmanagement	19
4.5	Wirksamkeitsnachweis des Prüfprozessmanagements	19
4.6	Kalibrierung	19
5	Grundlegende Prüf- und Messverfahren	20
5.1	Weiterdrehmoment (Nachziehdrehmoment)	20
5.2	Lösen und Wiederanziehen („back-to-mark“)	20
5.3	Attributive Prüfung	21
5.4	Losdrehmoment	22
6	Mess- und Prüfprozesseignung bei Schraubverbindungen	23
6.1	Besondere Einflüsse bei Schraubverbindungen	23

6.2	Einflüsse aus der Auswertemethode (Messmethoden analog VDI/VDE 2645-3 [13])	25
6.3	Einflüsse aus Mess-/Prüfmittel und Messhilfsmittel (Messgerät)	26
6.4	Einflüsse aus Prüf-/Messprozess	27
6.5	Prozessablauf zum Umgang mit der Prüfprozesseignung	28
7	Beurteilung der fortlaufenden Eignung	30
8	Der Eignungsnachweis	31
8.1	Vorbemerkung	31
8.2	Eignungsnachweis anhand eines Beispiels (Messschlüssel)	33
8.3	Variante „Schritt 3 ohne kommerzielle Software zur ANOVA“	35
8.4	Typische Messprozessmodelle	39
9	Literatur	41
10	Verzeichnis der Formelzeichen	43

1 Normen und Richtlinien

Verschraubungen als wieder lösbare Verbindungen besitzen in der Automobilindustrie aufgrund der Häufigkeit, mit der sie zum Einsatz kommen (arbeitstäglich werden mehrere 100 Millionen Verbindungselemente bei deutschen Automobilherstellern verschraubt), eine herausragende Bedeutung.

Bei der Herstellung einer Schraubverbindung wird zwischen dem eigentlichen Fertigungsvorgang und einem dem Fertigungsvorgang nachgelagerten Prüfvorgang unterschieden. Der Fertigungsvorgang erfolgt mit Hilfe geeigneter Werkzeuge, die auf Basis der Anziehvorschrift ausgewählt werden. Dieser Band betrachtet den Prüfvorgang, der dem Fertigungsvorgang nachgelagert ist. Die teilweise integrierten Funktionen des Anziehwerkzeugs zur Überwachung des Prozessverlaufes sind nicht Gegenstand dieses VDA-Bandes.

Die weitaus häufigste Form der Prüfung beruht auf der Ermittlung von Weiterdrehmomenten, die als Hilfsgröße für die eigentlich relevante Vorspannkraft dienen. Aufgrund des komplexen Zusammenhangs zwischen Vorspannkraft und Drehmoment (siehe Kap. 3.1) ist die Aussage des Merkmals „Weiterdrehmoment“ nicht mit der Aussage direkt messbarer Merkmale zu vergleichen. Außerdem ist eine Mehrfachmessung dieses Merkmals am gleichen Objekt, wie sie zur Quantifizierung der Prüfprozesseignung üblich ist, nicht möglich. Durch jedes Lösen oder Weiterdrehen wird der Zustand des Messobjektes irreversibel verändert.

In diesem Band ist die Vorgehensweise aus dem VDA-Band 5 [1] daher auf die Anwendung bei Schraubverbindungen entsprechend modifiziert.

Der nachfolgende Vorschlag zum Umgang mit der Prüfprozesseignung bei der Prüfung von Weiterdrehmomenten an Schraubverbindungen stützt sich auf die Erfahrungen aus der Praxis und verfolgt das Ziel, den erforderlichen Aufwand auf ein angemessenes Maß zu begrenzen.

Die in diesem Band beschriebenen Beispiele dienen der Verdeutlichung des Sachverhaltes und können sich von den Schreibweisen der Mess- und Prüfmittelherstellerspezifikationen unterscheiden.

2 Nutzen und Anwendungsbereich

Das Ziel dieses Bandes ist es, einen Weg zur Anwendung aufzuzeigen, wie die Eignung des Prüfprozesses für das Weiterdrehmoment validiert werden sollte, um eine realistische Aussage über die ausgeführte Schraubverbindung zu erhalten.

Weitere Prüfmethode für Verschraubungen, welche nicht weitergedreht werden dürfen oder nicht für die Beurteilung geeignet sind, werden in Kapitel 5 behandelt.

3 Begriffe und Definitionen

Die Definitionen von Begriffen der Prüfprozesseignung sind im VDA-Band 5 [1] enthalten. Der vorliegende Band baut auf diesen auf und ergänzt lediglich die spezifisch schraubtechnischen Begriffe.

Anders als im VDA-Band 5 [1] wird beim VDA-Band 5.2 statt des Bezugsnormals eine Referenz verwendet.

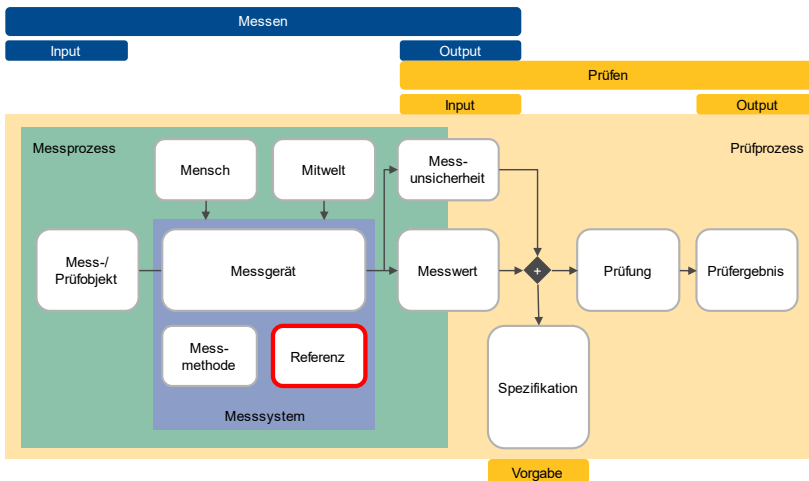


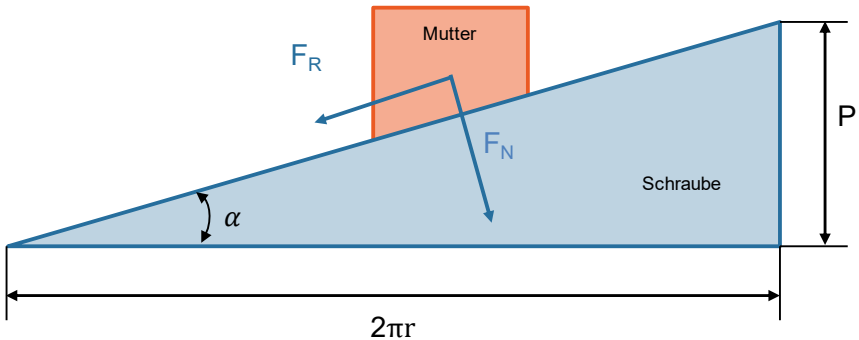
Abbildung 3-1: Zusammenhang Messsystem, Messprozess und Prüfprozess in Anlehnung an VIM und ISO 3534 [9,10] bezogen auf VDA-Band 5.2

3.1 Mechanische Zusammenhänge im Schraubverbund

3.1.1 Allgemeines

Die Schraubverbindung beruht auf der Paarung von Schraube und Mutter bzw. Gewindestift mit Außengewinde und Bauteil mit Innengewinde, wobei zwischen beiden ein Formschluss im Gewinde für die Wirksamkeit der Schraubverbindung verantwortlich ist.

Im Gewinde, das abgewickelt eine schiefe Ebene ergibt (siehe Abbildung 3-2), erfolgt bei relativer Verdrehung von Schraube zur Mutter ein Gleiten der Gewindeflanken der Schraube auf den Gewindeflanken der Mutter und damit eine Längsbewegung (Wirkprinzip).



$P = \text{Gewindesteigung}, \alpha = \text{Steigungswinkel}$
 $F_R = \text{Reibungskraft}, F_N = \text{Normalkraft}$

Abbildung 3-2: Wirkprinzip eines Gewindes

Als Ersatzmodell für eine Schraubverbindung dient Abbildung 3-3. Die Schraube kann hierbei als eine Zugfeder angesehen werden, die sich bei Aufbringen eines Drehmomentes längt. Die verspannten Teile werden als Druckfedern dargestellt, die in Abhängigkeit der aufgetragenen Vorspannkraft bzw. der wirkenden Flächenpressung sowie der Materialkonstanten gestaucht werden.

