Schraubtechnik
Automation
Druckluftmotoren
Druckluftwerkzeuge

DEPRAG
machines unlimited

Schraubtechnik und Qualitätssicherung

D0080 04.2020

ÜBERBLICK

Mit diesem Sonderdruck erhalten Sie einen Überblick über die theoretischen Grundlagen und zugleich einen praxisnahen Leitfaden.

Einleitung	Seite 2
Grundlagen der Schraubtechnik	Seite 3
Anzugsverfahren	Seite 6
Auswahl des geeigneten Schraubsystems / Anwendungsberatung	Seite 9
Prozesssicherheit	Seite 9
Statistik	Seite 11
Genauigkeit in der Schraubtechnik	Seite 14
Messprinzipien	Seite 15
Kalibrieren von Messmitteln	Seite 17
Normen / Richtlinien / Literatur	Seite 18

Einleitung

Die Schraubtechnik ist nach wie vor Schlüsseltechnologie für zahlreiche Montageaufgaben. Schraubverbindungen zeichnen sich durch ihre hohe Belastbarkeit, die Wiederverwendbarkeit der Teile und die Möglichkeit, die Verbindung jederzeit zerstörungsfrei lösen zu können aus. Schrauben sind die am häufigsten verwendeten Maschinenelemente, die in einer extremen Vielfalt von Ausführungen erhältlich und genormt sind.

Für den Schraubprozess gibt es unterschiedliche Zielgrößen, wie z. B.:
- Erzeugen einer definierten Vorspannkraft
- Einschrauben auf Tiefe (Justiervorgang)
- Montage mit definiertem Eindrehwinkel
- Gewinde vorbohren / schneiden bzw. formen
- Gängigkeitsprüfung von Schrauben, Gewindestiften und Muttern mit Grenzwerten
- Reibwertermittlung
- Kontrolle, ob Dichtmittel bzw. mikroverkapselter Kleber an der Schraube vorhanden sind
- Lösen der Schraubverbindung

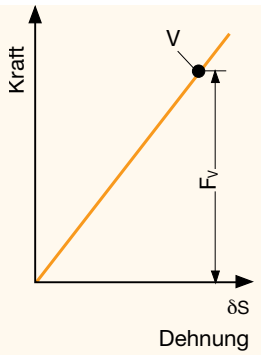
Zunehmende Komplexität der Aufgaben und steigende Anforderungen an die technologische Prozesssicherheit bei höchsten Qualitätsstandards, erfordern ein umfangreiches Expertenwissen bei der Auslegung und dem Betrieb optimaler Schraub- und Montageanlagen.

Grundlagen der Schraubtechnik

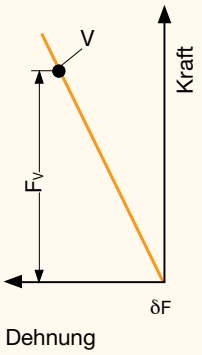
Ziel des Schraubprozesses ist entweder das Aufbringen einer definierten Haltekraft (Vorspannkraft) oder das Ausführen von bestimmten Justage- oder Demontagevorgängen.

Aufbringen einer definierten Vorspannkraft
Der wichtigste Anwendungsfall beim Verschrauben in der Montagetechnik liegt im Aufbringen einer definierten Vorspannkraft. Die Vorspannkraft ist so zu bestimmen, dass einerseits bei jeder möglichen Betriebskraft die vorgesehene Funktion noch gegeben ist, andererseits die zulässige Belastung der Schraubverbindung nicht überschritten wird. Problematisch sind dabei vor allem die häufig unbekannten Setzerscheinungen der Verbindung und die montagebedingten Schwankungen der erreichten Vorspannkraft.
An der Serienverschraubung lässt sich die erzielte Vorspannkraft praktisch nicht ermitteln. Zur Steuerung des Montageprozesses muss deshalb auf indirekte Messgrößen ausgewichen werden. In der Regel ist dies das Anzugsmoment der Verschraubung. Das benötigte Anzugsmoment kann aus der Vorspannkraft nach den Formeln der VDI 2230 errechnet werden.
Darüber hinaus lassen sich experimentell auch noch weitere Vorgaben wie Drehwinkel, Einschraubzeiten, Reibwerte etc. bestimmen, die als Führungsgrößen für den Montageprozess dienen.
Des Weiteren wurden innovative Verfahren zur Erkennung der Schraubenkopfauflage entwickelt, um die Konstanz der Vorspannkraft zu verbessern.
Anhaltswerte liefern Tabellen, wie z. B. auf Seite 4 und 5 dargestellt. Grundsätzlich kann über eine Längenmessung auch eine weitere indirekte Messgröße zur Bestimmung der Vorspannkraft eingesetzt werden. Diese Verfahren sind jedoch sehr aufwändig und daher in der Praxis ohne große Bedeutung.
Aufgrund der praktischen Umsetzbarkeit kommt dem Drehmoment als bestimmende Messgröße noch immer eine herausragende Bedeutung zu.

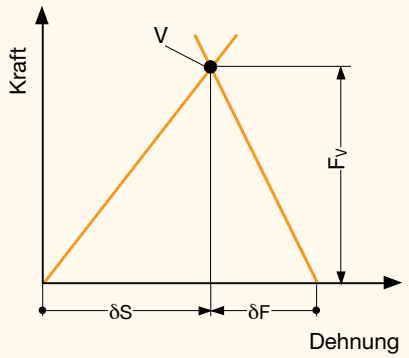
Ausführen von Justage- oder Demontagevorgängen
In diesen Fällen ist die beschreibende Prozessgröße entweder ein Längenmaß (Ein- oder Ausschraubtiefe) oder ein Winkelmaß (Anzahl Umdrehungen). Diese Größen können direkt über geeignete Messsysteme oder indirekt über die Zeit erfasst werden.
Ein Beispiel dafür ist die Montage von Anschlussklemmen:
Die Klemmschraube wird dabei im ersten Schritt auf ein definiertes Drehmoment angezogen und anschließend um ein bestimmtes Winkelmaß zurück gedreht, um ein späteres Anschließen der Leitung zu vereinfachen.



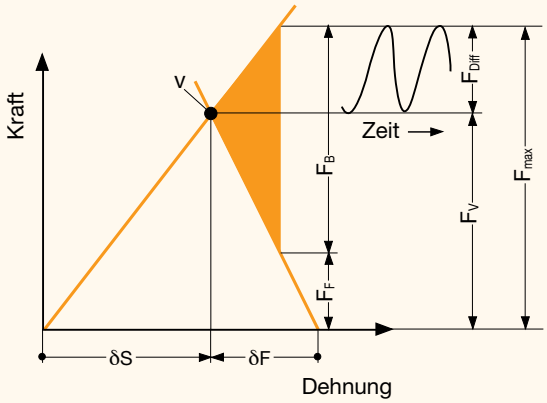
A Kraft-Dehnungs-Kennlinie der Schrauben



B Kraft-Dehnungs-Kennlinie der Flansche und Zwischenlage



C Verspannungsschaubild der Verbindung unter Vorspannkraft F_V.



D Verspannungsschaubild der vorgespannten Verbindung unter Betriebslast F_B.

Montageanzugsmoment und Montagevorspannkraft

$$M_A = F_M \cdot \left[0{,}16 \cdot P + \mu_G \cdot 0{,}58 \cdot d_2 + \frac{D_{km}}{2} \cdot \mu_K\right]$$

M_A = *Montageanzugsmoment*
F_M = *Montagevorspannkraft*
P = *Gewindesteigung*
μ_G = *Gewindereibungsbeiwert*
μ_K = *Kopfreibungsbeiwert*
d_2 = *Normgewindedurchmesser*
D_{km} = *wirksamer Durchmesser für das Reibungsmoment in der Schraubenkopfauflage*

Schaftschrauben mit metrischem Regelgewinde

Gewinde	Reibungszahl µges	Maximale Vorspannkraft $F_{M\,max}$ [N]				Maximales Anziehdrehmoment $M_{A\,max}$ [Ncm]			
		Festigkeitsklassen nach ISO 898/1				Festigkeitsklassen nach ISO 898/1			
		6,8	8,8	10,9	12,9	6,8	8,8	10,9	12,9
M1,6	0,10	470	627	882	1058	11,3	15,1	21,2	25,5
	0,12	455	607	854	1025	12,6	16,9	23,7	28,5
	0,14	441	588	826	992	13,9	18,5	26,0	31,2
M2	0,10	779	1039	1461	1754	23,8	31,7	44,5	53,5
	0,12	756	1008	1417	1701	26,7	35,6	50,0	60,0
	0,14	732	976	1373	1647	29,4	39,2	55,0	66,0
M2,5	0,10	1294	1725	2426	2911	49,0	65,0	91,0	109,0
	0,12	1257	1676	2356	2828	55,0	73,0	103,0	123,0
	0,14	1219	1625	2285	2742	60,0	81,0	113,0	136,0
M3	0,10	1936	2582	3631	4357	84,0	112,0	158,0	190,0
	0,12	1883	2510	3530	4236	95,0	127,0	179,0	214,0
	0,14	1827	2436	3426	4111	105,0	141,0	198,0	237,0
		Maximale Vorspannkraft $F_{M\,max}$ [kN]				Maximales Anziehdrehmoment $M_{A\,max}$ [Nm]			
M4	0,10	3,4	4,5	6,7	7,8	1,9	2,6	3,9	4,5
	0,12	3,3	4,4	6,5	7,6	2,1	3,0	4,6	5,1
	0,14	3,2	4,3	6,3	7,4	2,4	3,3	4,8	5,6
M5	0.10	5,5	7,4	10,8	12,7	3,8	5,2	7,6	8,9
	0,12	5,3	7,2	10,6	12,4	4,3	5,9	8,6	10,0
	0,14	5,2	7,0	10,3	12,0	4,8	6,5	9,5	11,2
M6	0,10	7,7	10,4	15,3	17,9	6,6	9,0	13,2	15,4
	0,12	7,5	10,2	14,9	17,5	7,5	10,1	14,9	17,4
	0,14	7,3	9,9	14,5	17,0	8,3	11,3	16,5	19,3
M8	0,10	14,2	19,1	28,0	32,8	16,1	21,6	31,8	37,2
	0,12	13,8	18,6	27,3	32,0	18,2	24,6	36,1	42,2
	0,14	13,4	18,1	26,6	31,1	20,1	27,3	40,1	46,9
M10	0,10	22,5	30,3	44,5	52,1	32,2	43,0	63,0	73,0
	0,12	21,9	29,6	43,4	50,8	36,5	48,0	71,0	83,0
	0,14	21,3	28,8	42,2	49,4	40,6	54,0	79,0	93,0
M12	0,10	32,8	44,1	64,8	75,9	55,0	73,0	108,0	126,0
	0,12	32,0	43,0	63,2	74,0	62,0	84,0	123,0	144,0
	0,14	31,1	41,9	61,5	72,0	69,0	93,0	137,0	160,0
M14	0,10	45,1	60,6	88,9	104,1	88,0	117,0	172,0	201,0
	0,12	43,9	59,1	86,7	101,5	100,0	133,0	195,0	229,0
	0,14	42,7	57,5	84,4	98,8	111,0	148,0	218,0	255,0
M16	0,10	61,8	82,9	121,7	142,4	134,0	180,0	264,0	309,0
	0,12	60,2	80,9	118,8	139,0	153,0	206,0	302,0	354,0
	0,14	58,6	78,8	115,7	135,4	171,0	230,0	338,0	395,0
M18	0,10	75,3	104,0	149,0	174,0	187,0	259,0	369,0	432,0
	0,12	73,4	102,0	145,0	170,0	212,0	295,0	421,0	492,0
	0,14	71,3	99,0	141,0	165,0	236,0	329,0	469,0	549,0
M20	0,10	96,5	134,0	190,0	223,0	262,0	363,0	517,0	605,0
	0,12	94,1	130,0	186,0	217,0	300,0	415,0	592,0	692,0
	0,14	91,6	127,0	181,0	212,0	334,0	464,0	661,0	773,0
M22	0,10	120,3	166,0	237,0	277,0	353,0	495,0	704,0	824,0
	0,12	117,4	162,0	231,0	271,0	403,0	567,0	807,0	945,0
	0,14	114,3	158,0	225,0	264,0	451,0	634,0	904,0	1057,0
M24	0,10	139,0	192,0	274,0	320,0	451,0	625,0	890,0	1041,0
	0,12	135,5	188,0	267,0	313,0	515,0	714,0	1017,0	1190,0
	0,14	131,8	183,0	260,0	305,0	574,0	798,0	1136,0	1329,0

