

Ultraschall-System zur on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und zur Schraubersteuerung

Dr.-Ing. Eckhardt Schneider, Dipl.-Ing. Rüdiger Herzer,
 Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken;

Einführung und kurzer Rückblick

Das Funktionsprinzip einer Schraubverbindung besteht im Aufeinanderpressen der zu verbindenden Teile. Die Presskraft ergibt sich im Wesentlichen aus der Vorspannkraft der Schraube. Die Vorspannkraft ist die qualitätsbestimmende Kenngröße für jede Schraubverbindung. Der Bruch der Schraube oder das Lösen der Schraubverbindung sind die beiden extremen Folgen einer falsch eingestellten Vorspannkraft.

Das Messen des Drehmomentes und des Drehwinkels repräsentiert den Stand der in der täglichen Praxis genutzten Technik. Durch Reibverluste zwischen Schraubenkopf und Auflage und zwischen Schraubengewinde und Gegengewinde ergeben sich hin und wieder Abweichungen von bis zu einigen 10% von der für die konkrete Schraubverbindung notwendigen Vorspannkraft.

Es ist allgemein anerkannt, dass der Einfluss der elastischen Materialdehnungen oder Spannungen auf die Schallgeschwindigkeit von Ultraschallwellen die Möglichkeit bietet, die Vorspannkraft oder die Dehnung oder Längung einer Schraube zu bestimmen.

Die ersten Veröffentlichungen, die die prinzipielle Möglichkeit der Nutzung des akusto-elastischen Effektes zur Bestimmung der Dehnung oder Längszugspannung in einer Schraube beschreiben, sind schon in den 1970er Jahren erschienen. In den USA und Japan und in Europa im Wesentlichen in Polen und in Deutschland wurden die technischen Möglichkeiten der hoch auflösenden Messung von Ultraschalllaufzeiten genutzt, um Eigenspannungen von Bauteilen zu bestimmen. In /1, 2, 3/ wird unter anderem auch ein Überblick über die Entwicklungsarbeiten und Anwendungen gegeben. Im IZFP wurden 1985 /86 in einem öffentlich geförderten Vorhaben Ultraschallverfahren zur Bestimmung der Längsspannung und Vor-



Abb. 2: Die Ultraschallanwendung wird durch das Einprägen einer Schallankoppelfläche und/oder einer Reflektionsfläche auf den Schraubenkopf oder Schaft unterstützt /5/

spannkraft in Schrauben weiterentwickelt und die kombinierte Nutzung einer Longitudinal- und einer zirkular polarisierten Transversalwelle zur Bestimmung der Vorspannkraft in schon eingebauten Schrauben ertüchtigt. Dabei wurde die Transversalwelle elektromagnetisch erzeugt, um eine koppelmittelfreie Anwendung zu ermöglichen /4/. Obgleich der erreichte Entwicklungsstand alle im Beraterkreis vertretenen Industriepartner überzeugte, wurde die Weiterentwicklung der Verfahren zur Bestimmung der Vorspannkraft während des Verschraubungsprozesses (on-line Verfahren) nicht beauftragt.

Alle derzeit genutzten Ultraschallgeräte messen die Laufzeit einer Longitudinalwelle vor und nach dem Anziehen der Schraube und bestimmen die Vorspannkraft oder Längung anhand vorher ermittelter Kalibrierwerte (off-line Verfahren). Abbildung 1 zeigt die beiden Geräte, die die häufigste Anwendung finden.

Die Ultraschallanwendung wird von namhaften Schraubenherstellern durch das Einprägen einer Schallankoppelfläche und/oder einer Reflektionsfläche auf den Schraubenkopf oder Schaft unterstützt (Abbildung 2/5/).

Der Vorteil, die Ultraschallmessung auch während des Anziehens durchführen zu können, um auf diese Weise eine on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und eine Steuerung des Schraubwerkzeugs zu ermöglichen, war die Motivation für die Entwicklung eines Verfahrens bei dem der Ultraschallwandler in Form einer dünnen piezoelektrischen Schicht auf jeden einzelnen Schraubenkopf aufgebracht wird /8/.