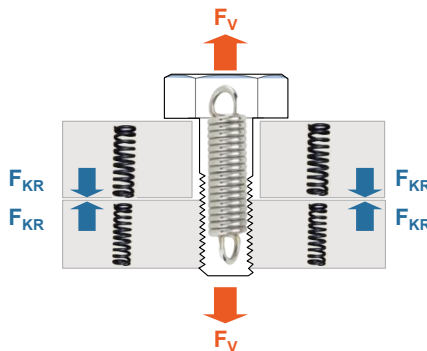


Abbildung 3-3: Ersatzschaubild Schraubverbindung

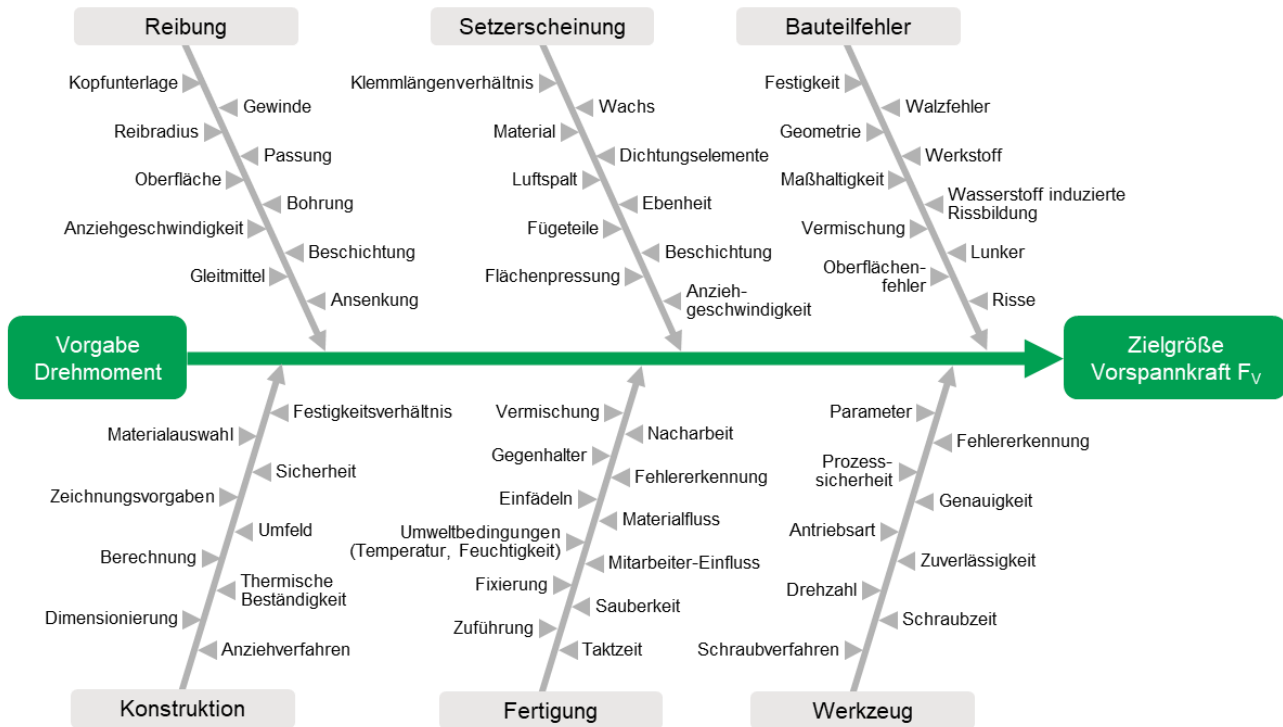


Abbildung 3-4: Einflussfaktoren auf die durch ein Drehmoment erzielte Vorspannkraft

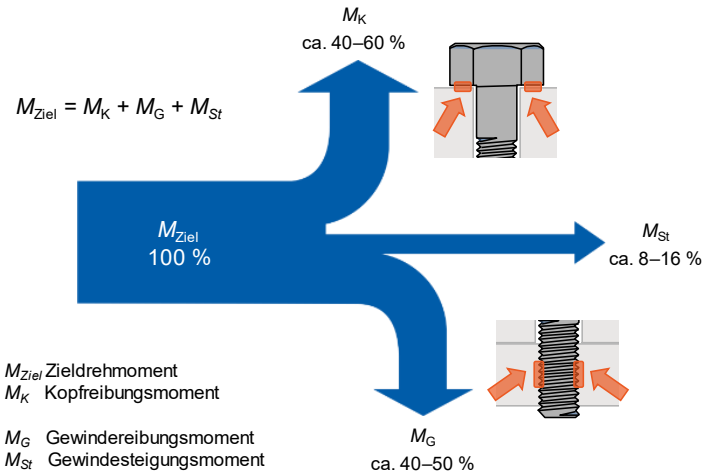


Abbildung 3-5: Aufteilung der Drehmomentbeiträge

Das zur Vorspannkrafterzeugung aufgebrauchte Zieldrehmoment M_{Ziel} setzt sich aus dem Kopffreibmoment M_K , dem Gewindereibmoment M_G und dem eigentlich vorspannkrafterzeugenden Gewindesteigungsmoment M_{St} zusammen (siehe Abbildung 3-5). Die formelmäßige Beziehung zwischen eingeleitetem Zieldrehmoment M_{Ziel} und erzielter Montagevorspannkraft F_M für metrische Schraubengewinde nach DIN ISO 68-1 [3] lautet (vgl. VDI 2230 [2]):

$$M_{Ziel} = F_M \left(0,16 \times P + 0,58 \times d_2 \times \mu_G + \frac{D_{Km}}{2} \times \mu_K \right)$$

- mit:
- M_{Ziel} Zieldrehmoment (in $N \cdot m$)
 - F_M Montagevorspannkraft (in N bzw. kN)
 - P Gewindesteigung (in mm)
 - d_2 Gewindeflankendurchmesser (in mm)
 - μ_G Gewindereibungszahl (dimensionslos)
 - D_{Km} wirksamer Durchmesser für das Reibungsmoment in der Schraubenkopf- oder Mutterauflage (in mm)
 - μ_K Kopffreibungszahl (dimensionslos)

Die in der Formel enthaltenen Reibungszahlen für Schraubenkopf bzw. Mutternauflage μ_K und Gewinde μ_G stellen ein Maß für den Gleitzustand an den bei der Montage bewegten Reibflächen dar.

Wie Abbildung 3-5 verdeutlicht, geht ein Großteil des aufgebracht Drehmomentes aufgrund der Reibung zwischen Schraubenkopf und Kopfauflage sowie der Gewindereibung verloren. Letztendlich tragen nur 8–16 % des ursprünglich eingeleiteten Drehmomentes zum Aufbau der Vorspannkraft bei. Dies hat zur Folge, dass allein aus dem Drehmoment kein Rückschluss auf die erreichte Vorspannkraft gezogen werden kann.

Um anhand des eingeleiteten Drehmomentes eine Aussage über die erzielten Montagevorspannkraft in einer Verschraubung treffen zu können, werden über auf die Verbindungselemente aufgebrauchte Gleitmittel die Reibungszahlen in bestimmten Grenzen konstant gehalten (siehe VDA 235-101 [4]). Das bedeutet, dass für eine Verschraubung kein spezifischer Einzelwert der Montagevorspannkraft angegeben werden kann, sondern lediglich eine zu erwartende Spanne. Diese Spanne wird in der Praxis zusätzlich durch unterschiedliche Oberflächenzustände des Werkstücks und andere Umwelteinflüsse beeinflusst (zu den jeweiligen Einflüssen siehe Abbildung 3-4).

Das Verhältnis von minimaler zu maximaler Montagevorspannkraft wird über den Anziehungsfaktor α_A ausgedrückt:

$$\alpha_A = \frac{F_{Mmax}}{F_{Mmin}}$$

Der Anziehungsfaktor α_A liegt bei der drehmomentgesteuerten Montage typischerweise in der Größenordnung von 2.

3.1.2 Vorspannkraft und Drehmoment

Wird eine Schraubverbindung mit einem Drehmoment beaufschlagt, so wird durch die Gewindesteigung von Schraube und Mutter die rotatorische Bewegung in eine lineare Bewegung überführt. Die Schraube wird dabei gedehnt, während die zu verbindenden Teile gestaucht werden (siehe Abbildung 3-3).

Aufgrund der Reibungsverhältnisse am Unterkopf und im Gewinde steht nur ein geringer Teil des ursprünglich aufgebracht Drehmomentes zur Verfügung, um die Schraube nach dem Hooke'schen Gesetz zu dehnen. Eine Messung der Vorspannkraft ist nur über den Umweg der Längenänderung der Schraube möglich und somit im Serieneinsatz nur schwierig zu realisieren. Da sich bei konstanten Reibungsverhältnissen das Drehmoment

aber proportional zur erzeugten Vorspannkraft verhält, ist eine Aussage über das erreichte Verhältnis der geforderten Zielwerte einer Schraubverbindung von aufgebrachtem Drehmoment zum Weiterdrehmoment möglich. Dabei ist zu beachten, dass das Weiterdrehmoment in Bezug zur eigentlichen Zielgröße Klemmkraft (Vorspannkraft) hergestellt und dokumentiert wurde. Die hilfreichen Methoden sind die Schraubfallanalysen und die Streckgrenzenermittlung.

3.2 Drehmomentspezifische Begriffe

Anziehggeschwindigkeit

Bezieht sich auf den gesamten Anziehvorgang einer Schraubstelle. Dieser kann sich in verschiedene Drehzahl- bzw. Drehzahlrampenbereiche untergliedern. Die Anziehggeschwindigkeit hat Einfluss auf das Montageergebnis und auf das Prüfergebnis der Prozessfähigkeitsuntersuchung.

Hinweis: Abweichend von der Nomenklatur der ISO 22514 und des VDA-Bandes 4 werden hier die Begrifflichkeiten des VDI mit Prozessfähigkeit anstelle von Prozessleistung genutzt.

Anziehvorschrift (Anzugsvorschrift)

Vorgaben für die verschiedenen Anziehparameter einer Verschraubung wie z. B. Zieldrehmoment, Drehwinkelstartmoment, Toleranzangaben, Anziehggeschwindigkeit, Anziehverfahren, Montagereihenfolge, Durchsteckrichtung, Krafteinleitung etc.