Schaftschrauben mit metrischem Feingewinde

Gewinde	Reibungszahl µges	Max. Vorspannkraft $F_{M\,max}$ [kN]			Max. Anziehdrehmoment $M_{A\,max}$ [Nm]		
		8,8	10,9	12,9	8,8	10,9	12,9
M8x1	0,10	20,7	30,4	35,6	22,8	33,5	39,2
	0,14	19,7	28,9	33,9	39,2	44,9	50,1
M10x1,25	0,10	32,4	47,5	55,6	44,0	65,0	76,0
	0,14	30,8	45,2	52,9	57,0	83,0	98,0
M12x1,25	0,10	49,1	72,1	84,4	79,0	116,0	135,0
	0,14	46,8	68,7	80,4	101,0	149,0	174,0
M12x1,5	0,10	46,6	68,5	80,1	76,0	112,0	131,0
	0,14	44,3	65,1	76,2	97,0	143,0	167,0
M14x1,5	0,10	66,4	97,5	114,1	124,0	182,0	213,0
	0,14	63,2	92,9	108,7	159,0	234,0	274,0
M16x1,5	0,10	89,6	131,6	154,0	189,0	278,0	325,0
	0,14	85,5	125,5	146,9	244,0	359,0	420,0

Dehnschrauben mit metrischem Regelgewinde

Gewinde	Reibungszahl µges	Max. Vorspannkraft $F_{M\,max}$ [kN]			Max. Anziehdrehmoment $M_{A\,max}$ [Nm]		
		8,8	10,9	12,9	8,8	10,9	12,9
M6	0,10	7,3	10,7	12,5	6,2	9,1	10,7
	0,14	6,8	9,9	11,6	7,7	11,3	13,2
M7	0,10	10,8	15,9	18,6	10,5	15,5	18,1
	0,14	10,1	14,8	17,4	13,2	19,3	22,6
M8	0,10	13,4	19,7	23,1	15,2	22,3	26,1
	0,14	12,5	18,4	21,5	18,9	27,8	32,5
M10	0,10	21,5	31,5	36,9	30,0	44,0	52,0
	0,14	20,1	29,5	34,5	38,0	55,0	65,0
M12	0,10	31,4	46,1	53,9	52,0	77,0	90,0
	0,14	29,4	43,1	50,5	65,0	96,0	112,0
M14	0,10	43,2	63,4	74,2	83,0	122,0	143,0
	0,14	40,4	59,4	69,5	104,0	153,0	179,0
M16	0,10	60,1	88,3	103,4	131,0	192,0	225,0
	0,14	56,5	82,9	97,0	165,0	242,0	283,0
M18	0,10	75,0	106,0	124,0	186,0	264,0	309,0
	0,14	70,0	100,0	117,0	232,0	331,0	387,0
M20	0,10	97,0	138,0	162,0	264,0	376,0	440,0
	0,14	91,0	130,0	152,0	332,0	473,0	554,0
M22	0,10	122,0	174,0	203,0	363,0	517,0	605,0
	0,14	115,0	163,0	191,0	460,0	655,0	766,0
M24	0,10	140,0	199,0	233,0	454,0	646,0	756,0
	0,14	131,0	187,0	218,0	572,0	814,0	953,0

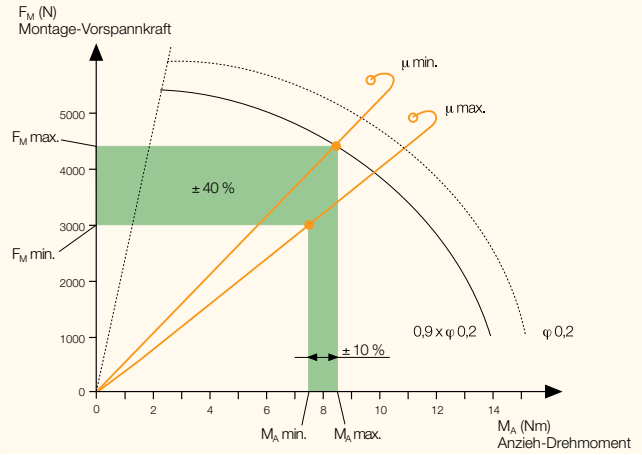
Dehnschrauben mit metrischem Feingewinde

Gewinde	Reibungszahl µges	Max. Vorspannkraft $F_{M\,max}$ [kN]			Max. Anziehdrehmoment $M_{A\,max}$ [Nm]		
		8,8	10,9	12,9	8,8	10,9	12,9
M8x1	0,10	15,0	22,1	25,8	16,6	24,3	28,5
	0,14	14,1	20,7	24,3	20,9	30,7	35,9
M10x1,25	0,10	23,5	34,5	40,4	32,0	47,0	55,0
	0,14	22,1	32,4	37,9	41,0	60,0	70,0
M12x1,25	0,10	36,4	53,4	62,5	58,0	86,0	100,0
	0,14	34,2	50,3	58,8	74,0	109,0	127,0
M12x1,5	0,10	33,8	49,7	58,1	55,0	81,0	95,0
	0,14	31,8	46,6	54,6	70,0	102,0	120,0
M14x1,5	0,10	49,0	72,0	84,2	91,0	134,0	157,0
	0,14	46,1	67,7	79,3	116,0	171,0	200,0
M16x1,5	0,10	66,9	98,3	115,0	141,0	207,0	243,0
	0,14	63,1	92,7	108,5	181,0	265,0	310,0

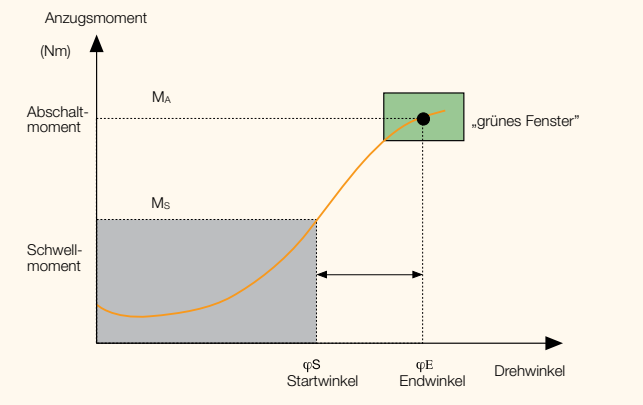
Anzugsverfahren

Drehmomentgesteuertes Anzugsverfahren

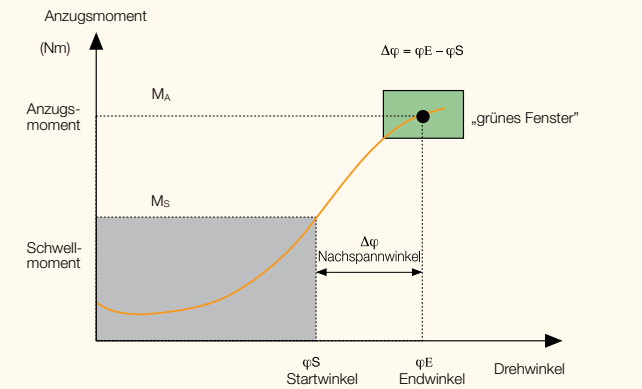
Das Drehmoment ist in der Schraubtechnik nach wie vor die am häufigsten verwendete Steuergröße.
Die aus dem Anzugsmoment resultierende Vorspannkraft wird dabei maßgeblich von den schwankenden Reibbeiwerten sowie der Drehmomentstreuung des Schraubgerätes beeinflusst. Dabei muss man vor allem zwischen der Kopfreibung und der Gewindereibung unterscheiden. Die Summe dieser schwankenden Reibungseinflüsse führt dazu, dass selbst bei hoher Drehmomentwiederholgenauigkeit Schwankungen der resultierenden Vorspannkraft von 50 % und mehr auftreten können.
Dies bedeutet, dass die Schraubverbindung immer so überdimensioniert sein muss, dass sie bei einer Abweichung nach oben nicht überlastet wird und bei einer Abweichung nach unten noch immer die geforderte Vorspannkraft aufbringt. Trotz dieser Nachteile hat sich das drehmomentgesteuerte Anziehen als gängigstes Anzugsverfahren durchgesetzt. Dies liegt an der verhältnismäßig einfachen technischen Realisierungsmöglichkeit.



Reibungseinfluss beim drehmomentgesteuerten Anziehen



Zusätzliche Drehwinkelüberwachung beim drehmomentgesteuerten Anziehen

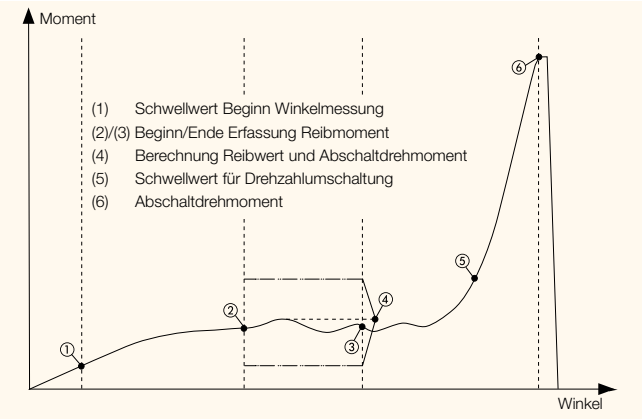


Drehwinkelgesteuertes Anziehen

Drehwinkelgesteuertes Anzugsverfahren

Beim sogenannten Drehwinkelverfahren werden Drehmoment und Drehwinkel der Schraubverbindung als Steuergröße herangezogen. Dabei dient im Endanzug der Drehwinkel und nicht das Drehmoment als Steuergröße. D. h. die Schraube wird bis zu einem Schwellmoment angezogen und von dort aus um einen vorgegebenen Nachspannwinkel weitergedreht. Das Drehmoment kann als zusätzliche Kontrollgröße überwacht werden.