Abb. 1: BoltMike III /6/ und 25 DL PLUS /7/ sind häufig eingesetzte Geräte zur offline Bestimmung der Schraubenvorspannkraft



Abb. 3: Skizze einer gut und zweier weniger gut geeigneten Schallfeldausbildungen in einer Schraube und Abbildungen von handelsüblichen Ultraschallprüfköpfen zum Einbau in die Schraubennuss. Beispiele von Koppelfolien zur trockenen Schalleinprägung in die Schraube

Diese Entwicklung einer dazu neu gegründeten Firma wurde von einem deutschen Messsysteme- und Anlagenbauer und von deutschen Automobilherstellern engagiert unterstützt; in den Werklaboren wurde die Anwendbarkeit der Prüfsysteme in der industriellen Fertigung intensiv untersucht.

Eine Variante des Verfahrens nutzt Piezosensoren, die auf den Schraubenkopf aufgeklebt werden.

Die erhöhten Kosten pro Schraube erschweren die Marktakzeptanz dieser Verfahren sodass diese heute nur in konkreten Anwendungen für luft- und raumfahrtspezifische Verbindungen genutzt werden /9, 10/.

Die Motivation, den Vorteil der on-line Messung auch an üblichen Schrauben ohne diese piezoelektrische Schicht zu ermöglichen, steht hinter den Weiterentwicklungen des IZFP.

Ziel

Ziel war die Weiterentwicklung der im IZFP vorgehaltenen Komponenten zu einem robusten und zuverlässigen System zur on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und zur Steuerung eines stationären oder handgehaltenen, bzw. handgeführten Schraubwerkzeuges.

Die Analyse der Anforderungen an die Messtechnik einerseits und der Bedingungen für eine erfolgreiche Anwendung in industrieller Umgebung andererseits, führte zur Identifikation von 4 Teilbereichen, in denen Verbesserungen erzielt werden mussten:

- die Auswahl des am besten geeigneten Prüfkopfes,
- die Entwicklung einer Koppelfolie zur trockenen Schallübertragung vom Prüfkopf in den Schraubenkopf,
- der Einbau des Prüfkopfes in die Schraubennuss und die berührungslose Signalübertragung vom rotierenden Schaft auf den statischen Teil des Schraubwerkzeuges. Von dort wird das hochfrequente elektrische Signal wie üblich per Prüfkabel zum Ultraschall Frontend geleitet.
- Anpassung der IZFP-Messtechnik zur on-line Messung der Schalllaufzeit mit einer relativen Genauigkeit von ca. 0,01% und einer Messrate von bis zu 150 Einzelmessungen pro Sekunde,

- Die Nutzung des akusto-elastischen Effektes zur Vorausbestimmung der Schalllaufzeitzunahme, die der geforderten Vorspannkraft in der Schraube entspricht.

Grundlagen

Auswahl des geeigneten Prüfkopfes

Wie die Abbildung 3 deutlich vereinfacht darstellt, ist sofort plausibel, dass das grün gezeichnete Schallfeld die ideale Situation wiedergibt: Der größtmögliche Anteil des Schallsignals wird ohne Seitenwandreflexionen zum Prüfkopf zurück reflektiert. Die rot und blau gezeichneten Schallfelder führen zu mehr oder weniger störenden Seitenwandreflexionen und zu einem schlechteren Signal/Rausch-Verhältnis.

Die Regeln, die die Parameter Ultraschallmittenfrequenz und Prüfkopfdurchmesser mit der Ausprägung des Schallfeldes eines Kolbenschwingers in Beziehung bringen, sind allgemein bekannt. Ebenso bekannt sind die Möglichkeiten durch die Art der elektrischen Anregung, durch Pulslänge und Verstärkung die Signalform zu beeinflussen.

Bisher ist es ohne Ausnahme gelungen, einen handelsüblichen, geeigneten Prüfkopf zur Anwendung an Schrauben mit vorgegebenen Längen, Dicken und Gewindegängen zu finden.

Folie zur trockenen Schalleinprägung

Die Folie soll nicht nur Ultraschallimpulse mit Mittenfrequenzen von bis zu 10 MHz einkoppeln, sondern auch den Aufschlagimpuls auf den Prüfkopf beim Einrasten der Nuss auf den Schraubenkopf reduzieren. Dazu sind Foliendicke, Dichte und Steifigkeit zu optimieren. Zur möglichst effektiven Dämpfung des Aufschlagimpulses werden Dicke und Dichte erhöht, bis die damit größer werdende Schalldämpfung die Werte begrenzt.

Die unterschiedliche Färbung der in Abbildung 3 gezeigten Folien verdeutlicht die unterschiedlichen Folieneigenschaften.