Beispiele **Anziehdrehmoment M_A** :

$10 N \cdot m \pm 1,5 N \cdot m$	$10 N \cdot m \pm 15 \%$
$10 N \cdot m$ (Zieldrehmoment)	$10 N \cdot m$ (Zieldrehmoment)
$\pm 1,5 N \cdot m$ (Toleranz)	$\pm 15 \%$ (Toleranz)

Beispiele **Drehwinkelanzug**:

$(50N \cdot m \pm 7,5N \cdot m) + (90^\circ \pm 15^\circ)$	$(50N \cdot m \pm 15 \%) + (90^\circ \pm 15^\circ)$
$50 N \cdot m$ (Drehwinkelstartmoment)	$50 N \cdot m$ (Drehwinkelstartmoment)
$\pm 7,5 N \cdot m$ (Toleranz)	$\pm 15 \%$ (Toleranz)
90° (Zieldrehwinkel)	90° (Zieldrehwinkel)
$\pm 15^\circ$ (Toleranz)	$\pm 15^\circ$ (Toleranz)

Attributive Drehmomentprüfung (Mindestmomentprüfung)

Die attributive Drehmomentprüfung erfolgt durch Aufbringen eines Prüfdrehmomentes (typischerweise \leq Zieldrehmoment) in Anziehrichtung.

Der Schraubverbund wird als „in Ordnung“ bewertet, wenn sich das Verbindungselement nicht weiterdreht. Mit dieser Prüfung kann nachgewiesen werden, dass die Schraubverbindung angezogen wurde.

Lösen/Losdrehen

Drehen der vorgespannten Schraubverbindung entgegen der Anziehrichtung.

Losbrechmoment M_{LH}/M_{WH}

Das Losbrechmoment beim Lösen M_{LH} bzw. Weiterdrehen M_{WH} ist das Drehmoment, das nach abgeschlossenem Verschraubungsvorgang zum Überwinden der Haftreibung des Verbindungselements benötigt wird (siehe Abbildung 3-6).

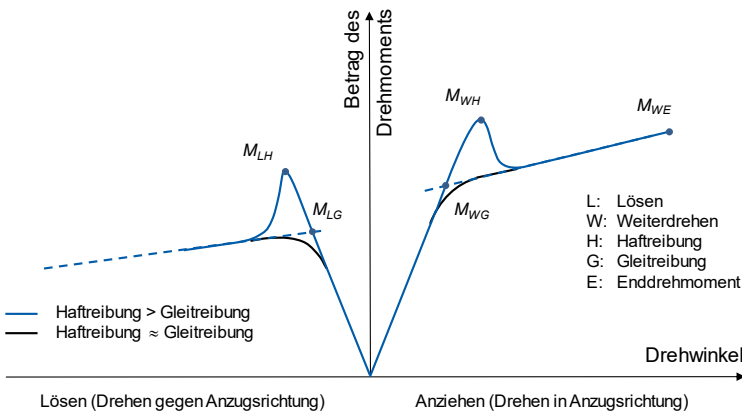


Abbildung 3-6: Prinzip-Darstellung des Drehmoment-Drehwinkelverlaufs beim Lösen und Weiterdrehen an einer vorgespannten Schraubverbindung

Schraubfallanalyse (für das Weiterdrehmoment)

Für die Prüfprozesseignung gemäß VDA-Band 5.2 ist es relevant, die Charakteristik des Schraubfalls zu kennen. Über die Analyse der Drehmoment-Drehwinkelkurven – beschrieben in Kapitel 6.2 – wird die sachgerechte Auswertemethode bestimmt.

Schraubverbund/Schraubverbindung SV [15]

Lösbare Verbindung mit Gewinde, die zwei oder mehrere Teile zusammenfügt.

Anmerkung 1: Sie kann aus einer oder mehreren Schraubstellen bzw. aus einem oder mehreren Schraubfällen bestehen.

- Anmerkung 2: Bezieht sich auf Schrauben und auch andere Bauteile mit Gewinde (z.B. Deckel, Überwurfmutter, Abreißcollare, Einstellschrauben bzw. -mutter)
- Anmerkung 3: Konstruktive Anforderungen können hierbei sein, dass die verbundenen Teile sich unter allen vorkommenden Betriebskräften wie ein Teil verhalten, elektrische Kontaktierung sichergestellt ist, Teile in Position fixiert sind, etc..
- Anmerkung 4: Zur Abgrenzung siehe Schraubenverbindung, Schraubfall, Schraubstelle

Zieldrehmoment M_{Ziel}

Zielwert für das Drehmoment
(früher auch Nenndrehmoment genannt).

Weiterdrehen

Drehen der vorgespannten Schraubverbindung in Anziehrichtung

Weiterdrehmoment M_{WG}

Das Weiterdrehmoment ist eine autarke Prüfung des zum Weiterdrehen des Verbindungselements einer Schraubstelle benötigten Drehmoments.

3.3 Toleranzgrenzen des Weiterdrehmoments

Erfahrungsgemäß können die in der Anziehvorschrift für Drehmomentanzüge definierten oberen und unteren Toleranzgrenzen des Zieldrehmoments aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren (siehe Abbildung 3-4) häufig nicht als Prüfgrenzen (z. B. des Weiterdrehmomentes) übernommen werden. In der Praxis haben sich deshalb verschiedene Vorgehensweisen zur Festlegung von Prüfgrenzen etabliert, die auf Erfahrung, pauschalen Vorgaben, einer Rückrechnung auf Basis erfasster Messwerte oder einer zeitlich gestaffelten Kombination dieser Ansätze beruhen (z. B. pauschale Vorgaben für Vorserie und Serienstart, Rückrechnung in der Serie, siehe VDI/VDE 2645-3 [13], Kapitel 9). Ziel dieser Festlegungen von Prüfgrenzen ist es, Fehler sicher zu erkennen und Pseudofehler, d. h. die n.i.O.-Klassifizierung eines i.O.-Zustandes, zu vermeiden.

Die so festgelegten Prüfgrenzen können sich aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren für gleiche Verbindungen, die unter verschiedenen Randbe-

dingungen gefertigt werden, unterscheiden (z. B. Fertigung in klimatisierter/nicht klimatisierter Umgebung, manuelle/automatisierte Fertigung).

Es besteht auch die Möglichkeit, dass die so festgelegten Prüfgrenzen aufgrund von Änderungen der Einflussfaktoren oder auf der Grundlage von Messergebnissen zu einem späteren Zeitpunkt angepasst werden müssen.

3.4 Abgrenzung zwischen Werkzeug und Messmittel

Ein Werkzeug wird als ein System definiert, das ein Drehmoment, z. B. in eine Schraube, im Rahmen eines Fertigungsvorganges einleitet. Die Qualifikation des Werkzeugs erfolgt z. B. in Form einer Kurzzeit-/Maschinenleistungsuntersuchung (im sprachlichen Gebrauch auch *MFU – Maschinenfähigkeitsuntersuchung* genannt).

Ein Messmittel wird als ein System definiert, das ein Drehmoment, z. B. in eine Schraube, zum Zweck der Messung einleitet, um das Weiterdrehmoment zu ermitteln (siehe Abbildung 3-1). Die Methoden zur Qualifikation der Prüfprozesseignung sind Gegenstand dieses VDA-Bandes.

4 Prüfprozessmanagement

Das Prüfprozessmanagement bei Schraubverbindungen unterscheidet sich in der Struktur der Teilprozesse nicht vom Vorgehen, das im VDA-Band 5 [1] beschrieben ist. Dies beinhaltet das Verfahren zur risikogerechten Absicherung, den Beanstandungsprozess, den Wirksamkeitsnachweis und die Absicherung von Prüfergebnissen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit. Es ist hierbei, wie in VDA-Band 5, Kapitel 4.1.2 [1] beschrieben, die DIN EN ISO 14253-1 [8] anzuwenden.

4.1 Rollen und Kompetenzen im Prüfprozessmanagement

Gilt für Schraubverbindungen analog zu VDA-Band 5 [1]. Ergänzend sind Rollen und Kompetenzen aus der VDI/VDE MT 2637-1 [14] zu entnehmen.

4.2 Prüfprozessplanung

Gilt für Schraubverbindungen analog zu VDA-Band 5 [1].




4.3 Risikogerechte Absicherung

Die risikogerechte Absicherung der Prüfprozesseignung ist ein Verfahren zur Absicherung von Prüfentscheiden bei gleichzeitiger Berücksichtigung wirtschaftlicher Anforderungen (siehe VDA-Band 5, Kapitel 4.3 [1]). Zusätzlich zu den Anforderungen aus dem VDA-Band 5 [1], bei dem die VDI-Richtlinie zum Prüfprozessmanagement (VDI/VDE 2600 Blatt 1) herangezogen wird, sind bei der Schraubtechnik auch die Anforderungen aus der VDI/VDE 2862-1 [7] (A-, B-, C-Kategorisierung) zu berücksichtigen.

In der folgenden Übersicht wird ein Bezug von den sicherheits-, zulassungsrelevanten und funktionalen Besonderen Merkmalen (siehe VDA-Band Prozessbeschreibung Besondere Merkmale, Kap. 3) zu den Kategorien aus VDI/VDE 2862-1 [7] in der Schraubtechnik hergestellt.

Prüfmerkmale, die keine Besonderen Merkmale sind, fallen in die Kategorie „C“. Die weißen Pfeile verdeutlichen eine „Höherstufung“, wohingegen schwarze Pfeile eine eindeutige Zuweisung bedeuten.