Das drehwinkelgesteuerte Abschalten kann sowohl im elastischen als auch im plastischen Bereich der Schraube eingesetzt werden. Das Drehwinkelgesteuerte Anzugsverfahren ist unabhängig von der Kopfreibung. Die Gesamtvorspannkraftstreuung ist demzufolge geringer als beim rein drehmomentgesteuerten Schraubverfahren.



Reibwertmessung und reibwertabhängige Drehmomentverschraubung

Das Reibwertverfahren wird häufig bei Prüfprozessen angewendet. Hier wird das Ergebnis der Reibwertmessung zur Beurteilung der Qualität von Getrieben, Gewinden oder auch zur Feststellung einer Mindestreibung, z. B. bei selbstsichernden Gewindestiften genutzt.
Abhängig vom Reibmoment ist weiterhin eine Verschraubung auf Differenzmoment oder Drehwinkel möglich.

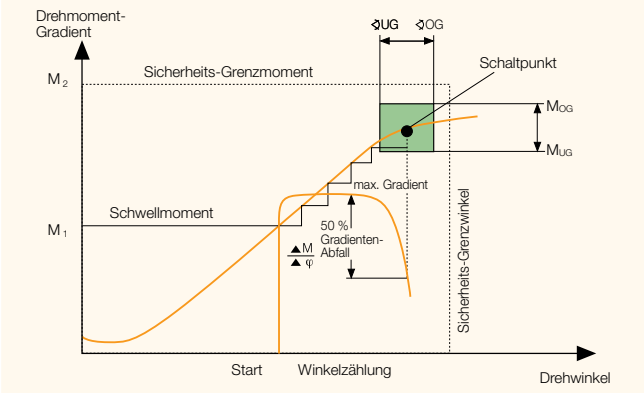
Streckgrenzgesteuertes Anzugsverfahren

Um die Werkstoffeigenschaften der Schraube durch Erreichen des plastischen Verformungsbereichs optimal auszunutzen kann das streckgrenzgesteuerte Anzugsverfahren angewendet werden. Auch hier werden Drehmoment und Drehwinkel als Steuergrößen erfasst. Man macht sich dabei die abfallende Steigung im Spannungs-/Dehnungsdiagramm bei Erreichen der Streckgrenze als Abschaltkriterium zunutze.

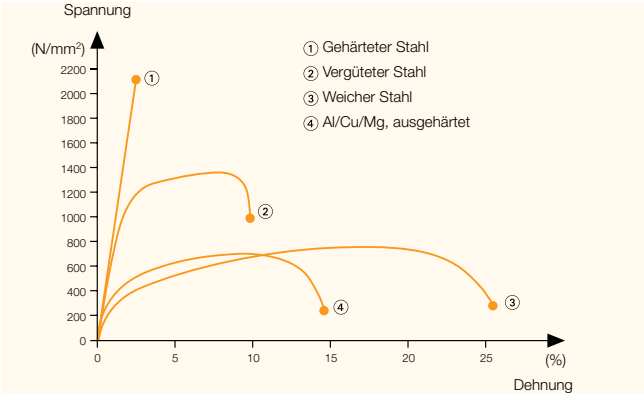
Anzugsverfahren

Betrachtet man das Spannungs-/Dehnungsdiagramm, so zeigt sich, dass der Anstieg zunächst linear erfolgt und sich bei Erreichen der Streckgrenze abflacht. Die Axialkraft verhält sich proportional zum Drehmoment – die Dehnung proportional zum Drehwinkel. Mathematisch wird der Anstieg einer Kurve als die Ableitung der Funktion definiert. Fällt die Ableitung des Drehmomentes nach dem Drehwinkel auf ca. 50 % des Ausgangswertes, ist die Streckgrenze erreicht und der Anziehvorgang wird beendet. Man kann diesem Prozess noch zusätzlich Grenzwinkel und Grenzmomente zur Sicherheit überlagern.

Mit diesem Verfahren können die Nachteile der schwankenden Reibwerte oder der Einschränkung der ausgewählten Schraube vermieden werden. Die eingesetzten Schrauben können durch die größere Sicherheit beim Erreichen der notwendigen Montagevorspannkraft kleiner dimensioniert werden. Die Streckgrenzsteuerung ist nur bei ordentlichen metrischen Stahlverbindungen anwendbar, da nur hier das dargestellte Spannungs-/Dehnungsdiagramm Gültigkeit hat. Bei kleinen oder sehr kleinen Schraubengrößen stellt dieses Verfahren hohe Anforderungen an die Mess- und Regelungstechnik des Schraubsystems.



Streckgrenzengesteuertes Anziehen



Hook'sches Spannungs-/Dehnungsdiagramm

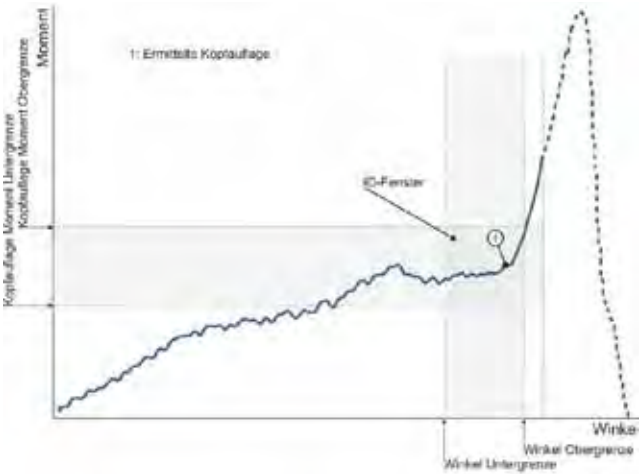
Adaptives Anzugsverfahren DEPRAG Clamp Force Control (CFC)

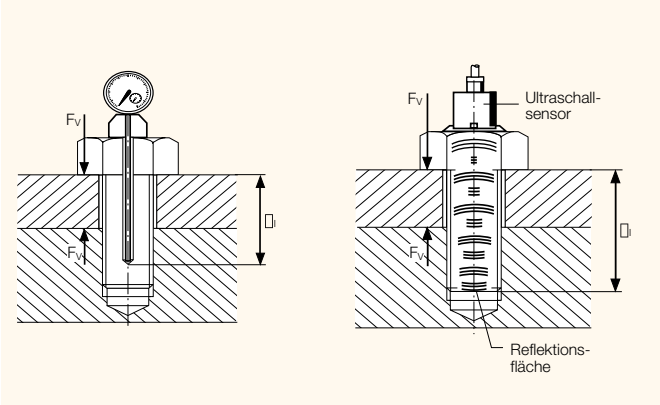
Dieses patentierte, zuverlässige und adaptive Schraubverfahren führt auch bei schwankenden Eindrehmomenten zu einer sehr guten Konstanz der Vorspannkraft. Eine vollständige Verschraubung setzt sich aus dem Schraubmuster Kopfauflageerkennung und einer Verschraubung auf Differenzmoment oder einer Verschraubung auf Drehwinkel zusammen. Den Hauptbestandteil bildet die Kopfauflageerkennung. Dazu wird kontinuierlich auf Basis des Drehmomentverlaufs eine mathematische Bewertungsfunktion gebildet.
Überschreitet die so errechnete Trendlinie einen fest definierten Grenzwert, gilt die Kopfauflage als erkannt und Drehmoment und Drehwinkel zum Zeitpunkt der Kopfauflage werden gespeichert. Das Berechnungsverfahren vereint zwei wesentliche Vorteile. Es ist robust gegenüber zufälligen Schwankungen und Anstiegen im Drehmomentverlauf, welche nicht durch die eigentliche Kopfauflage hervorgerufen werden.
Weiterhin besitzt der Algorithmus Allgemeingültigkeit, so dass vom Anwender keine für die Berechnung relevanten Parameter gesetzt werden müssen. Gesetzt werden müssen die in der Tabelle gelisteten Parameter. Als Abbruchkriterium für die Schraubstufe dient Moment Obergrenze. Das IO-Fenster für die Kopfauflageerkennung wird optional durch Kopfauflage Moment Unter-/Obergrenze und Winkel Unter-/Obergrenze überwacht. Als Endwerte werden wahlweise die Drehmoment- und Winkelwerte zum Zeitpunkt der Kopfauflage oder am Ende des Programmschritts abgelegt. Die Endwerte des Schraubmusters Kopfauflageerkennung stellen die Referenz für den nachfolgenden Programmschritt dar. Anstelle der Verschraubung auf Differenzmoment kann ebenso eine Verschraubung auf Drehwinkel folgen. Zur Anwendung kommt das Schraubverfahren dann, wenn veränderliche Randbedingungen vorliegen, die zu stark variierenden Eindrehmomenten führen. Die Verwendung eines drehmomentgesteuerten Anzugsverfahrens führt dann auch bei höchster Abschaltgenauigkeit zu großen Schwankungen in der resultierenden Vorspannkraft.
Das adaptive Schraubverfahren DEPRAG Clamp Force Control sichert durch die zuverlässige Erkennung der Kopfauflage einen einheitlichen Ausgangszustand für den nachfolgenden Endanzug, was letztlich eine deutlich bessere Konstanz der Vorspannkraft bewirkt. Typische Anwendungsbeispiele sind Direktverschraubungen in Kunststoff oder Metall.
Das Verfahren DEPRAG Clamp Force Control ersetzt nicht die Reibwertmessung bzw. die Reibwertabhängige Verschraubung. Das Schraubmuster Reibwertmessung kommt dann zur Anwendung, wenn die Einhaltung eines vorgegebenen Reibwerts überwacht werden muss.

Die Reibwertabhängige Drehmomentverschraubung führt bei konstanten, aber zwischen verschiedenen Schraubstellen variierenden, Reibmomentverläufen ebenso zu einer guten Konstanz der Vorspannkraft. Zur Entscheidung über das jeweils am besten geeignete Schraubverfahren wird eine Schraubfallanalyse empfohlen.