Schraubennuss mit integriertem Ultraschallprüfkopf und Modul zur induktiven Signalübertragung

Zur Prozesssicheren Anwendung sind folgende Forderungen zu erfüllen: gleich bleibender Anpressdruck des Ultraschallwandlers auf den Schraubenkopf, feinmechanische Führung des Ultraschallwandlers, um Verkippungen des Pulsschraubers während des Prozesses weitestgehend zu tolerieren und schnelles Ersetzen eines defekten Ultraschallwandlers.

Die Ausführung des Moduls zur induktiven Signalübertragung muss ein schnelles Auswechseln durch selbst zentrierende Hochfrequenzsteckverbindungen und eine einfache Anpassung an unterschiedliche Schraubwerkzeuge ermöglichen. Das Modul soll auch die Übertragung von Pulsen mit Mittenfrequenzen von bis zu 10 MHz gewährleisten.

Die Konzeptionen und der Bau der Nüsse mit integriertem Schallwandler und der Signalübertrager wurden von Kollegen der Fraunhofer-Technologie-Entwicklungsgruppe TEG geleistet /11/. Die Abbildung 4 skizziert den mechanischen Aufbau.

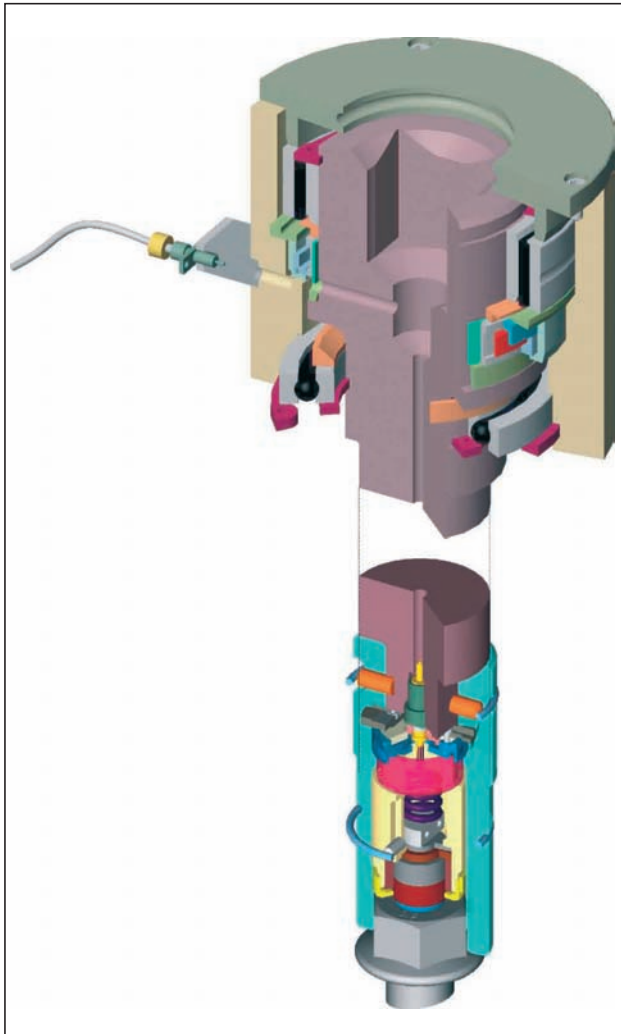


Abb. 4: Schematische Darstellung der Nuss mit integriertem Ultraschallprüfkopf und der Signalübertragungseinheit

Laufzeitmesstechnik

Die Entwicklungsarbeiten im IZFP mit dem Ziel der Bestimmung von (Eigen-) Spannungen in Bauteilen hatten unter anderem eine patentierte Lösung zur schnellen und hochgenauen Messung von Schalllaufzeiten zum Ergebnis.

Unabhängig von der gesamten Laufzeit des Schallimpulses (also von der Bauteildicke) kann die Laufzeit mit einer absoluten Auflösung von ± 2 ns und nach entsprechender Mittelung noch eine Zehnerpotenz besser gemessen werden.

In Fällen, in denen die Signalform des Rückwandechos den Mindestanforderungen für die Nutzung der patentierten Technik nicht genügt, wird die Kreuzkorrelationsmethode genutzt, die den Vorteil hat, den Einfluss von Signalverzerrungen auf die Messgenauigkeit zu minimieren. Die Laufzeit des Schallpulses wird mit einer Messrate von bis zu 150 Messungen/Sekunde und mit einer relativen Auflösung von besser als $\pm 0,01\%$ aufgenommen.