Tabelle 4-1: Vergleich der VDA Besonderen Merkmale mit den Schraubfallkategorien gemäß VDI/VDE 2862-1 [7]

Merkmal	CC / BM-S / BM-Z	SC / BM-F	
	Bezug auf direkten Kunden (OEM) UND/ODER Endkunden		
Definition	...sind vom Kunden oder der Organisation festgelegte Produktmerkmale oder Prozessparameter, die maßgeblichen Einfluss auf die Fahrzeugsicherheit oder die Einhaltung gesetzlicher Vorgaben (z. B. Emissionsgrenzwerte), die Passform, die Funktion , die Leistung oder die weitere Verarbeitung des Produktes haben können.	...sind Merkmale eines Produktes oder Prozesses, die einerseits einen wesentlichen Einfluss auf die Kundenzufriedenheit mit dem Produkt bzgl. Montage, Funktion , Einbau oder Aussehen haben können, andererseits die Fähigkeit zur Bearbeitung oder Fertigung des Produktes beeinflussen können.	
			
Kategorie	Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C
Definition	Eine Schraubstelle/Schraubverbindung wird in die Kategorie A eingestuft, wenn das Versagen dieser Schraubstelle/Schraubverbindung mit hoher Wahrscheinlichkeit zum sicherheitstechnischen Versagen bzw. zur Zerstörung des Gesamtfahrzeugs führen kann und damit eine Gefahr für Leib und Leben gegeben ist.	Eine Schraubstelle/Schraubverbindung wird in die Kategorie B eingestuft, wenn das Versagen der Schraubstelle/Schraubverbindung zu einer Funktionsstörung des Fahrzeugs führt, die ein selbständiges Erreichen der nächstgelegenen Servicewerkstatt nicht erlaubt und wenn sie nicht der Definition der Kategorie A entspricht.	Eine Schraubstelle/Schraubverbindung wird in die Kategorie C eingestuft, wenn sie nicht der Definition der Kategorie A oder Kategorie B entspricht.
	Bezug auf den Endkunden bzw. Nutzer		

4.4 Prüfmittelmanagement

Das Prüfmittelmanagement bei Schraubverbindungen ist analog wie im VDA-Band 5 [1] beschrieben.

Hinweis: Bei VDA 5.2 wird die Unsicherheit des Messsystems nicht auf Basis von Wiederholmessungen an einem kalibrierten Normal, sondern auf Basis einer kalibrierten Referenz (Messbremse) ermittelt. Sollte als Referenz ein Bauteil verwendet werden, sind die üblichen Maßnahmen in Bezug auf das Prüfmittelmanagement nicht anwendbar.

4.5 Wirksamkeitsnachweis des Prüfprozessmanagements

Gilt für Schraubverbindungen analog zu VDA-Band 5 [1].

4.6 Kalibrierung

Die Anforderungen an Kalibrierlabore werden in VDA 5, Kap. 4.5.2 beschrieben. Mindestanforderungen an die Kalibrierung werden im VDI/VDE 2645-1 [11] beschrieben.

5 Grundlegende Prüf- und Messverfahren

Für die Prüfung von Schraubverbindungen in der Serie stehen grundsätzlich drehmoment- oder längengestützte Prüfverfahren zur Verfügung. Da die Prüfprozesseignung für längengestützte Prüfverfahren (z. B. Laufzeitmessungen mit Ultraschall, Messung der Längenänderung nach Verformung) nach VDA-Band 5 [1] erfolgen kann, wird im Folgenden auf drehmoment- bzw. drehmoment-drehwinkelgestützte Prüfverfahren eingegangen. Diese Prüfungen sind in einem definierten Zeitfenster nach der Verschraubung und vor dynamischer und thermischer Belastung durchzuführen.

5.1 Weiterdrehmoment (Nachziehdrehmoment)

Bei diesem Verfahren wird die Schraube in Anzugsrichtung definiert weitergedreht und eine Drehmoment-Drehwinkelkurve erzeugt. Die Auswertung der Messkurve wird in Kapitel 6 näher beschrieben. Bei der Prüfung ist darauf zu achten, dass die Verbindung durch das Weiterdrehen nicht geschädigt wird.

5.2 Lösen und Wiederanziehen („back-to-mark“)

Dieses Verfahren wird ausschließlich zu Analyse Zwecken verwendet und ist für die Serienüberwachung nicht zulässig.

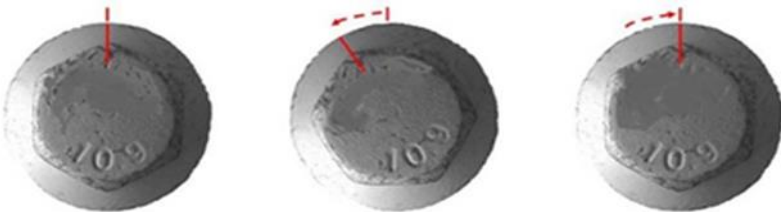


Abbildung 5-1: Prinzipdarstellung zum Ablauf beim Lösen und Wiederanziehen

Beim „back-to-mark“-Verfahren wird die Verbindung um einen vorbestimmten Drehwinkel gelöst (siehe Abbildung 5-1). Die Vorspannung darf nicht auf Null reduziert werden. Dann wird die Schraubverbindung wieder angezogen, bis die Ursprungsposition wieder erreicht ist. Das dort erfasste maximale Drehmoment repräsentiert das eingeleitete Drehmoment der vorliegenden Schraubstelle.

Der Nachteil ist, dass sich durch das Lösen die ursprünglich vorliegenden Reibungsverhältnisse ändern, z. B. durch das Verschleppen von Öl, wodurch das Ergebnis verfälscht werden kann.

5.3 Attributive Prüfung

Auf die Risiken des attributiven Prüfens wird ausführlich in VDA-Band 5 [1], Kapitel 9 eingegangen.

In begründeten Ausnahmefällen kann eine attributive Prüfung jedoch sinnvoll bzw. notwendig sein, z. B. bei einer Verschraubung, die nicht weitergedreht werden darf, da sie sonst beschädigt werden könnte, sehr kleinen und sehr großen Drehmomenten (z. B. $< 3 N \cdot m$; $> 500 N \cdot m$), ergonomisch nicht zugänglichen Schraubstellen.

Eine mögliche attributive Prüfung bei Drehmomenten ist die sog. Mindestdrehmomentprüfung. Hierbei wird das Verbindungselement grundsätzlich mit einem definierten Prüfmoment in Anziehrichtung beaufschlagt. Das Ergebnis der Prüfung ist „in Ordnung“ (i.O.), wenn sich das Verbindungselement nicht weiterdreht. Mit dieser Prüfung kann nachgewiesen werden, dass die Schraubverbindung angezogen wurde.

Es werden zwei Varianten unterschieden:

1. Mindestdrehmomentprüfung mit mechanisch auslösendem Drehmomentschlüssel (Knickschlüssel)

Hier erfolgt die Prüfung mittels mechanisch auslösendem Drehmomentschlüssel und einem zuvor definierten Drehmoment, das in Anzugsrichtung auf das Verbindungselement aufgebracht wird. Dabei darf sich die Schraube nicht weiterdrehen. Ein aussagekräftiges Ergebnis hängt hier in besonderem Maße von der Qualifikation der Mitarbeitenden ab. Zur Unterstützung der Erkennung eines Weiterdrehens wird eine Markierung der Ausgangsposition empfohlen (siehe Abbildung 5-1).

2. Mindestdrehmomentprüfung mit elektronischem Drehmomentschlüssel und Winkelüberwachung

Um die Einflüsse der Messungenauigkeit durch Mitarbeitende zu reduzieren, wird empfohlen, diese Prüfung mit Hilfe eines elektroni-

schen Drehmomentschlüssels mit Winkelüberwachung durchzuführen.

Beide Varianten haben den Nachteil, dass ein zu hoch aufgebrachtes Montagedrehmoment nicht erkannt wird.

Abgrenzend zur Prüfung kann eine Absicherung der Montage durch mechanisch auslösende Drehmomentschlüssel (Produktionsmittel/Werkzeug) durchgeführt werden. Dadurch kann der Nachweis erbracht werden, dass eine Schraubverbindung angezogen wurde. Dies ist sinnvoll zur Prozessabsicherung bei Neuanläufen (zeitlich begrenzt, bis Weiterdrehmoment-Analyse durchgeführt wurde), Kleinserien oder als Notstrategie bei Anlagenausfall.

5.4 Losdrehmoment

Die Betrachtung des Losdrehmomentes M_{LG} ist für eine Serienprüfung nicht zulässig und wird im Allgemeinen nur zu Analyse Zwecken verwendet. Der in Abbildung 3-6 idealisiert dargestellte Drehmoment-Drehwinkelverlauf ist in der Praxis aufgrund der Überlagerung des Abfalls der Vorspannkraft und des Drehmomentes schwer nachzuweisen.

Hinweis 1: Das Losdrehmoment wird z. B. zur Beurteilung des Warmlöseverhaltens ermittelt (siehe VDA 235-203 [5]).

Hinweis 2: Das Losdrehmoment ist für die qualitative Beurteilung einer Schraubverbindung nur bedingt geeignet, da die Messung entgegen der Anziehrichtung erfolgt und somit andere Kraftverhältnisse vorherrschen als bei einer Messung in Anziehrichtung (siehe Abbildung 3-6).

Hinweis 3: Dieses Verfahren ist in der Serienüberwachung nicht zulässig, da es keine quantitative Aussage über die aufgebrachte Vorspannkraft zulässt.

Hinweis 4: Das Losbrechmoment M_{LH} ist ebenfalls nicht zulässig.

Hinweis 5: Das Losdrehmoment wird u. a. auch zur Wirksamkeitskontrolle von Schraubensicherungsmaßnahmen gemessen.