Parameter	Funktion
Überwachungszeit	Überwachung Zeit Schraubstufe
Drehzahl	Drehzahl Schraubstufe
Kopfauflage Moment Unter-/Obergrenze	Überwachungskriterien Kopfauflageerkennung
Moment Obergrenze	Abbruchkriterium Schraubstufe
Winkel Untergrenze	Überwachungskriterium bezogen auf Kopfauflage, min. 720°
Winkel Obergrenze	Überwachungskriterium bezogen auf Kopfauflage
Endwerterzeugung	Werte bei Kopfauflage / Ende Programmschritt, Basis für Folgeschritt

Tab.: Parameter Schraubmuster Kopfauflageerkennung





Längenmessung

Längenmessung
Grundsätzlich ist der mathematische Zusammenhang zwischen der Dehnung der Schraube und der erzeugten Vorspannkraft wesentlich genauer als zwischen Drehmoment und Vorspannkraft. Eine direkte Dehnungsmessung führt daher zu genauen Vorspannkraftwerten. Dies kann z. B. über die mechanische Messung einer Bohrung in der Schraube erfolgen, die tiefer sein muss als die Einspannlänge der verwendeten Schraube. Diese Methode findet in der Praxis praktisch keine Anwendung, da sie sich lediglich für Spezialfälle mit größeren Schrauben eignet.

Ultraschall-Längenmessung
Eine weitere Methode ist, die Dehnung der Schraube über die Laufzeitmessung einer Ultraschallwelle zu erfassen. Hierzu wird ein Ultraschallimpuls in den Schraubenkopf eingebracht. Der Impuls pflanzt sich durch die Schraube fort, wird am Schaftende an der Grenzfläche Stahl/Luft reflektiert und läuft zum Schraubenkopf zurück.

Der Zeitunterschied zwischen dem 1. und 2. Echo des Impulses wird zur Längenmessung der Schraube verwendet. Diese Messung kann hochfrequent erfolgen, so dass mit mehreren tausend Messungen pro Sekunde eine hohe Auflösung erreicht werden kann.
Als Störgrößen müssen dabei noch die verschiedenen Spannungszustände des Schraubenwerkstoffes sowie die Temperatur der Schraube kompensiert werden. Dieses Verfahren wurde bereits zur Serienreife entwickelt und findet bei ganz sensiblen Sicherheitsschraubverbindungen in der Automobilindustrie erste Anwendungen. Dabei kann jedoch auf die zusätzliche Überwachung von Drehmoment und Drehwinkel noch nicht verzichtet werden.
Auch dieses Verfahren erfordert Spezialschrauben mit aufgedampftem Sensor. Mit jeder verarbeiteten Schraube verbleibt somit ein teures Sensorelement am Bauteil.

Sonderfälle

Fast alle beschriebenen Verfahren haben ihre Gültigkeit nur für metrische Schraubverbindungen in Stahl. In der Praxis gibt es jedoch eine Vielzahl weiterer Schraubverbindungen, insbesondere Blechschrauben, selbstbohrende oder selbstformende Schrauben sowie Schraubverbindungen mit metallischen Schrauben in thermo- oder duroplastische Kunststoffe. Auf einige Besonderheiten im Schraubenanzug soll an dieser Stelle hingewiesen werden.
Grundsätzlich gilt auch hier stets der Zusammenhang zwischen aufgebrachtem Drehmoment, Reibwerten und erzeugter Montagevorspannkraft. Durch die sehr unterschiedlichen Materialkennwerte der Bauteile kann jedoch der Zusammenhang insbesondere bei Kunststoffverschraubungen nicht allein auf die Materialkennwerte der Schraube bezogen werden. Bei selbst bohrenden oder selbst formenden Schrauben treten weitere Störgrößen auf, die sogenannten Eindrehmomente.
Hierbei ist die konstruktiv richtige Auslegung der Schraubverbindung von erheblicher Bedeutung. Beim Eindrehen von gewindeformenden oder gewindeschneidenden Schrauben kommt es stets zu hohen Eindrehmomenten.
Diese Eindrehmomente liegen vielfach sogar im Bereich der späteren Anzugsmomente. Nur wenn die Schraubverbindung derart ausgelegt ist, dass es nach dem Formen des Gewindes, vor Auflage des Schraubenkopfes, zu einem freien Durchlauf kommt, gelten die dargestellten Zusammenhänge des drehmomentgesteuerten Anziehens.
Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Drehmomentabschaltung während der Eindrehphase überbrückt werden muss, um ein vorzeitiges Abschalten des Schraubwerkzeuges zu verhindern. Dies kann in hervorragender Weise, z. B. durch unsere SENSOMAT® Schrauber erreicht werden.
In anderen Fällen, in denen z. B. ein Gewinde in ein Sackloch geformt werden muss, hat man bis zum Erreichen des Endmomentes neben den Reibanteilen immer auch Gewindeformmomente aufzubringen. Aufgrund der starken Schwankungen dieser Eindrehmomente sind die verbleibenden Ungenauigkeiten bei den erreichten Vorspannkräften in jedem Fall deutlich höher als bei den beschriebenen Standardfällen. Insbesondere bei Direktverschraubungen in thermoplastische Kunststoffe kommt der richtigen Drehzahl des Schraubers eine entscheidende Bedeutung zu.

Auswahl des geeigneten Schraubsystems / Anwendungsberatung

DEPRAG bietet ein sehr umfangreiches Spektrum an Schraubwerkzeugen für die unterschiedlichsten Anwendungen. Werkzeuge für die Montage anspruchsvoller Produkte mit hohen Anforderungen an die Prozesssicherheit unterliegen einer anderen Betrachtung als Schlagschrauber, die in einem groben Montageumfeld eingesetzt werden.

Die Auswahl der Schraubwerkzeuge erfolgt nach verschiedensten Kriterien, wie z. B. nach:
- manuellem oder stationären Einsatz
- der Bauform: gerade Ausführung, Pistolenform, Winkelbauform
- dem Abschaltprinzip: mit elektronisch gesteuerten Werkzeugen, mit mechanischer Abschaltkupplung, mit Direktantrieb
- dem Antriebsmedium: pneumatisch oder elektrisch
- der Anforderung an die Prozesssicherheit, Flexibilität, Dokumentation etc.

Für das bessere Verständnis der Eigenschaften der DEPRAG Schraubsysteme sollen die verwendeten Fachbegriffe zunächst näher erläutert werden:

EC-Servo Schrauber (z. B. MINIMAT®-EC-Servo Schrauber):
elektronisch gesteuerter Schrauber mit bürstenlosem Gleichstrommotor und integrierter Sensorik für Drehmoment und Drehwinkel; Stromversorgung kabelgebunden

EC-Schrauber (z. B. MINIMAT®-EC Schrauber):
elektronisch gesteuerter Schrauber mit bürstenlosem Gleichstrommotor, Drehmomentermittlung basiert auf einer hochgenauen Messung des Motorstroms; Stromversorgung kabelgebunden

EC-Akkuschrauber (z. B. MINIMAT®-EC Akkuschrauber):
elektronisch gesteuerter Schrauber mit bürstenlosem Gleichstrommotor, Drehmomentermittlung basiert auf einer hochgenauen Messung des Motorstroms; Stromversorgung mittels Akku

Elektroschrauber mit mechanischer Abschaltkupplung:
Antrieb mit bürstenlosem Gleichstrommotor, Abschaltung über mechanische Abschaltkupplung

Akkuschrauber mit mechanischer Abschaltkupplung:
Antrieb mit bürstenlosem Gleichstrommotor, Abschaltung über mechanische Abschaltkupplung; Stromversorgung mittels Akku

Druckluftschrauber (z. B. MINIMAT® Druckluftschrauber):
Abschaltung erfolgt über eine hochgenaue mechanische Abschaltkupplung

Druckluftschrauber (z. B. SENSOMAT® Druckluftschrauber):
Abschaltung erfolgt über eine hochgenaue mechanische Abschaltkupplung, Kupplung verfügt zusätzlich über eine mechanische Sperre; Verwendung z. B. für Gewinde formende Schrauben

Weiterführende detaillierte Informationen dazu bietet unser „Leitfaden zur Auswahl Schraubtechnik“ auf www.DEPRAG.com.

Eine Abstimmung der Schraubtechnik auf individuelle Kundenanwendungen kann endgültig nur in einer gezielten Analyse anhand der zu verschraubenden Bauteile erstellt werden. Dazu stehen Ihnen jahrzehntelange Erfahrung in der Schraubtechnik, professionell ausgestattete Analyse- und Prüflaboratorien sowie ein DAkkS-akkreditiertes Kalibrierlaboratorium und ein großes Team von Anwendungsspezialisten aus dem Hause DEPRAG zur Verfügung.

Prozesssicherheit

1. Auslegung der Schraubverbindung und Werkzeugauswahl
Eine Schraubaufgabe lässt sich nur dann prozesssicher ausführen, wenn mit hochgenauen Schraubwerkzeugen gearbeitet wird. Die Wahl des richtigen Schraubwerkzeugs für die richtige Anwendung spielt neben der Schulung des Personals und der Verwendung hochwertiger Materialien die Hauptrolle, um die Prozesssicherheit im Montageverfahren zu gewährleisten. Entscheidende Faktoren eines Schraubfalls sind vor allem die gewählten Schrauben und die eingesetzten Werkstoffe. Wichtig dabei: der Schrauber muss optimal zur Anwendung passen. In unserem Schraubfallanalyse-Labor überprüfen wir diese Auslegung, z. B. durch Aufspüren von Reibungsverlusten, durch Erforschung von Setzerscheinungen. Auch bei anwendungsspezifischen Besonderheiten fördert die Schraubfallanalyse die Problematik zu Tage und legt prozesssichere Parameter und Sequenzen fest. Am Ende umfassender Versuchsreihen steht nach genauer Analyse die Empfehlung für den Hersteller, welche Schraubparameter und welches Schraubwerkzeug sich für die vorliegende Schraubaufgabe am besten eignen.

2. Qualifizierung der Schraubwerkzeuge
Zur Qualifizierung der Schraubwerkzeuge dient die Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU). Je nach der Gefährdungssituation ist die Prüfung und Überwachung der Schraubprozesse ein wesentliches Kriterium. Dafür gibt es für den Automobilsektor beispielsweise die VDI Richtlinie 2862, die drei Sicherheitskategorien und die dafür vorzusehenden Maßnahmen beschreibt.