Der akusto-elastische Effekt

Der akusto-elastische Effekt beschreibt den Einfluss von Dehnungs- bzw. Spannungszuständen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Ultraschallwellen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten können in einer Form be-

schrieben werden, in der die Materialdichte, der Elastizitäts- und Schubmodul (elastische Konstanten II. Ordnung) sowie die elastischen Konstanten III. Ordnung als materialspezifische Kennwerte und die drei Komponenten des orthogonalisierten Dehnungstensors, bzw. die drei Hauptspannungen als Zustandsparameter des Bauteiles eingehen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der hier interessierenden Longitudinalwelle, die sich entlang der Schraubenlänge ausbreitet, wird wie folgt von den Spannungen beeinflusst:

$$(v_L - v_0) / v_0 = (A/C) \sigma_L + (B/C) (\sigma_U + \sigma_R) \quad (1)$$

Dabei repräsentiert v_0 die Geschwindigkeit der Welle im spannungsfreien Fall, v_L ist die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle. σ_L , σ_U und σ_R sind die Hauptspannungen in Längen-, Umfangs- und radialer Richtung der Schraube.

A, B und C sind Kombinationen der elastischen Konstanten II. und III. Ordnung, die auch akusto-elastische Materialkennwerte genannt werden. Sie wichten den Einfluss der entsprechenden Hauptspannungskomponente auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwelle:

$$A = 2 (\lambda + \mu) (4m + 5\lambda + 10\mu + 2l) - 2\lambda (2l + \lambda)$$

$$B = 2 (2l + \lambda) (\lambda + \mu) - \lambda (2l + \lambda) - \lambda (4m + 5\lambda + 10\mu + 2l) \quad (2)$$

$$C = 4\mu (\lambda + 2\mu) (3\lambda + 2\mu)$$

Die LAMÉ'sche Konstante μ entspricht dem Schubmodul G , der Elastizitätsmodul E ergibt sich aus den LAMÉ'schen Konstanten λ und μ zu $E = \mu (3\lambda + 2\mu) / (\lambda + \mu)$.

Literaturergebnisse und eigene Untersuchungen zeigen, dass der Wert für A/C für alle bisher untersuchten ferritischen Stähle etwa 10 mal größer ist als der Wert für B/C /2, 3/. Die Darstellung der reziproken Werte hat den Vorteil einer leichteren Veranschaulichung: $C/A = 74$ MPa / 0,1% bedeutet, 74 MPa Zugspannungen in Längenrichtung verursachen eine Geschwindigkeitsabnahme von 0,1%. Für $C/B = 935$ MPa / 0,1% gilt das Entsprechende. Damit kann in erster aber hinreichender Näherung der lineare Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeitsverringerung und Zunahme der Zugspannungen in Schraubenlängenrichtung genutzt werden.

Wie die Abbildung 5 verdeutlicht, ändert sich die Laufzeit der Welle einmal auf Grund der makroskopischen Dehnung oder Längung der Schraube und einmal auf Grund der Tatsache, dass die Schallgeschwindigkeit, wie in der Beziehung (1, akusto-elastischer Effekt) beschrieben, mit zunehmender Zugdehnung bzw. Längszugspannung abnimmt.

Die Zunahme der Länge L_σ der Schraube mit zunehmender Längsspannung kann unter Nutzung des in der Regel hinreichend genau bekannten Elastizitätsmodules E des Materials und der Kenntnis der ursprünglichen Schraubenlänge L_0 berechnet werden.

$$\sigma_L = E (L_\sigma - L_0) / L_0 \quad (3)$$

Die Ausgangslänge L_0 ist wiederum über die Messung der Laufzeit t_0 , der sich in der noch unbelasteten Schraube mit