6 Mess- und Prüfprozesseignung bei Schraubverbindungen

6.1 Besondere Einflüsse bei Schraubverbindungen

Schraubverbindungen zeichnen sich auch dadurch aus, dass die gemessenen Werte von Weiterdrehmomenten sehr spezifischen Einflüssen unterliegen.

Da der Messprozess durch diese Einflüsse zu stark beeinträchtigt wird, sollte, wie in Kapitel 8 beschrieben, bei der Prüfprozesseignung auf eine Messbremse als Referenz zurückgegriffen werden.

Für stabile Schraubverbindungen, deren Einflüsse gering sind, kann auch auf ein Bauteil zurückgegriffen werden.

Nachfolgendes Ishikawa-Diagramm zeigt die relevanten Einflüsse auf (siehe Abbildung 6-1).

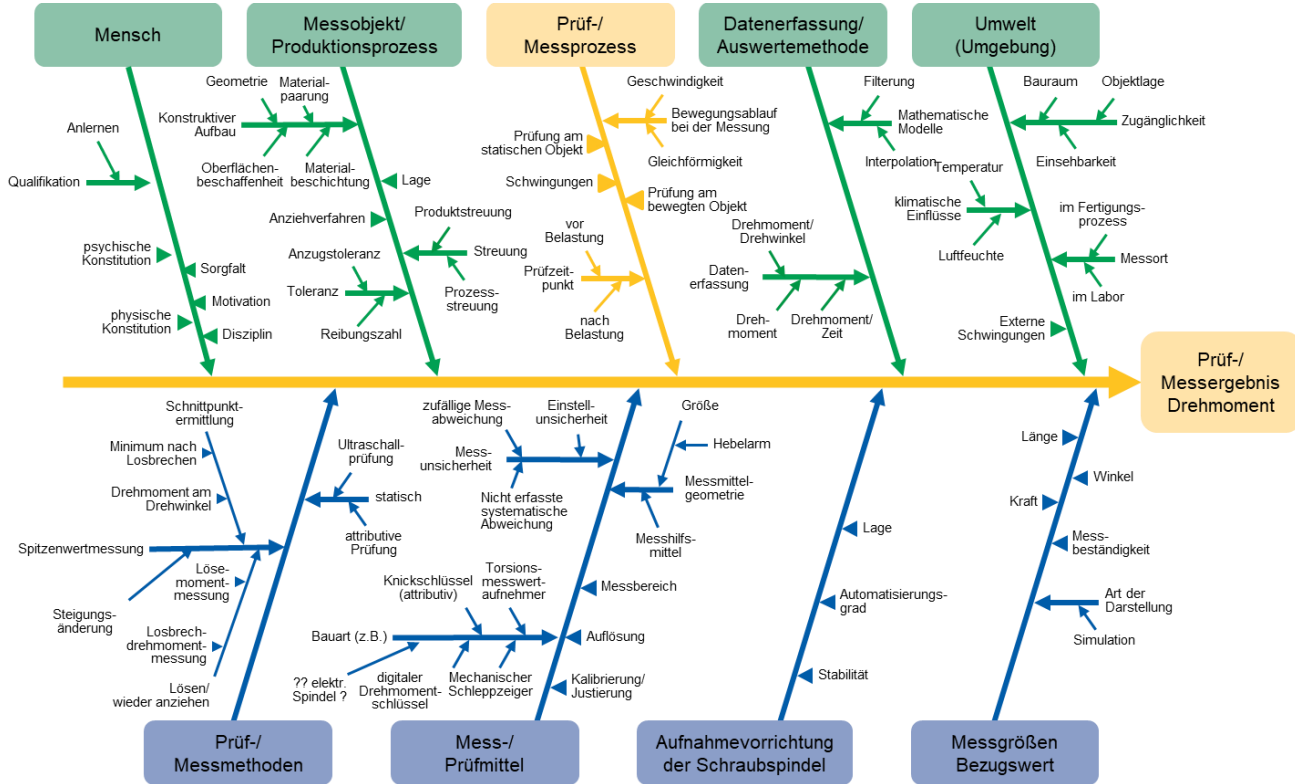
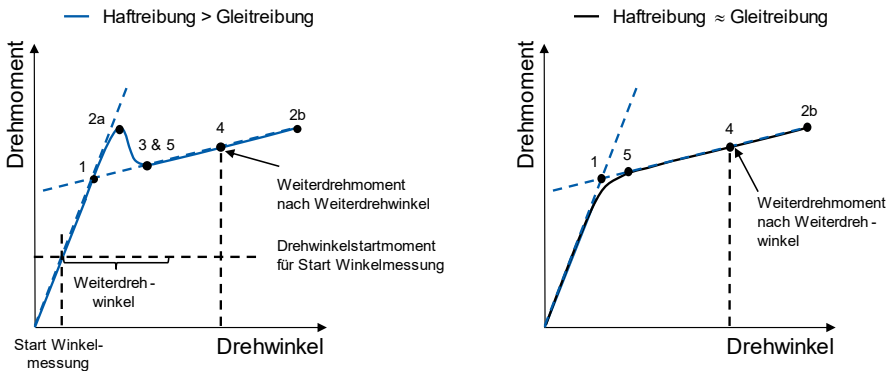


Abbildung 6-1: Wichtige Einflüsse auf die Unsicherheit der Messergebnisse

6.2 Einflüsse aus der Auswertemethode (Messmethoden analog VDI/VDE 2645-3 [13])

Je nach Hersteller, Messgerät und Prüfmethode werden die erfassten Rohdaten unterschiedlich aufbereitet und ausgewertet. Bei der Aufbereitung sind verschiedene Interpolationen, Filterungen oder Glättungen möglich. In der Auswertung sind je nach Strategie (Schnittpunktermittlung, Spitzenwertmessung, Minimum nach Losbrechen, Drehmoment am Drehwinkel, Steigungsänderung) verschiedene Algorithmen zur Ermittlung des Messergebnisses hinterlegt (siehe Abbildung 6-2). Die ermittelten Messergebnisse können sich deshalb systematisch unterscheiden. Daraus folgt, dass bei Anwendung unterschiedlicher Messgeräte ggf. Vergleichsmessungen durchgeführt werden müssen.

Hinweis 1: Auswerte-Software von Messsystemen muss nach Änderungen an der jeweiligen Auswerte-Software validiert werden (siehe VDA 5, Kap. 8.2 „Validierung Mess-Software“).



- | | | | |
|----|--------------------------------------|---|---------------------------|
| 1 | Schnittpunktermittlung | 3 | Minimum (nach Losbrechen) |
| 2a | Spitzenwertmessung (beim Losbrechen) | 4 | Drehmoment am Drehwinkel |
| 2b | Spitzenwertmessung | 5 | Steigungsänderung |

Abbildung 6-2: Systematische Unterschiede infolge unterschiedlicher Vorgehensweisen bei der Ermittlung des Messergebnisses

Hinweis 2: Falls der Drehmomentwert bei Punkt 5 größer ist als in Punkt 2, wird es bei einer Spitzenwertmessung als Maximum erkannt.

Die Erklärung der einzelnen Punkte (1-5) sind der VDI/VDE 2645-3 [13] zu entnehmen.

6.3 Einflüsse aus Mess-/Prüfmittel und Messhilfsmittel (Messgerät)

Mechanisch-geometrische Einflüsse

Aufgrund von Eigenschaften wie Steifigkeit des Messmittels können die Drehmoment-/Drehwinkelkurven auch unterschiedlich verlaufen. Zum Messsystem gehören das Messmittel und die zur Durchführung der Messung notwendigen Messhilfsmittel. Daher wird die Standardisierung von Messhilfsmitteln und deren Berücksichtigung bei der Messgeräteeignung (VDI/VDE 2645-1 [11]) empfohlen. Zu den Messhilfsmitteln zählen Gelenke, Verlängerungen, Gegenhalter, Adapter und Führungen (Abstützungen), durch deren Einsatz weitere Fehlerquellen wie z. B. Spiel, Verkipfung und Wirkungsgradverluste entstehen können.

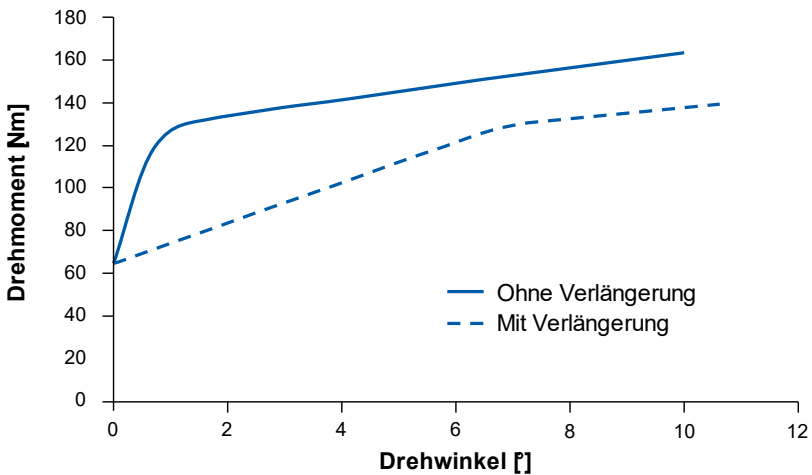


Abbildung 6-3: Messung an der gleichen Schraubstelle mit und ohne Verlängerung. Weiterdrehwinkel 10° ab 65 N·m (50 % des Anzugsmoments)

6.4 Einflüsse aus Prüf-/Messprozess

Bewegungsablauf bei der Messung

Der zeitliche und räumliche Bewegungsablauf bei der manuellen Messung (Geschwindigkeit, Gleichförmigkeit, Verkippungen) kann sich in verschiedener Weise auf die Messung auswirken. So kann z. B. die Reibungszahl von der Gleitgeschwindigkeit an den Kontaktflächen mit Gewinde und Unterkopf abhängen (siehe Abbildung 6-4).