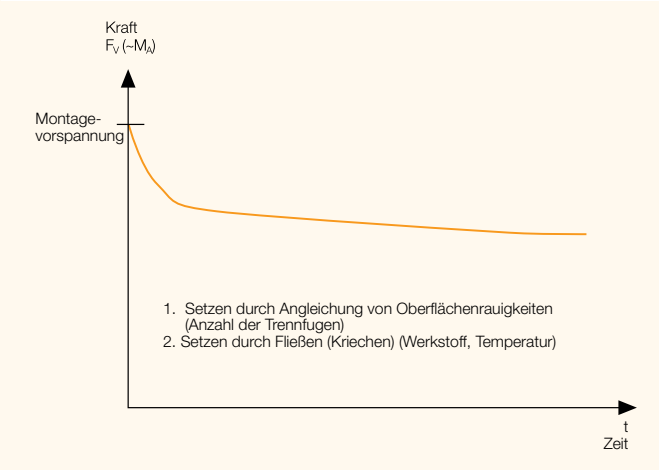
3. Prüfung und Überwachung im Montageprozess
Weiterhin ist es für die Einhaltung der Prozesssicherheit erforderlich, die Schraubwerkzeuge in geeigneten zeitlichen Abständen oder nach einer vorbestimmten Anzahl von Schraubzyklen zu überprüfen. Dabei muss ihre Funktionsfähigkeit geprüft und sichergestellt werden, bevor sie wieder in Betrieb genommen werden. Wird dabei eine Wartung oder Reparatur erforderlich, muss erneut eine Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU) vorgenommen werden. Zur Beurteilung des Schraubprozesses bezüglich Fähigkeit und Stabilität dient die Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU). Dazu werden bspw. die Drehmomentverläufe beim Schraubprozess mit einem Vorsatzaufnehmer erfasst und ausgewertet (Cpk-Wert). Dabei festgestellte Abweichungstrends müssen durch Prozesskorrekturen ausgeglichen werden, um den Schraubprozess "in der Spur" zu halten. Problematisch sind dabei vor allem die häufig unbekannten Setzerscheinungen der Verbindung und die montagebedingten Schwankungen der Vorspannkraft.

4. Setzerscheinungen
Grundsätzlich behandeln alle beschriebenen Anzugsverfahren (Seiten 6-8) zunächst nur das im Augenblick des Schraubenanzugs aufgebrachte Drehmoment bzw. die erzeugte Vorspannkraft.
Tatsächlich führt jedoch, wie bereits im Verspannungsschaubild D (unter Grundlagen Schraubtechnik – Seite 3) dargestellt, ein Setzvorgang in der Schraubverbindung in praktisch allen Fällen zu einer Verminderung der verbleibenden Momente bzw. Vorspannkräfte.

Setzerscheinungen treten u. a. beim Verschrauben von weichen Werkstoffen auf, wie z. B. bei Verschraubungen von Kunststoff oder wenn zwischen den zu verschraubenden Teilen Dichtelemente eingebracht sind.

Ein Beispiel:
Eine Silikondichtung wird zwischen Pumpengehäuse und Deckel mittels vier Schrauben montiert. Selbst wenn das Anzugsdrehmoment eine hundertprozentige Vorspannkraft erwarten lässt, geht diese durch das „Setzen“ des Silikons nach und nach verloren. Die Folge: die Pumpe wird undicht.

Diese Situation führt sehr häufig zu Problemen bei der Qualitätsüberwachung von Schraubanlagen. Nur in seltenen Fällen sind Setzerscheinungen exakt vorausberechenbar. Fast immer müssen sie mit aufwändigen Versuchen an Originalbauteilen ermittelt werden. Die DEPRAG unterstützt Sie dabei mit umfassenden Schraubfallanalysen. Ergebnis dieser Schraubfallanalyse ist eine Aussage über das geeignete Anzugsmoment und das ideale Anzugsverfahren. Setzerscheinungen werden selbstverständlich dabei mit berücksichtigt.



Setzerscheinungen

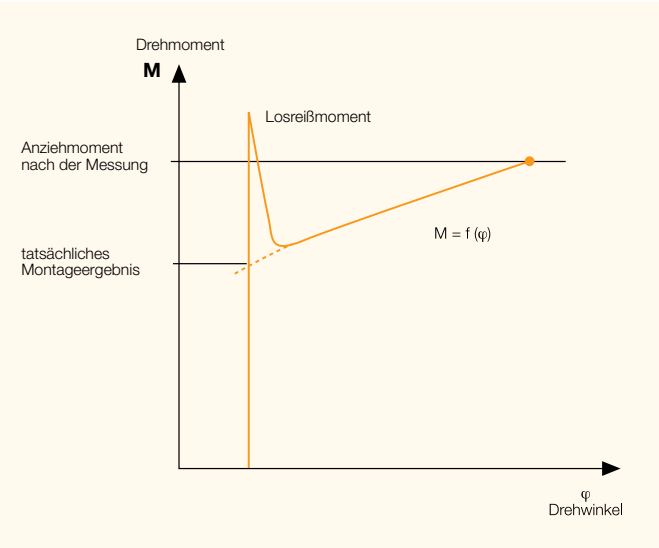
Bei einer derartigen „weichen Verbindung“ zieht der Techniker im Testlabor die Schraube zunächst bis zum ermittelten Anziehdrehmoment an und nach einer gewissen Zeit erneut nach. Das „Weiterdrehmoment“ gibt Aufschluss über Setzerscheinungen und ihre Auswirkung auf die Vorspannkraft.

Bei einer Vielzahl von Schraubverbindungen hat sich gezeigt, dass der größte Teil des Setzvorganges bereits in den allerersten Millisekunden nach dem Anzug stattfindet.

Dies bedeutet, dass man in einigen Problemfällen bereits mit einer niedrigeren Schrauberdrehzahl eine Verbesserung erreichen kann, da der Anzugsvorgang in die Länge gezogen wird und bereits ein Großteil der Setzerscheinungen während des Anziehens stattgefunden hat. Reicht diese Maßnahme nicht aus, gibt es die Möglichkeit, den Anzug mehrstufig durchzuführen. Dies kann z. B. durch ein Anziehen auf 80 % des Endmomentes, einer nachfolgenden Wartezeit und darauf folgendem Endanzug geschehen.
Es sind hier praktisch beliebige Kombinationen von Voranzug, Wartezeit, Lösen der Verbindung, erneutem Anzug denkbar.

5. Nachziehen einer Schraubverbindung
Sollen exakte Garantien abgegeben werden, muss auch das entsprechende Messverfahren genau definiert sein. Die Überprüfung von Setzerscheinungen lässt sich praktisch nur durch ein Nachziehen der Verbindung realisieren. Auch hier muss, um zu verwertbaren Aussagen zu kommen, eine exakte und immer wieder gleiche Messmethode angewandt werden.
Dazu muss z. B. der Zeitpunkt der Nachmessung und die Messtechnik festgelegt sein. Grundsätzlich lassen sich exakte Messungen beim Nachziehen von Schraubverbindungen nur mit einer geeigneten Elektronik, z. B. unserer ME5500/ME6000 in Verbindung mit einem Messschlüssel, durchführen. Mechanische Schleppzeiger sind dafür ungeeignet, weil sie viel zu ungenau sind.

Beim Nachziehen der Verbindung muss der gesamte Drehmomentverlauf aufgezeichnet werden. Erst nach einer Auswertung des vorliegenden Verlaufes kann auf das ursprüngliche Montagemoment zurückgeschlossen werden. In der Regel kommt es durch die ruhende Verbindung zu höheren Haftreibungskoeffizienten, die Sie mit einem mechanischen Schleppzeiger-Instrument messen würden.



Nachziehen einer Schraubverbindung

Danach kann es durch ein Rückfedern der Verbindung oder dem sogenannten Stick-Slip-Effekt zu einem Abfall des Momentes kommen und erst durch den weiteren linearen Anstieg kann man auf das ursprüngliche Montagemoment zurückschließen. Bei allen messtechnischen Problemen ist dies noch immer eine sehr effektive Methode zur Qualitätsendkontrolle. Es ist wichtig, sich mit diesem Verfahren vertraut zu machen, da es auch an anderer Stelle, z. B. beim exakten Einstellen von Impulsschraubern, benötigt wird.

Noch einmal: Mechanische Schleppzeiger-Instrumente können immer nur der ersten Abschätzung dienen und eine exakte Messung nicht ersetzen.

Statistik

Statistische Grundlagen
Die Einhaltung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität erfordert den Einsatz genauester Fertigungsmittel sowie geeigneter Kontrollmechanismen. Durch neue, strenger gefasste Bestimmungen zur Produkthaftung werden dabei die Anforderungen an die Dokumentation der Fertigungsqualität auch weiterhin steigen. Insbesondere die Automobilindustrie hat hierbei eine Vorreiterrolle übernommen und zwingt Zulieferer zu ähnlichen Maßnahmen. Dies gilt in besonderem Maße auch für das automatische Verschrauben.
Neben der Auswahl geeigneter Messgrößen (Anzugsmoment, Drehwinkel, Schraubtiefe, Furchmoment, etc.) geht es dabei vor allem um die statistische Beurteilung der erzielten Ergebnisse.
Es existieren eine Reihe verschiedener mathematischer Verteilungsmodelle. Die Verschraubungen lassen sich am einfachsten durch die Normalverteilung nach Gauß darstellen, die als bekannteste Verteilung auch den Vorteil relativ einfacher mathematischer Zusammenhänge bietet.

Mittelwert:
Der Mittelwert einer Messreihe kann als arithmetisches oder geometrisches Mittel bestimmt werden. In diesem Zusammenhang ist immer das arithmetische Mittel $\bar{x}$ nach folgender Formel zu berechnen:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i$$

Der Mittelwert der Messreihe ist der Wert, der dem wahren Wert mit der größten Wahrscheinlichkeit am nächsten liegt. Diese Aussage gilt nur unter der Einschränkung einer hinreichend großen Zahl von Messwerten. Im praktischen Gebrauch hat sich die Zahl von 10 Messwerten als die mindestens notwendige herausgestellt.

Messreihe:
Die Messreihe bezeichnet eine Reihe von Messwerten, die unter den gleichen Bedingungen ermittelt wurden. Für die Gewinnung statistischer Aussagen liegt die Mindestgröße der Messreihe bei zehn Werten, wobei 50 Messwerte aussagekräftiger sind.

Standardabweichung:
Die Standardabweichung der Messreihe bezeichnet die mittlere Differenz einzelner Messwerte bezogen auf den errechneten Mittelwert. Die Standardabweichung s wird nach folgender Formel berechnet:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

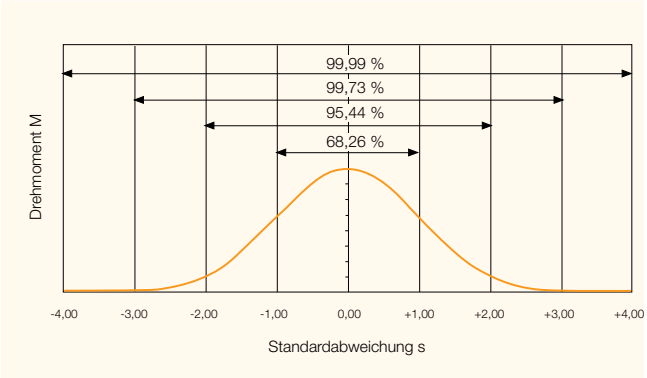
Der Wertebereich der Standardabweichung wird immer als ± Intervall verstanden.
Üblicherweise wird die Genauigkeit eines Werkzeuges mit der relativen Standardabweichung angegeben.
Sie ist auch für die Ableitung weiterer statistischer Größen von zentraler Bedeutung.