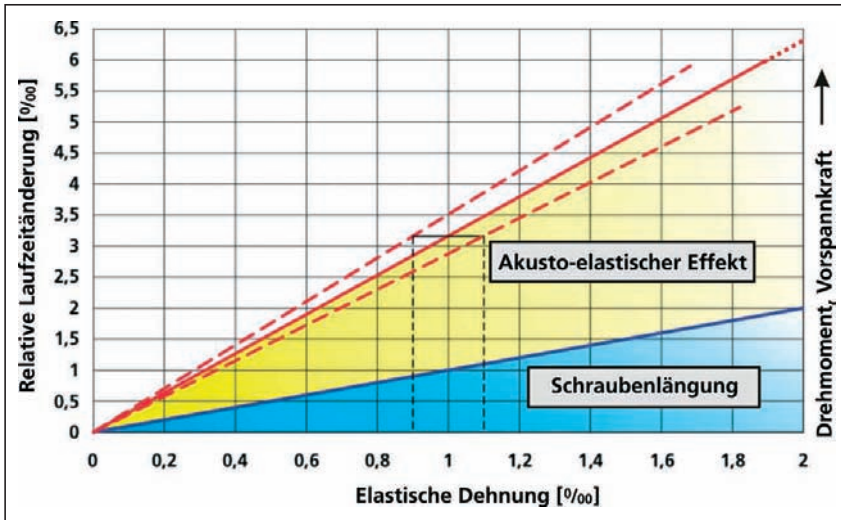


Abb. 5: Die Messgröße Laufzeit wird von der makroskopischen Dehnung und den akusto-elastischen Materialeigenschaften beeinflusst

der Geschwindigkeit v_0 ausbreitenden Longitudinalwelle, zugänglich.

$$v_0 = 2L_0 / t_0 \quad (4)$$

Mit $v_L = 2L_\sigma / t_\sigma$ ergeben sich aus den Beziehungen 2, 3 und 4 die Bestimmungsgleichungen für die Längsspannung oder die Längsdehnung oder die Längung und bei Kenntnis des Schraubendurchmessers auch für die Vorspannkraft.

Während des Eindrehens der Schraube wird die Laufzeit t_0 der Schallwelle in der noch nicht belasteten Schraube gemessen. Aus den bekannten materialspezifischen akusto-elastischen Kennwerten und der Laufzeit t_0 wird die Laufzeit t_σ berechnet, die der für den konkreten Schraubfall

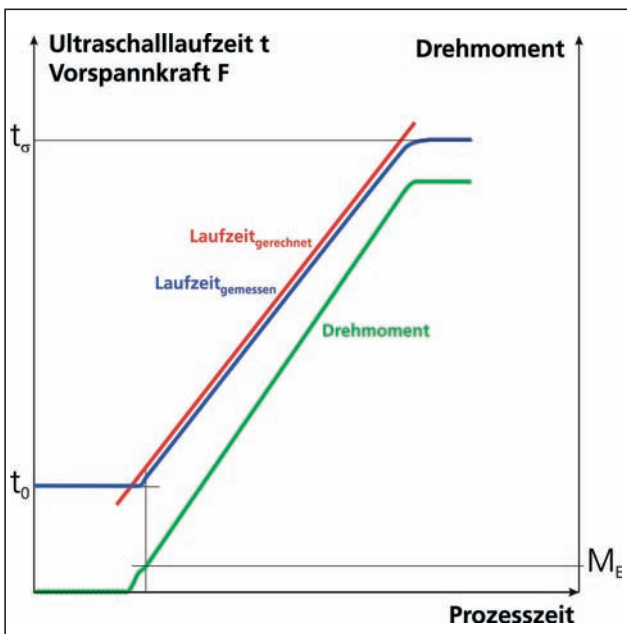


Abb. 6: Durch Vergleich der als Funktion der Prozesszeit oder des Drehmomentes und/oder des Drehwinkels gemessenen Schalllaufzeit t von der vorausberechneten Veränderung werden Reibverluste oder Festigkeitsabweichungen identifiziert

vorgegebenen Vorspannkraft, bzw. der entsprechenden Zugspannung in der Schraube entspricht. Bei Erreichen der Laufzeit t_σ ergibt ein Abschalt-Signal an die Steuereinheit des Schraubwerkzeuges.

Die Abbildung 6 skizziert die zeitliche Abfolge. Eine Abweichung der als Funktion der Prozesszeit oder des Drehmomentes und /oder des Drehwinkels gemessenen Schalllaufzeit t von der vorausberechneten Veränderung identifiziert Reibverluste oder Festigkeitsabweichungen.

Ändert sich beispielsweise das aufgebrauchte Drehmoment pro Zeitintervall schneller als die Zunahme der Ultraschalllaufzeit, sind Reibverluste angezeigt. Ändert sich die Zunahme der Ultraschalllaufzeit pro Zeitintervall stärker als die Änderung des Drehmomentes, liegt eine Schraube mit geringeren Steifigkeits-, Festigkeitswerten vor.

Die Vorteile dieser zusätzlichen Information sind nur zu erhalten, wenn Schraubwerkzeuge eingesetzt werden, die die Drehmomentwerte entweder während des Prozesses oder unmittelbar danach über eine Schnittstelle zur Verfügung stellen.