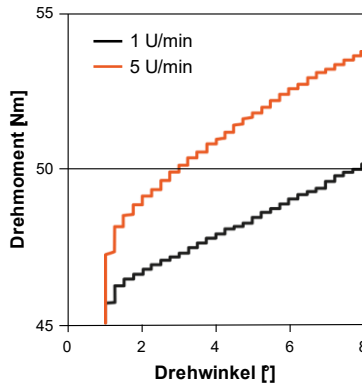


Abbildung 6-4: Weiterdrehen mit 1 U/min und 5 U/min auf KTL-Beschichtung

Prüfung am bewegten bzw. beweglichen Objekt

Prüfungen an bewegten (z. B. Bauteil auf Montageband) bzw. beweglichen (z. B. Motor im Gehäuse, gummigelagert) Objekten können das Messergebnis verfälschen.

Grundsätzlich ist die Prüfung am statischen Objekt vorzuziehen, ggfs. ist das Prüfobjekt zu stabilisieren. Die Prüfprozesseignung ist aber in jedem Fall für den tatsächlichen Prüfprozess nachzuweisen.

Prüfzeitpunkt

Beschreibt den Zeitpunkt der Prüfung nach Beendigung des Fertigstellungsvorganges.

Unterschiedliche Zeitspannen zwischen Fertigstellung der Schraubverbindung und Messung des Weiterdrehmomentes führen in der Regel zu unterschiedlichen Messergebnissen.

Der Zeitpunkt der Messung sollte je Schraubfall immer gleich gewählt werden.

Folgende Faktoren haben einen Einfluss auf die Festlegung des Prüfzeitpunktes: Zugänglichkeit, Einsatz von Schrauben mit klebender Beschichtung, Setz-/Relaxationsverhalten, Zustand des Prüfobjektes (vor/nach Belastung), Bauteiltemperatur.

Bei klebenden Beschichtungen von Verbindungselementen muss die Aushärtezeit des Klebstoffs berücksichtigt werden (z. B. ist nach DIN 267-27 [6] bzw. nach Herstellerangaben vorzugehen).

Prüfseite bei Durchsteckverbindungen

Bei Durchsteckverbindungen (Mutter + Schraube) erfolgt die Messung auf demselben Verbindungselement, an dem das Zieldrehmoment eingeleitet wurde. Um das Messergebnis nicht zu verfälschen, ist das nicht angezogene Verbindungselement gegenzuhalten.

6.5 Prozessablauf der Prüfprozesseignung

1. Prüfprozessvorgabe

Grundsätzlich muss bei jedem neuen Schraubfall ermittelt werden, ob ein Prüfauftrag vorliegt. Liegt dieser vor, muss entschieden werden, welches Verfahren zur Prüfung herangezogen wird (siehe Kapitel 5). Generell sollte stets das Verfahren „Weiterdrehmoment“ (siehe Kapitel 5.1) verwendet werden.

Ergeben die schraubfallbezogenen Rahmenbedingungen, dass ein Weiterdrehen nicht sinnvoll oder nicht möglich ist, muss eine alternative Prüfung festgelegt werden. Beispiele alternativer Prüfungen werden in Kapitel 5.2 ff. beschrieben, doch nicht tiefergreifend betrachtet.

2. Festlegung der Auswertemethode

Hier wird der Messpunkt für die Auswertung festgelegt, siehe dazu Methodenauswahl aus VDI/VDE 2645-3 [13].

3. Auswahl eines geeigneten Messsystems

Als Messsystem werden hier sämtliche Messmittel und Messhilfsmittel betrachtet und definiert.

Die technischen Voraussetzungen für das Messmittel werden spezifiziert:

- Kalibrierung Drehmoment und Drehwinkel
- Messgerätefähigkeit

Hilfestellung für die oben genannten Punkte siehe VDI/VDE 2645-1 [11]

4. Festlegung zweifaktorieller Versuchsaufbau

Um den zweifaktoriellen Versuchsaufbau durchführen zu können, muss im Vorfeld entschieden werden, welche Referenz (z. B. Messbremse oder Bauteil) verwendet werden soll (siehe Kapitel 8).

5. Durchführung des zweifaktoriellen Versuchs

Ermittlung der Prüfprozesseignung gemäß „Verfahren 2“ (siehe Kapitel 8).

6. Auswertung mittels des mathematischen Modells

Die ermittelten Ergebnisse sind dem mathematischen Modell zuzuführen, um die Q_{MP} bewerten zu können (siehe Kapitel 8.2, Schritte 1-5).

7. Feststellung der Prüfprozesseignung

- a) Die Prüfprozesseignung ist als fähig zu bewerten, wenn die $Q_{MP} \leq 30\%$.
- b) Wird die Fähigkeit nicht erreicht, sind geeignete Maßnahmen zu treffen und die Prüfprozesseignung ist zu wiederholen.

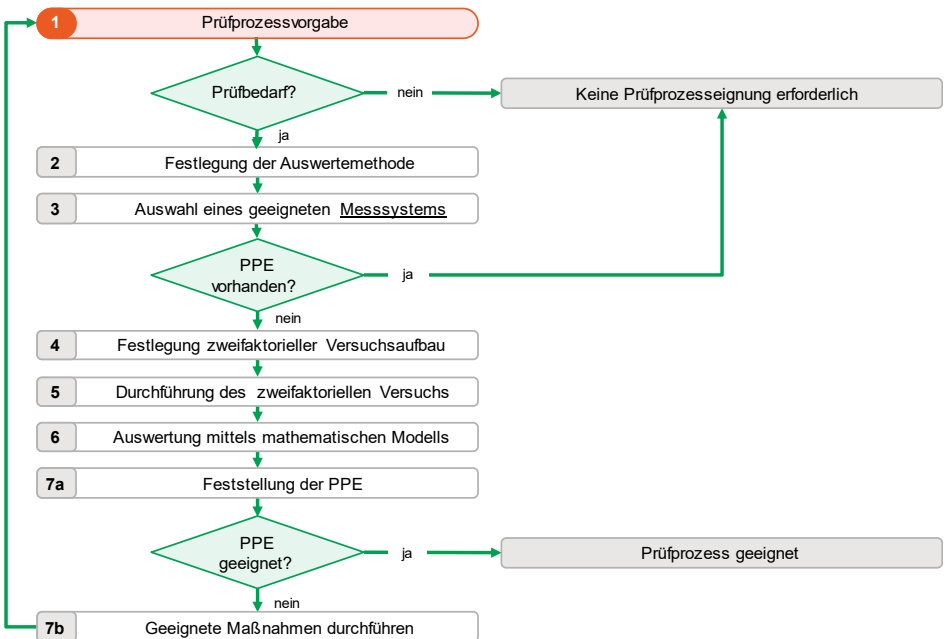


Abbildung 6-5: Prozessablauf für die Durchführung der Prüfprozesseignung

7 Beurteilung der fortlaufenden Eignung

Die Beurteilung der fortlaufenden Eignung erfolgt bei Schraubverbindungen analog zu VDA-Band 5, Kapitel 10 [1].

Insbesondere sind hierbei zu berücksichtigen:

- Messhilfsmittel wie z. B. Ratschen, Verlängerung, Abtriebe
- Änderungen bezüglich Software und Firmware
- Grundeinstellungen des Messgeräts (z. B. Abtastrate, Korrekturfaktoren)

8 Der Eignungsnachweis

8.1 Vorbemerkung

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, lässt sich beim Schraubfall nicht auf ein Normal zurückgreifen. Auch mit den Simulationen auf einer Messbank kann eine Versuchsreihe nicht mit nur einer Stichprobe dargestellt werden. Aus diesem Grund wird in dem beschriebenen Versuch auf vier einzelne Stichproben zurückgegriffen, da die Messbank jeden Versuch individuell simuliert. Dasselbe würde auch gelten, wenn man die Prüfprozesseignung an Bauteilen durchführt.

In dem hier zu Grunde liegenden Versuch wurden zwei Einflussgrößen (Faktoren) gemeinsam untersucht. Dadurch enthält die Gesamtstreuung eine Vermengung dieser Einflussgrößen. Die Streuungen der einzelnen Einflussgrößen können jedoch mit einer Varianzanalyse (ANOVA) berechnet werden.

Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Ermittlung der Mess- und Prüfprozesseignung, auch „Verfahren 2“ genannt. Dabei werden anhand eines einzigen Versuchs (z. B. zwei Bediener, je vier Stichproben à drei Wiederholungen) sowohl die Wiederholbarkeit (Repeatability) als auch die Vergleichbarkeit (Reproducibility) der Bediener und die Wechselwirkung Bediener/Teil bestimmt.

Die Simulation eines Weiterdrehmoments auf einer Messbremse muss so nah wie möglich am realen Schraubfall sein (hart/weich). D. h., vergleichbares Losbrechverhalten von den zu untersuchenden Schraubfällen (signifikantes Losbrechen vs. kein Unterschied zwischen Haft- und Gleitreibung) muss simuliert werden.