Bedeutung der Kenndaten der Normalverteilung:
Werden mit einer Messreihe ausschließlich die zufälligen Fehler erfasst, wird sich die Verteilung der Ergebnisse nach der Gauß'schen Normalverteilung einstellen. Nach dieser Verteilungskurve kann aufgrund der mathematischen Zusammenhänge folgende Aussage getroffen werden:

68,26 % aller Messwerte werden in einem Bereich von ± 1 s liegen
95,44 % aller Messwerte werden in einem Bereich von ± 2 s liegen
99,73 % aller Messwerte werden in einem Bereich von ± 3 s liegen
99,99 % aller Messwerte werden in einem Bereich von ± 4 s liegen

All diese Aussagen können immer nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit angeben, niemals jedoch eine absolute Angabe sein.

An dieser Stelle soll die Aussage, dass Drehmomente mit einer Genauigkeit von < ± 3 % Standardabweichung eingehalten werden können, präzisiert werden.
Die Angabe der 3 % ist als prozentuale Angabe der Standardabweichung durch Bezug auf den zugehörigen Mittelwert errechnet.
Praktische Versuche zeigen, dass dieser Wert in vielen Fällen bei DEPRAG Schraubwerkzeugen weit unterschritten wird.



Gauß'sche Normalverteilung

Fähigkeitsuntersuchungen

Durch die Entwicklung der Qualitätssicherungsmaßnahmen hin zur präventiven Qualitätssicherung kommt dem Begriff der Fähigkeitsuntersuchung eine hohe Bedeutung zu. Diese statistischen Methoden haben das Ziel, den Fertigungsprozess während der Fertigung zu überwachen. Als eine wichtige Voraussetzung wird jedoch eine Untersuchung betrachtet, die eine Aussage darüber gibt, ob die eingesetzte Fertigungsmaschine überhaupt geeignet ist, dem Fertigungsprozess gerecht zu werden. Diese Untersuchung ist unter den Begriffen Maschinenfähigkeit oder auch Kurzzeitfähigkeit bekannt. Sie beschreibt anhand von Indizes (Cm und Cmk), ob das interessierende Qualitätsmerkmal innerhalb vorgegebener Grenzen eingehalten werden kann.

Bei Verschraubungen handelt es sich um das Drehmoment als die entscheidende Größe. Um eine Aussage über das Verhalten machen zu können, ist es erforderlich, die verschiedenen Einflussgrößen auf den Verschraubungsprozess während der Untersuchung konstant zu halten. Somit wurde ein reproduzierbarer Messaufbau definiert, der für alle Maschinenfähigkeitsuntersuchungen der Schrauber gültig ist. Da lediglich der Einfluss der Maschine mit all ihren Komponenten auf den Fertigungsprozess untersucht werden soll, ist diese Untersuchung anhand von 50 ohne Unterbrechung aufgenommenen Messwerten unter optimalen Bedingungen durchzuführen.

Die Berechnung der Maschinenfähigkeitsindizes erfolgt nach folgenden Formeln:

$$C_m = \frac{OGW - UGW}{6 \cdot s}$$

$$C_{mk} = MIN\left(\frac{OGW - \bar{x}}{3 \cdot s} ; \frac{\bar{x} - UGW}{3 \cdot s}\right)$$

C_m: Maschinenfähigkeitsindex
C_{mk}: Maschinenfähigkeitsindex
OGW: oberer Grenzwert
UGW: unterer Grenzwert
x: Mittelwert der Messreihe
s: Standardabweichung der Messreihe
T: Toleranz

C_{mk}	$\bar{x}$ - UGW und OGW - $\bar{x}$	Innerhalb der Toleranz	Fehleranteil
0,33	1 s	68,26 %	> 30 %
0,67	2 s	95,44 %	5 %
1	3 s	99,73 %	0,3 %
1,33	4 s	99,994 %	60 ppm
1,63	4,891 s	99,9999 %	1 ppm
1,67	5 s	99,99994 %	0,6 ppm
2	6 s	100 %	$2 \cdot 10^{-9}$

Zusammenhang verschiedener statistischer Kennwerte

Zielsetzung ist, für Cmk einen Wert von 1,67 und höher zu erreichen, da dieser Wert von den meisten Kunden inzwischen gefordert wird. Wie aus den Berechnungsformeln für Cmk zu erkennen ist, besteht eine Abhängigkeit zwischen den geforderten Toleranzwerten (oberer und unterer Grenzwert), der Standardabweichung s und dem Maschinenfähigkeitsindex Cmk. Die Tabelle zeigt, welche Werte sich bei einer idealen symmetrischen Verteilung in Abhängigkeit der Standardabweichung ergeben und zeigt den theoretischen Fehleranteil.

Wie sind diese Werte nun zu interpretieren?
Der Wert von Cmk ist gemäß Tabelle ein Wahrscheinlichkeitsmaß für die Anzahl der Fehlverschraubungen, die außerhalb der geforderten Toleranz liegen. So ist bei einem Cmk-Wert von 1,63 mit einer fehlerhaften Verschraubung unter einer Million Verschraubungen insgesamt zu rechnen. Des Weiteren ist aus der Tabelle ersichtlich, welche Toleranz für einen Schrauber mit maximal s = 3 % Standardabweichung erforderlich ist, um einen Cmk-Wert von 1,67 zu erreichen.

Es ist eine Toleranz von 5 s, d. h. 5 · 3 % = 15 % vorzugeben. Somit ist die Standardabweichung eines Schraubers das wichtigste Qualitätsmerkmal bezüglich einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung.
Diese Maschinenfähigkeitsuntersuchungen werden in einem übersichtlichen Protokoll mit Angabe der Fähigkeitsindizes, einem Histogramm und einem Messwertverlauf dargestellt.

Zur Bewertung und Spezifizierung der Leistungsfähigkeit von Schraubwerkzeugen und um Schrauber unter korrelierten technischen Spezifikationen anbieten zu können, unterziehen wir neue Schraubertypen einem Laborleistungsprüfverfahren nach VDI/VDE 2647. Diese Richtlinie beschreibt in Anlehnung an die ISO 5393 ein Prüfverfahren, das von deutschen Automobilherstellern auch für die Homologationsprüfungen verwendet wird. Bei diesem Verfahren werden die Prüfbedingungen in engen Grenzen vorgegeben, wie zum Beispiel „harte und weiche" Schraubfälle definiert, die bei definierten Drehmomentstufen, Temperaturen, Nenneingangsbedingungen oder vorgegebenem Eingangsluftdruck bei Druckluftschraubern etc. mehrere hundert Mal durchlaufen werden müssen.

Jeder einzelne Prüfzyklus wird dokumentiert und am Ende der Prüfung in der Gesamtauswertung berücksichtigt. Die Prüfungsvorrichtung muss dafür besondere Qualifikationen haben. Als Messkette darf sie maximal eine Messunsicherheit der Klasse 1 nach DIN 51309 aufweisen. Die Messmittelfähigkeit des Prüfmittels muss mit einer nach Klasse 0,2 (nach DIN 51309) kalibrierten Referenzmesskette einmal jährlich statisch gegengemessen werden.

Maschinenfähigkeitsuntersuchungen

Montageaufgabe Beispiel: Anzugsdrehmoment = 5 Nm +/-10 %
C_{mk} >= 1,67

Zunächst wird angenommen, dass der Mittelwert der Messreihe genau dem geforderten Anzugsdrehmoment entspricht, d. h. zur Bestimmung der max. zulässigen Standardabweichung wird anstatt mit Cmk = 1,67 mit Cm = 1,67 gerechnet.

C_m = (OGW-UGW) / 6 s
C_m = T / 6 s
s = T / 6 C_m
s = 1,0 Nm / 6 * 1,67

s = 0,1 Nm oder in Prozent: s = 2 %

Für diese Montageaufgabe sind nur Werkzeuge geeignet, deren Standardabweichung kleiner oder gleich 2 % sind.

In der Praxis weist der Mittelwert meist einen kleinen Versatz zum geforderten Anzugsdrehmoment auf. Im Beispiel soll nun angenommen werden, dass sich bei einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung mit dem ausgewählten Schraubwerkzeug ein Mittelwert von 5,1 Nm bei einer Standardabweichung von 0,07 Nm (= 1,4 %) ergeben hat. Da der Mittelwert näher am OGW liegt, wird mit folgender Formel gerechnet:

C_{mk} = (OGW – Mittelwert) / 3 * s
C_{mk} = (5,5 Nm – 5,1 Nm) / (3 * 0,07 Nm)
C_{mk} = 1,9

Das Schraubwerkzeug ist für die Montageaufgabe geeignet.

Hätte das Schraubwerkzeug in der o.g. MFU eine Standardabweichung von 0,1 Nm (= 2 %) [anstatt von 0,07 Nm], ergäbe sich ein C_{mk} = 1,33 und das Schraubwerkzeug wäre für diese Montageaufgabe ungeeignet.

Genauigkeit in der Schraubtechnik

Vielfach wird in der Praxis eine intensive Diskussion über geforderte, notwendige und erreichbare Genauigkeiten im Montageprozess geführt. Es soll daher versucht werden, einige Begriffe zu präzisieren:

Was bedeutet Genauigkeit?
Zunächst muss zwischen dem umgangssprachlichen Begriff der Genauigkeit im Sinne einer quantifizierbaren Exaktheit und der Definition nach DIN 55350 unterschieden werden. Letztere definiert die Genauigkeit als "Qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der Annäherung von Ermittlungsergebnissen an den Bezugswert (...)", d. h. als eine nicht zu quantifizierende Größe. In der praktischen Diskussion dagegen bezieht sich der Begriff der Genauigkeit immer auf eine bestimmte Prozessgröße, beim Verschrauben in der Regel das Drehmoment. Es können aber genauso andere Werte wie der Drehwinkel, Wege oder Zeiten, aber auch der gesamte Prozess gemeint sein.
Werden konkrete Zahlenwerte genannt, ist es sinnvoll immer die relative Standardabweichung einer Messreihe anzugeben. Die Angabe des Zahlenwertes entspricht dem messtechnischen Begriff der "Unsicherheit".
Ein Beispiel: Ein Drehmomentabschaltwert 9 Nm mit einer Genauigkeit (Unsicherheit) von 3 % bedeutet, dass das Werkzeug einer Messreihe unterzogen wurde mit einem Mittelwert von 9 Nm und einer Standardabweichung von ± 3 % bezogen auf den Mittelwert als Ergebnis. Dabei sind nach den einschlägigen DIN-Normen nur Messwerte heranzuziehen, die unter einwandfreien Versuchsbedingungen erzielt wurden.

Wiederholgenauigkeit:
Der umgangssprachliche Begriff der Wiederholgenauigkeit ist in DIN 55350 definiert als Präzision: Die „qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung von einander unabhängiger Ermittlungsergebnisse bei mehrfacher Anwendung eines festgelegten Ermittlungsverfahrens unter vorgegebenen Bedingungen“.
Grundsätzlich ist die Angabe von Genauigkeiten nach obiger Darstellung immer eine Wiederholgenauigkeit, da ein ermittelter Mittelwert (Einstellwert) mit einer Genauigkeit (Unsicherheit) von 3 % Standardabweichung aus einer Reihe von einander unabhängiger Messwerte ermittelt wird. In der Praxis wird die nachgewiesene Wiederholgenauigkeit von verschiedenen Parametern beeinflusst. Je nach den Verschleiß- und Reibverhältnissen und Setzerscheinungen in der mechanischen Abschaltkupplung eines Schraubwerkzeuges kann es vorkommen, dass die Abschaltung in geringem Umfang beeinflusst wird. Daher ist eine zyklische Überprüfung der erreichten Drehmomentwerte sinnvoll.

Kinetische Energie:
Die kinetische Energie bei der Verschraubung hängt in erster Linie von der Drehzahl des verwendeten Schraubers ab.
Ein langsamerer Schrauber mit mechanischer Abschaltkupplung bewirkt, dass die in der Kupplung ausgelösten Bewegungsvorgänge ebenfalls langsamer ablaufen und somit die dynamischen Einflüsse geringer werden. Nach unserer Erfahrung zeigen langsame Schrauber eine geringere Standardabweichung als schnelle Schrauber auf.
Bei elektronisch gesteuerten Schraubsystemen werden die Einflüsse der Massenträgheit dadurch reduziert, dass im Endanzug die Drehzahl verringert wird.

Messtechnik:
Die verwendete Messtechnik muss geeignet sein für den dynamischen Vorgang der Verschraubung, d. h. sie muss die erforderliche Steifigkeit gegenüber Schwingungen aufweisen, sie muss die geeigneten Filter beinhalten und durch geeignete Algorithmen den richtigen Messwert ausgeben. Darüber hinaus ist die Drift der Messelektronik zu berücksichtigen.
Besonderes Augenmerk ist auf die Abtastrate der Geräte zu legen, da hochdynamische Schraubvorgänge Messfrequenzen von >10.000 Hz erfordern.
Viele Geräte liegen jedoch deutlich unter diesen Werten!
Durch zu niedrige Abtastraten entstehen in der Praxis Abweichungen von 10 % und mehr.

Absolutgenauigkeit:
Unabhängig von der Wiederholgenauigkeit ist auch die Absolutgenauigkeit eines Werkzeuges bzw. Messsystems von Bedeutung. Streng genommen kann nur für Messsysteme eine Absolutgenauigkeit angegeben werden, wenn sie auf Nationale Normale rückführbar sind. Lediglich über die Schraubfallhärte wird der Absolutwert von Schraubwerkzeugen beeinflusst. Hier kommt es durch den oben beschriebenen Einfluss der kinetischen Energie zu unterschiedlichen Absolutwerten bei gleicher Einstellung des Schraubers.
Je nach Bauart der Kupplung und der Anordnung der Schraubstation (bewegte Massen nach der Kupplung) und der Steigung der Momentenkurve kommt es zu mehr oder weniger großen Veränderungen beim Absolutwert des Schraubers, da die Drehzahl beim Abschaltvorgang verändert wird. Die spezielle Bauart unserer NANOMAT®-, MICROMAT®- und MINIMAT®-Kupplungen eliminiert jedoch alle Einflüsse des Schraubers selbst, so dass es in der Praxis nur zu geringen Veränderungen kommt.
Auch beim direkten Vergleich zwischen zwei Messsystemen wird

Genauigkeit in der Schraubtechnik

es in der Praxis immer zu Abweichungen kommen. Insbesondere bei sehr hochfrequenten Messzyklen, wie der Verschraubung bei hartem Schraubfall und hohen Drehzahlen, spielen beim erzielten absoluten Messergebnis unterschiedliche Messfilter, elektronische und mechanische Dämpfungsglieder eine Rolle. Eine grobe Orientierung über Absolutgenauigkeiten gibt die Rückführbescheinigung einzelner Messsysteme. In der Praxis sind jedoch die genauen Versuchsbedingungen, unter denen diese Kalibrierung erfolgt, nicht ausreichend genau genormt. Häufig wird nur statisch kalibriert [DIN 51309] und bescheinigt, die Einflüsse der hochdynamischen Schraubvorgänge bleiben unberücksichtigt.
Im Hinblick auf die Absolutgenauigkeit gibt die Messunsicherheit auf dem Kalibrierschein an, in welchem Toleranzfeld sich Messwerte bewegen können.

Welche Drehmomentwerte werden bestimmt?
Von größerer Bedeutung ist der Einfluss der Anordnung der verschiedenen Messaufnehmer auf die Absolutwerte eines Schraubers. Dabei ist zunächst zu beachten, welche Momente tatsächlich gemessen und verglichen werden.

Am Schrauber eingebaute Aufnehmer können immer nur das vom Schrauber abgegebene Drehmoment messen. Ob dieses Moment schließlich in Vorspannkraft oder Reibung oder Furchmoment umgesetzt wurde, kann die Sensorik nicht unterscheiden.

Klarheit kann hier nur eine Nachmessung an der Schraubverbindung bringen. Eine exakte Nachmessung ist jedoch nur mit einer Messelektronik möglich, die genauen Aufschluss über den Übergang von Haft- in Gleitreibung beim Nachziehen der Verbindung gibt. Das Lösemoment gibt niemals eine zuverlässige Aussage über erreichte Vorspannkräfte. Auch beim Nachziehen wird der tatsächlich aufgebrachte Wert noch einmal verändert, was letztlich die erreichte Genauigkeit weiter verschlechtert.

Bei Vergleichsmessungen wird es praktisch immer Abweichungen geben. Hauptursache sind hier Reibung und Setzerscheinungen in der Schraubverbindung. Weiterhin hat man immer unterschiedliche dynamische Einflüsse beim Nachmessen zum Originalanzug zu berücksichtigen.

Messprinzipien

Für die Erfassung von Drehmomenten stehen verschiedene physikalische Prinzipien zur Verfügung: Torsionselemente mit Dehnmessstreifen, Wirbelstromaufnehmer, Feder- oder Hydraulikelemente, piezoelektrische Kristalle.

Wesentliches Qualitätsmerkmal für die verschiedenen Technologien ist dabei eine notwendige hohe Eigenfrequenz zur Erfassung hochdynamischer Signale, eine ausreichende mechanische Steifigkeit, hohe Linearität und eine allgemeine Unempfindlichkeit gegen Störgrößen und Verschleiß.

Je nach Anwendung bieten wir Drehmomentaufnehmer mit zwei unterschiedlichen physikalischen Prinzipien:
DMS Aufnehmer (Dehnmessstreifen-Technik)
PE Aufnehmer (piezoelektrisches Messverfahren)

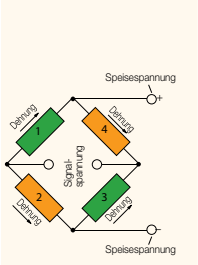
In Verbindung mit der speziell abgestimmten Auswerteelektronik eignen sich alle Drehmomentaufnehmer hervorragend für die verschiedenen Anwendungen in der Schraubtechnik.
Der Hauptvorteil der DMS-Aufnehmer liegt in der kostengünstigeren Herstellung, während sich die bekannten piezoelektrischen Aufnehmer besonders durch den großen Messbereich und die sehr robuste messtechnische Ausführung auszeichnen.

Die Drehmomentaufnehmer sind als stationäre Messplattformen sowie als mobile Messschlüssel in gerader bzw. in Winkelbauform erhältlich. Die Aufnehmer sind zum Anschluss an die entsprechende Messelektronik vorgesehen.

Die Messschlüssel ermöglichen darüber hinaus das Prüfen von Einbauschraubern ohne Ausbau aus der Schraubstation. Durch die angebrachten Spannflächen am Messkopf können die Messschlüssel z. B. in einem Schraubstock eingespannt werden.
Zusammen mit der entsprechenden Elektronik können sie selbstverständlich auch für die Prüfung an der bereits montierten Verbindung durch Nachziehen (oder Lösen) eingesetzt werden. Sie verbinden damit die Anwendungsvielfalt konventioneller Drehmomentschlüssel mit der Präzision und den Möglichkeiten modernster elektronischer Messtechnik.

Messprinzipien

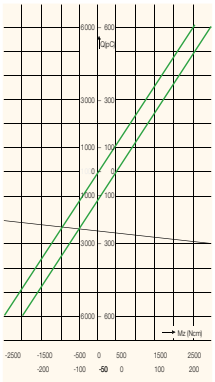
DMS-Technik zur Erfassung des Drehmoments



Vollbrücke, 4 aktive DMS

charakteristische Bauform eines DMS

Funktionsprinzip unserer Dehnmessstreifen Aufnehmer



Linearitätsdiagramm

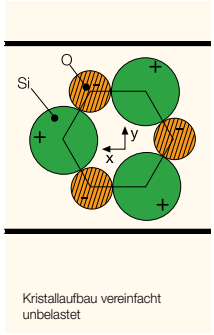
Die Dehnmessstreifen (DMS) beruhen auf dem Prinzip, dass sich ein Bauteil durch mechanische Belastung verformt. Diese Verformung wird auf einen mäanderförmig verlegten Draht (= DMS) weitergegeben. Durch die Dehnung des Drahtes entsteht ein unterschiedlicher elektrischer Widerstand, der somit ein Maß für die mechanische Verformung des Bauteils darstellt.

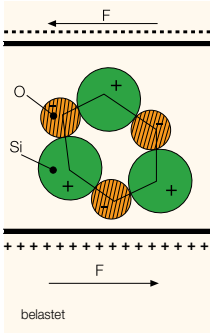
Dieses Verfahren wird sehr häufig für die Ermittlung von Zug- und Druckbeanspruchungen verwendet und erscheint einfach in der Anwendung.

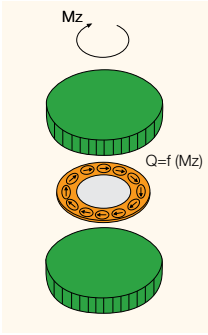
Zur Drehmomentermittlung werden die Dehnmessstreifen im Allgemeinen in 45°-Richtung zur Torsionsachse aufgebracht und über mehrere Streifen der elektrische Widerstand ermittelt.

Der nutzbare lineare Bereich zwischen dem Drehmoment und der Widerstandsänderung ist nicht so groß, wie beispielsweise beim piezoelektrischen Aufnehmer. Die DMS-Drehmomentaufnehmer sind auf die jeweiligen Drehmomentbereiche unseres Schraubersortiments abgestimmt. Durch die große Verbreitung und vielen Standardkomponenten können relativ günstige Lösungen erreicht werden.

Piezoelektrisches Messverfahren zur Drehmomentmessung







Funktionsprinzip unserer piezoelektrischen Aufnehmer

Beim piezoelektrischen Messverfahren werden Siliziumquarzkristalle elastisch verformt, so dass an definierten Außenflächen eine elektrische Ladung auftritt. Diese Ladung ist proportional der aufgebrachten Kraft.