Im Fall der Simulation mit einer Messbremse sind grundsätzlich folgende Aspekte zu berücksichtigen: Zu Beginn ist ein steiler Anstieg des Drehmoments zu realisieren, vergleichbar mit der Drehmomentrate beim Aufbringen des Drehmoments bis zum Losbrechen der Schraube bei realen Schrauben (siehe Abbildung 8-1, Bereich 1). Im Anschluss ist im Bereich des angestrebten Weiterdrehmoments der Simulation ein signifikanter Einbruch der Drehmomentrate darzustellen (siehe Abbildung 8-1, Bereich 2). Abhängig von den in der Praxis bei der Anwendung vorliegenden Schraubfällen sind die Kurvenverläufe vor, während und nach dem simulierten Losbrechen nachzubilden, wobei der weitere Verlauf der Drehmomentsimulation nicht für alle Auswertemethoden von besonderer Relevanz ist (siehe Abbildung 8-1, Bereich 3). Im nachfolgenden Beispiel wurde die Steigungs-Änderungs-Methode angewendet.

Die in diesem Kapitel beschriebene Vorgehensweise ist für alle Messmittel anwendbar, die zur Durchführung einer Prozessfähigkeitsuntersuchung durch Weiterdrehmomentmessung in der VDI VDE 2645-1 beschreiben sind, also z. B. auch für rotierende Drehmoment-/Drehwinkelaufnehmer oder sogenannte Messspindeln. Bei automatisierten Messprozessen muss lediglich der Bedienerinfluss nicht mehr berücksichtigt werden.

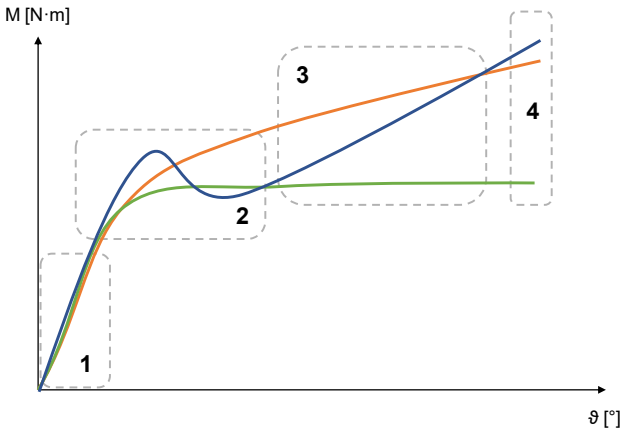


Abbildung 8-1: Simulationskurven Messbremse, Bereiche 1-4

- Hinweis 1: Das Abziehverhalten der Simulation muss haptisch dem einer Schraube entsprechen.
- Hinweis 2: Für die Simulation mit Messbremsen ist die Auswertung des Drehmoments am Ende der Simulation nur dann zweckmäßig, wenn dies im Rahmen einer Messung für die Spitzenwertmethode vorgenommen wird (siehe auch Ermittlung der Messgeräteeignung nach VDI/VDE 2645-1 [11]). Hintergrund ist, dass es sich bei diesem Wert um einen „Abschaltunkt“ handelt (siehe Abbildung 8-1, Bereich 4), während bei einer Weiterdrehmoment-Messung der dynamische Verlauf einer Drehmoment-Drehwinkel-Messung relevant ist.
- Hinweis 3: Es muss nicht zwingend eine Messbremse verwendet werden, es kann u. U. auch möglich sein, die Prüfprozesseignung an einem realen Bauteil zu vollziehen.

8.2 Eignungsnachweis anhand eines Beispiels (Messschlüssel)

Schritt 1: Ermittlung der Unsicherheit des Messsystems u_{MS} aus Kalibrierprotokoll des Messschlüssels gemäß Richtlinie DKD-R 3-7

$$u_{MS} = \frac{\text{Kalibrierstufe (N} \cdot \text{m)} \cdot \text{Unsicherheit W(\%)}}{\text{Erweiterungsfaktor } k_1}$$

$$u_{MS} = \frac{30 \cdot 0,2 \%}{2} = \frac{30 \cdot 0,002}{2} = 0,03$$

Schritt 2: Definition des zweifaktoriellen Versuchsplans

Schritt 2	Faktoren, Anzahl Stufen, Anzahl Versuche, Messwerte		
Faktor A (Stichproben)	Stufen n =	4	
Faktor B (Prüfer)	Stufen k =	2	
	Versuche r =	3	

Abbildung 8-2: Aufbau zweifaktorieller Versuchsplan

	A1	A2	A3	A4
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265
	20,346	20,048	20,427	20,117
	20,463	20,027	19,651	19,759
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655
	20,604	20,441	20,715	20,532
	20,593	20,859	20,687	20,75

Abbildung 8-3: gemessene Werte der Stichproben

Auf Basis der $4 \cdot 2 \cdot 3 = 24$ Messwerte und einer gewünschten Überdeckung von 95,45 % muss der Erweiterungsfaktor angepasst werden: **$k_2 = 2,1147$** .

Schritt 3: Ermittlung der Unsicherheit des Messprozesses u_{MP} mit Hilfe einer kommerziellen Software (Ausschluss Wechselwirkung: 5 %).

R&R (gesamt)

Quelle	StdAbw	Streu. in Unters. (6 × SA)	% Streu. in Unters. (% SU)	% Toleranz (SU/Tol)
R&R (gesamt)	0,463498	2,78099	100,00	34,76
Wiederholbarkeit	0,211808	1,27085	45,70	15,89
Reproduzierbarkeit	0,412271	2,47363	88,95	30,92
Prüfer	0,412271	2,47363	88,95	30,92
Zwischen den Teilen	0,000000	0,00000	0,00	0,00
Gesamtstreuung	0,463498	2,78099	100,00	34,76

Abbildung 8-4: Ausschnitt der Berechnung aus beliebiger Mess-Software (Beispiel)

Schritt 4: Ermittlung der kombinierten Unsicherheit u_{MP}

$$u_{MP.kombiniert} = \sqrt{(u_{MS})^2 + (U_{MP})^2}$$

Schritt 5: Ermittlung der Eignung Q_{MP} mit einer Toleranz

$$T = (20 N \cdot m \cdot 1,2) - (20 N \cdot m \cdot 0,8) = 24 - 16 = 8$$

$$Q_{MP} = \frac{2 \cdot k_2 \cdot u_{MP.kombiniert}}{T} = \mathbf{24,84 \%}$$

Da $Q_{MP} \leq 30 \%$, wird der Prozess als **geeignet** bewertet.

8.3 Variante „Schritt 3 ohne kommerzielle Software (Prinzipdarstellung)“

3a

Faktoren, Anzahl Stufen, Anzahl Versuche, Messwerte erfassen

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

	A1	A2	A3	A4
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265
	20,346	20,048	20,427	20,117
	20,463	20,027	19,651	19,759
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655
	20,604	20,441	20,715	20,532
	20,593	20,859	20,687	20,75

3b

Für jede Stufe (Quadierte Summe der Messwerte)/(Anzahl Stufen * Anzahl Versuche) berechnen

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

	A1	A2	A3	A4
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265
	20,346	20,048	20,427	20,117
	20,463	20,027	19,651	19,759
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655
	20,604	20,441	20,715	20,532
	20,593	20,859	20,687	20,75

4844,5027

5132,9001

2507,5793

2492,55554

2491,3735

2483,8397

© 2007 Siemens AG

3c

(Quadierte Summe aller Messwerte)/(n*k*r) berechnen

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

	A1	A2	A3	A4	
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265	4844,5027
	20,346	20,048	20,427	20,117	
	20,463	20,027	19,651	19,759	
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655	5132,9001
	20,604	20,441	20,715	20,532	
	20,593	20,859	20,687	20,75	
	2507,5793	2492,55554	2491,3735	2483,8397	

0,0297 Summe 3b-3c

9975,3183

3d

Für jeden Faktor ((Summe Ergebnisse aus 3b)-(Ergebnis aus 3c) berechnen

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

	A1	A2	A3	A4	
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265	4844,5027
	20,346	20,048	20,427	20,117	
	20,463	20,027	19,651	19,759	
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655	5132,9001
	20,604	20,441	20,715	20,532	
	20,593	20,859	20,687	20,75	
	2507,5793	2492,55554	2491,3735	2483,8397	

0,0297 Summe 3b-3c

2,1142

1226,7474 1206,48875 1205,6867 1205,6466
 1281,1267 1286,7123 1286,3395 1278,730656

3e Für jede Stufe der Faktoren A und B ((Quadrirte Summe der Messwerte)/Versuche) berechnen

394,250736
413,958716
418,734389
432,558804
424,824816
424,071649

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

	A1	A2	A3	A4	
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265	
	20,346	20,048	20,427	20,117	
	20,463	20,027	19,651	19,759	4844,5027
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655	
	20,604	20,441	20,715	20,532	
	20,593	20,859	20,687	20,75	5132,9001

2507,5793 2492,55554 2491,3735 2483,8397

2,1142

0,0297 Summe 3b-3c

1226,7474 1206,48875 1205,6867 1205,6466
1281,1267 1286,7123 1286,3395 1278,730656

3f (Summe Ergebnis aus 3e)-(Summe Ergebnis aus 3b)+(Ergebnis aus 3c) berechnen

394,250736
413,958716
418,734389
432,558804
424,824816
424,071649

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

	A1	A2	A3	A4	
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265	
	20,346	20,048	20,427	20,117	
	20,463	20,027	19,651	19,759	4844,5027
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655	
	20,604	20,441	20,715	20,532	
	20,593	20,859	20,687	20,75	5132,9001

2507,5793 2492,55554 2491,3735 2483,8397

2,1142

0,0297 Summe 3b-3c

1226,7474 1206,48875 1205,6867 1205,6466
1281,1267 1286,7123 1286,3395 1278,730656