Drehmomente lassen sich mit dem dargestellten Ringelement messen. Die einzelnen Quarzscheiben sind auf dem Umfang so angeordnet, dass auftretende tangentiale Schubkräfte gemessen werden können.
Der Aufnehmer steht unter hoher Vorspannung um die auftretenden Momente durch Reibschluss als Schubkraft auf die Quarzelemente zu übertragen.

Die Einzelelemente sind parallel geschaltet, so dass die auftretende Ladung proportional zu dem übertragenen Moment ist. Da der Isolationswiderstand von Ladungsverstärker und Messgerät nur endlich groß ist, fließt die entstandene Ladung langsam ab. Piezoelektrische Aufnehmer sind daher für statische Messungen nur bedingt geeignet.

Für den Einsatz in der Schraubtechnik sind sie aufgrund

- der sehr hohen Dynamik
- der ausgezeichneten Linearität über einen weiten Messbereich
- der sehr kleinen Baugröße
- fehlender Verschleißteile
- höchster Steifigkeit
- und hervorragender messtechnischer Eigenschaften

sehr gut geeignet.

Insbesondere sehr hohe Abtastraten (10 kHz) ermöglichen das Erfassen harter Schraubfälle im Endanzug.
Besonders in stationären Messplattformen ist der Einsatz piezoelektrischer Drehmomentmesszellen wegen des großen nutzbaren Drehmomentbereichs interessant.

Kalibrieren von Messmitteln

Grundlagen und Begriffe

Eine zentrale Forderung der Qualitätssicherung ist die Rückführbarkeit der verwendeten Messsysteme auf Nationale Normale. Diese Forderung basiert im Allgemeinen auf den Vorgaben der DIN EN ISO 9000. Die Rückführbarkeit ist gegeben, wenn ein Messmittel oder eine Messeinrichtung mit einer Referenz kalibriert wurde, deren Kalibrierung wiederum in einer ununterbrochenen Kette bis hin zum Nationalen Normal nachgewiesen werden kann.

Begriffsdefinitionen:

Prüfen
Feststellen, ob eine Forderung erfüllt ist.
Beispiel: Ein Druckluftabschaltschrauber wird auf Drehmoment gegen einen Drehmomentaufnehmer geprüft. Wird eine Abweichung von der zulässigen Toleranz festgestellt, muss der Schrauber nachjustiert werden.

Justieren
Eingriff in das Messinstrument zur Beseitigung einer systematischen Messabweichung.

Eichen
Prüfen einer Messeinrichtung auf Übereinstimmung mit dem Eichgesetz mit dem Ziel des Verbraucherschutzes. Dies umfasst die Überprüfung, ob die Beträge der Messabweichung des jeweiligen Gerätes die zulässigen Fehlergrenzen nicht überschreitet. Anschließend erfolgt eine Kennzeichnung des Messgerätes durch das Eichamt oder dessen Beauftragte. Im Eichgesetz ist festgelegt, welche Messgeräte geeicht werden müssen.

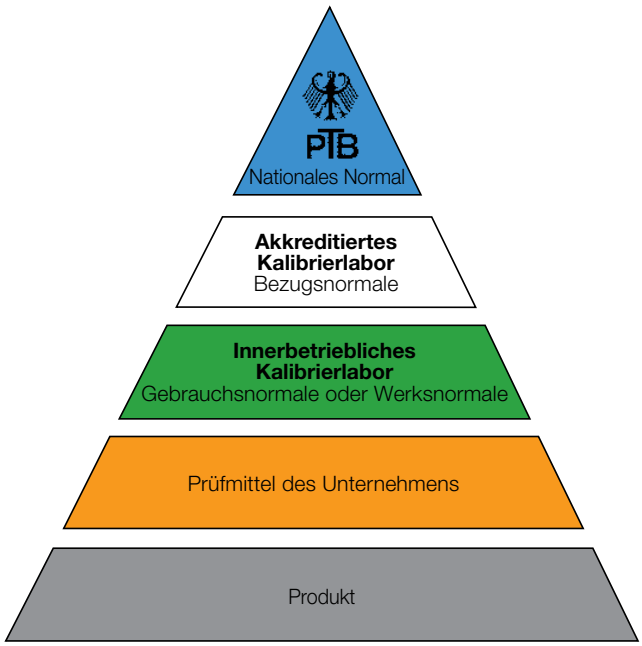
Messen
Messen heißt vergleichen. Ein Messgerät vergleicht etwas Unbekanntes mit etwas Bekanntem. Mit einem Messgerät wird eine physikalische Größe bestimmt. Die dabei auftretende Toleranz ergibt die für diese Messung resultierende Messunsicherheit. Je geringer der Toleranzbereich, umso genauer misst das Messgerät.

Normale
Messgeräte werden in regelmäßigen Abständen überprüft, bzw. es wird eine sogenannte Kalibrierung durchgeführt. Dafür lässt man es ein Objekt ausmessen, dessen Maße schon bekannt sind. Das Objekt mit den bekannten Maßen ist das Normal. Normale gibt es in verschiedenen Hierarchiestufen. Diese werden nach einem festen Schema miteinander verglichen.
Zeigt das Messgerät denselben Wert an oder einen Wert im zulässigen Toleranzbereich, erfüllt das Messgerät die gestellten Anforderungen.

Kalibrierhierarchie
An der Spitze der Kalibrierhierarchie steht die Physikalisch-Technische-Bundesanstalt (PTB), die das Nationale Normal definiert und die nationale Akkreditierungsstelle (DAkkS) bei der Akkreditierung von Kalibrierlaboren berät.

Diese akkreditierten Kalibrierlaboratorien, wie z. B. bei der DEPRAG D-K-18255-01-00, kalibrieren Messmittel nach festgelegten Kalibrierverfahren unter Verwendung von regelmäßig rückgeführten Referenz-Messmitteln.

An der Basis der Kalibrierhierarchie stehen die im Produktionseinsatz befindlichen Werkzeuge, wie z. B. Schraubwerkzeuge, Messplattformen, Messgeräte. Diese werden in regelmäßigen Zyklen mit Hilfe von Messmitteln des Unternehmens überprüft.



Kalibrieren von Messmitteln

Kalibrieren
Vergleich des zu kalibrierenden Messmittels mit einem Referenzmesssystem zur Ermittlung der systematischen Messabweichung unter gleichen Bedingungen mit Rückführung auf das Nationale Normal. Eine Kalibrierung erfasst immer den momentan ermittelten IST-Zustand.

Referenzmesssystem
Die verwendeten Normale müssen durch akkreditierte Stellen, z. B. im DAkkS-akkreditierten DEPRAG Kalibrierlabor, auf die vollständige Rückführbarkeit geprüft und freigegeben sein.

Messkette
Eine Messkette beinhaltet alle Komponenten vom Messwertaufnehmer bis zum Anzeigegerät (Messwertaufnehmer, Kabel, Messelektronik).

Kalibrieren bei DEPRAG
Grundsätzlich werden alle Komponenten der Messkette unabhängig voneinander kalibriert. Messgeräte für die Piezoaufnehmer werden mit Hilfe eines Ladungs-Kalibriergerätes und Messgeräte für die DMS-Aufnehmer mit einem DMS-Kalibrator einer Vergleichsmessung unterzogen. Diese sind jeweils über eine DAkkS-Kalibrierung an das Nationale Normal der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt angeschlossen und entsprechen den höchsten Qualitätsanforderungen. Die Messwertaufnehmer werden in speziellen Kalibriervorrichtungen mit rückführbaren Referenzmesssystemen kalibriert.
Informationen zu den DEPRAG Kalibrierdienstleistungen finden Sie im Produktkatalog Serviceleistungen D3330.

Wie lange ist die Kalibrierung gültig?
Im Prinzip gilt eine Kalibrierung nur zum Zeitpunkt ihrer Durchführung. Die Festlegung von Kalibrierintervallen liegt grundsätzlich in der Verantwortung des Anwenders.

Die Anwendung, d. h. die Umgebungsbedingungen am Einsatzort, Einsatzart des Messmittels, Gebrauchshäufigkeit und Sicherheitsrelevanz der zu verschraubenden Werkstücke ist entscheidend für die Festlegung des Kalibrierintervalls.
Werden Messmittel im laufenden Montageprozess eingesetzt, wird es sicher sinnvoller sein, einen kürzeren Kalibrierintervall festzulegen, als wenn die Messmittel nur im Labor in größeren Zeitabständen verwendet werden.

So können Kalibrierzyklen etwa zwischen 3 Monaten und 2 Jahren sinnvoll sein.

Wir empfehlen, unsere Messsysteme wenigstens einmal pro Jahr neu kalibrieren zu lassen.

Normen / Richtlinien / Literatur

Normen

- **ISO 5393** Drehende Werkzeuge für Schraubverbindungen – Funktionsprüfungen
- **DIN 51309** Werkstoffprüfmaschinen – Kalibrierung von Drehmomentmessgeräten für statische Drehmomente
- **DIN 1319** Teil 1-3 Grundbegriffe der Messtechnik
- **DIN EN ISO/IEC 17025** Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien
- **DIN 55350** Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik

Richtlinien

VDI 2230 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubverbindungen
VDI 2862 Einsatz von Schraubsystemen in der Automobilindustrie
VDI/VDE 2645 Fähigkeitsuntersuchung
VDI/VDE 2647 Sensoren für Schraubsysteme
Anweisung zur dynamischen Prüfung von Werkzeugen in Anlehnung an ISO 5393
VDI/VDE 2648 Sensoren und Messsysteme für die Drehwinkelmessung
VDI/VDE/DAkkS 2639 Kenngrößen für Drehmomentaufnehmer

Literatur

- Bauer, C.O., **Handbuch der Verbindungstechnik** – Carl Hanser-Verlag, München, Wien , 1991; ISBN 3-446-14609-1
- ICS, **Automatische Schraubenmontage** – Hans-Herbert Mönnig Verlag Iserlohn, 2003; ISBN: 3-922 885-64-0
- Ruppelt, E., **Druckluft-Handbuch** – Vulkan-Verlag Essen, 1996; ISBN: 3-8027-2692-8
- ICS **Handbuch Industrielle Schraubmontage, 3. Ausgabe 2007** – Hans-Herbert Mönnig Verlag Iserlohn; ISBN: 9783933519375

Notizen

DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO.
Postfach 1352, D-92203 Amberg
Carl-Schulz-Platz 1, D-92224 Amberg
Tel. (0 96 21) 371-0, Fax (0 96 21) 371-120
www.deprag.com
info@deprag.de

Ihr Kontakt

AxNum AG
Solothurnstrasse 142 • CH-2504 Biel/Bienne
T +41 (0)32 343 30 60
office@axnum.ch • www.axnum.ch

ZERTIFIZIERT NACH DIN EN ISO 9001

© DEPRAG. Alle Rechte und technischen Änderungen vorbehalten – Fri