0,0462
2,9886

3g

(Summe aller quadrierten Messwerte)-(Ergebn aus 3c) berechnen

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

384,280736
413,989716
418,734369
432,556804
424,524816
424,071649

	A1	A2	A3	A4	
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265	
	20,346	20,048	20,427	20,117	
	20,463	20,027	19,651	19,759	4844,5027
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655	
	20,604	20,441	20,715	20,532	
	20,593	20,859	20,687	20,75	5132,9001

2507,5793 2492,55554 2491,3735 2483,8397

0,0297 Summe 3b-3c

2,1142

1226,7474 1206,48875 1205,6867 1205,6466
1281,1267 1286,7123 1286,3395 1278,730656

0,0462
2,9666

3h

(Ergebn aus 3g)-(Ergebn aus 3d)-(Ergebn aus 3f) berechnen

Faktor A	Stufen n =	4
Faktor B	Stufen k =	2
	Versuche r =	3

384,280736
413,989716
418,734369
432,556804
424,524816
424,071649

	A1	A2	A3	A4	
B.1	19,856	20,087	20,064	20,265	
	20,346	20,048	20,427	20,117	
	20,463	20,027	19,651	19,759	4844,5027
B.2	20,798	20,83	20,719	20,655	
	20,604	20,441	20,715	20,532	
	20,593	20,859	20,687	20,75	5132,9001

2507,5793 2492,55554 2491,3735 2483,8397

0,0297 Summe 3b-3c

2,1142

1226,7474 1206,48875 1205,6867 1205,6466
1281,1267 1286,7123 1286,3395 1278,730656

0,0462
2,9666
0,8062

3 i Aus den Ergebnissen von 3d,3f,3g,3h Anova Tafel aufstellen					
Anova	SS	DF	MS=SS/DF	Prüfwert	
PV	0,0297	3	0,010	MS_{PV}/MS_{EV}	0,20
AV	2,0845	1	2,084	MS_{AV}/MS_{EV}	41,37
IA	0,0462	3	0,015	MS_{IA}/MS_{EV}	0,31
EV	0,8062	16	0,050		
Total	2,9666	23			

3 j Pooling, Streuung, Unsicherheit berechnet					
Anova	SS	DF	MS=SS/DF	Erwartete Streuung	
AV	2,0845	1	2,084	$6 \cdot \sqrt{(MS_{AV} - (MS_{IA} + MS_{EV})) / n \cdot r}$	
IA+EV	0,8524	19	0,045	1,2708	$6 \cdot \sqrt{(MS_{IA} + MS_{EV})}$
U_{MP}					
			0,4635	$(\sqrt{((Erwartete\ Streuung_{AV})^2 + (Erwartete\ Streuung_{(IA+EV)})) / 6})$	

8.4 Typische Messprozessmodelle

Es ist zielführend, Messprozesse in einer Messprozessmodellmatrix abzubilden. Spezifikationen eines grundlegenden Messmodells werden im Folgenden beschrieben und können zur Freigabe von Schlüsseln/Typen/ Herstellern auf Basis standardisierter Prüfprozesseignung herangezogen werden (siehe exemplarische Messprozessmodelle, Tabelle 6-3, VDA-Band 5, Kapitel 6 [1]):

- Herstellervorgaben (z. B. Einsatzgebiet, Temperatur, Luftfeuchte)
- Oberer und unterer Messbereich
- Toleranz
- Auswertemethode
- Abzugsgeschwindigkeit
- Kurvenverläufe
- Eignungsnachweis der Software (siehe Kap. 8.2 in VDA-Band 5 [1])
- Simulationsparameter (z. B. eingestellte Winkelgrade Messbremse)
- Weitere relevante Merkmale

Hier ist es auch vorstellbar, dass eine entsprechende Prüfprozesseignung mit den angegebenen Punkten teilweise oder ganz durch Dienstleistende erbracht wird.

Hinweis: Eine Typfreigabe auf Basis der Messgerätefähigkeit nach VDI/VDE 2645-1 [11] (Cg/Cgk-Ermittlung) ist nicht zulässig. Die Messgerätefähigkeit ist zusätzlich neben der Kalibrierung für jedes Messmittel zu erbringen (siehe Kapitel 2). Im Gegensatz zur Kalibrierung ist diese jedoch nur einmal vor dem ersten Einsatz zu ermitteln bzw. nach Eingriff in die Messkette/Reparatur.

9 Literatur

- [1] VDA – Verband der Automobilindustrie e. V. (2021). *VDA-Band 5 Mess- und Prüfprozesse: Eignung, Planung und Management* (3. Aufl.). Verband der Automobilindustrie e. V., Berlin.
- [2] VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2015). *VDI 2230 Blatt 1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen*. Verein Deutscher Ingenieure e. V., Düsseldorf.
- [3] DIN – Deutsches Institut für Normung (2022). *DIN ISO 68-1: 2022-11: ISO-Gewinde allgemeiner Anwendung – Grundprofil – Teil 1: Metrisches Gewinde (ISO 68-1:1998 + Amd.1:2020)*. Beuth Verlag, Berlin.
- [4] VDA – Verband der Automobilindustrie e. V. (2021). *VDA 235-101 (11/2021) Reibungszahleinstellung von mechanischen Verbindungselementen mit metrischem Gewinde*. Verband der Automobilindustrie e. V., Berlin.
- [5] VDA – Verband der Automobilindustrie e. V. (2005). *VDA 235-203: 2005-08: Verschraubungsverhalten/Reibungszahlen – Praxis und montageorientierte Prüfung*. Verband der Automobilindustrie e. V., Berlin.
- [6] DIN – Deutsches Institut für Normung (2023). *DIN 267-27:2023-10: Verbindungselemente - Teil 27: Schrauben aus Stahl mit mikroverkapselter klebender Beschichtung (MK-Beschichtung) – Technische Lieferbedingungen*. Beuth Verlag, Berlin
- [7] VDI/VDE – Verein Deutscher Ingenieure, Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (2012). *VDI/VDE 2862-Blatt 1: 2012-04: Mindestanforderung zum Einsatz von Schraubsystemen und -werkzeugen – Anwendung in der Automobilindustrie*. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- [8] DIN – Deutsches Institut für Normung (2017). *ISO 14253-1:2017-10 Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Messgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen*. Beuth Verlag, Berlin.
- [9] DIN – Deutsches Institut für Normung (2009). *DIN ISO 3534-1:2009-10*

Statistik – Begriffe und Formelzeichen – Teil 1: Wahrscheinlichkeit und allgemeine statistische Begriffe (ISO 3534-1:2006); Text Deutsch und Englisch. Beuth Verlag, Berlin.

[10] DIN – Deutsches Institut für Normung (2013). *DIN ISO 3534-2:2013-12 Statistik – Begriffe und Formelzeichen – Teil 2: Angewandte Statistik (ISO 3534-2:2006); Text Deutsch und Englisch.* Beuth Verlag, Berlin.

[11] VDI/VDE – Verein Deutscher Ingenieure, Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (o. D.). *VDI/VDE 2645 Blatt 1 (Projekt): Messgerätefähigkeit – Grundlagen und Begriffe.* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

[12] VDI/VDE – Verein Deutscher Ingenieure, Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (o. D.). *VDI/VDE 2645 Blatt 2 (Projekt): Fähigkeitsuntersuchung von Maschinen der Schraubtechnik; Maschinenfähigkeitsuntersuchung – MFU.* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

[13] VDI/VDE – Verein Deutscher Ingenieure, Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (2019). *VDI/VDE 2645 Blatt 3: Fähigkeitsuntersuchung von Maschinen der Schraubtechnik – Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU).* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

[14] VDI/VDE – Verein Deutscher Ingenieure, Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (2018). *VDI/VDE-MT 2637 Blatt 1: Qualifikation in der Schraubtechnik – Bedarfsgerechte Qualifikation für Mitarbeiter und Führungskräfte.* Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

[15] VDI – Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2021). *Schraubtechnik-glossar.* <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/schraubtechnikglossar>

10 Verzeichnis der Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung
α	Steigungswinkel
α_A	Anziehungsfaktor
μ_G	Gewindereibungszahl
μ_K	Kopfreibungszahl
d_2	Gewindeflankendurchmesser
D_{Km}	wirksamer Durchmesser für das Reibungsmoment in der Schraubenkopf- oder Mutterauflage
F	Kraft
F_M	Montagevorspannkraft
F_{Mmin}, F_{Mmax}	Minimale, maximale Montagevorspannkraft
FV	Vorspannkraft (nach dem Setzen)
k	Erweiterungsfaktor
M_{Ziel}	Zieldrehmoment beim Verschrauben
M_G	Gewindereibungsmoment
M_K	Kopfreibungsmoment
M_{LG}	Losdrehmoment Definition in Anlehnung an VDA 235-203 [5]
M_{LH}	Losbrechdrehmoment beim Lösen. Definition in Anlehnung an VDA 235-203 [5]
M_{St}	Gewindesteigungsmoment
M_{WG}	Weiterdrehmoment Definition in Anlehnung an VDA 235-203 [5]
M_{WH}	Losbrechdrehmoment beim Weiterdrehen. Definition in Anlehnung an VDA 235-203 [5]
N	Anzahl der Messwerte
P	Gewindesteigung
Q_{MP}	Eignungskennwert (Messprozess)
Q_{MS}	Eignungskennwert (Messsystem)
$Q_{MS,max}$	Eignungsgrenzwert (Messsystem)
u_{MP}	Unsicherheit Messprozess
u_{MS}	Unsicherheit Messsystem
U_{MP}	Kombinierte Standardunsicherheit (Messprozess)
U_{MS}	Kombinierte Standardunsicherheit (Messsystem)