Damit wird die nach VDI 2862 geforderte Rückführbarkeit der Messgrößen auf physikalische Normale erfüllt. Die Zunahme der Vorspannkraft oder Längsspannung wird über die Laufzeitzunahme messtechnisch erfasst, mit berechneten Änderungen verglichen und durch Plausibilitätsbetrachtungen mit der Zunahme des Drehmomentes vergleichend bewertet.

Einfluss von Torsionsspannungen

Unter Nutzung der Beziehung (1) kann auch der häufig nachgefragte Einfluss von Torsionsspannungen auf das Messergebnis beurteilt werden: Bei Torsion der Schraube haben die beiden Spannungskomponenten σ_U und σ_R unterschiedliche Vorzeichen, die eine Zug, die andere Druck, so dass die Summe ($\sigma_U + \sigma_R$) kleinere Werte annimmt als der jeweilige Einzelbeitrag. Zusammen mit der sehr geringen Wichtigkeit ist der Einfluss von Torsionsspannungen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle vernachlässigbar klein.

Einfluss der Schraubentemperatur

Der Einfluss einer über die Schraubenlänge gleich bleiben und am Kopf oder Schaftende gemessenen Temperatur kann leicht korrigiert werden: Für ferritische Stähle ergibt sich aus dem linearen Ausdehnungskoeffizienten und dem Temperaturkoeffizienten der Longitudinalwellengeschwindigkeit ein Korrekturwert von $12,2 \times 10^{-5}$ pro °Kelvin Temperaturänderung von der Schraubentemperatur bei der die Materialkennwerte und die Laufzeit in der noch nicht angezogenen Schraube gemessen wurden.

Bei inhomogen über die Schraubenlänge verteilten Temperaturen bleibt in der Regel nur die Möglichkeit, so lange abzuwarten, bis sich eine gleiche Temperatur über die Schraubenlänge einstellt.

Chargeneinflüsse

Die Festigkeit von Schrauben kann auf unterschiedliche Art eingestellt werden. Bei Schrauben gleicher Herstellungsvariante wurden die relevanten elastischen und akusto-elastischen Kennwerte innerhalb einer Streubreite von $\leq \pm 4 \%$ ermittelt.

Bei Schrauben unterschiedlicher Herstellungsart können Streuungen der Werte von über $\pm 10 \%$ auftreten. Die Kennwerte werden in Vorversuchen experimentell bestimmt.

Einfluss des Klemmlänge/Schraubenlänge-Verhältnisses

Das Verhältnis der Klemmlänge (besser Dehnlänge, Abb. 7) zur Schraubenlänge hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Das Verhältnis kann der Schraubfallspezifikation entnommen und auf einfache Weise bei der Bestimmung der Vorspannkraft aus den Messungen der Schalllaufzeit berücksichtigt werden.

Nutzung des Verfahrens beim überelastischen Anziehen von Schrauben

Mit den üblichen Drehmoment- und Drehwinkelmessungen kann durch das überelastische Anziehen sichergestellt werden, dass die eingestellte Vorspannkraft zumindest dem Wert der Streckgrenze des betreffenden Materials entspricht.

Das hier beschriebene on-line Verfahren ermittelt die Längsspannung in der Schraube und stoppt den Verschraubungsvorgang, wenn die geforderte Längsspannung oder Vorspannkraft erreicht ist. Der Grund für die Einführung des überelastischen Anziehens entfällt; Reibverluste haben keinen Einfluss auf die Genauigkeit des Messergebnisses.

Die Nutzung des akusto-elastischen Effektes ist eigentlich auf den Bereich der elastischen Dehnung eines Festkörpers begrenzt. Bei elastischen Dehnungen ändern sich die Schallgeschwindigkeiten linear mit der Dehnung oder Spannung. In vielen experimentellen Untersuchungen an Metallen wurde festgestellt, dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Ultraschallwellen bei Überschreitung der Dehngrenze zwar nichtlinear ändern, diese Änderung aber in engen Grenzen vergleichbar bleibt, wenn Proben aus dem gleichen Material um wenige Prozentwerte überelastisch beansprucht werden. In solchen Fällen kann der Zusammenhang zwischen Dehnungszustand und Schallgeschwindigkeit durch einen weiteren Term mathematisch beschrieben und zur Bestimmung der Vorspannkraft von überelastisch angezogenen Schrauben genutzt werden.

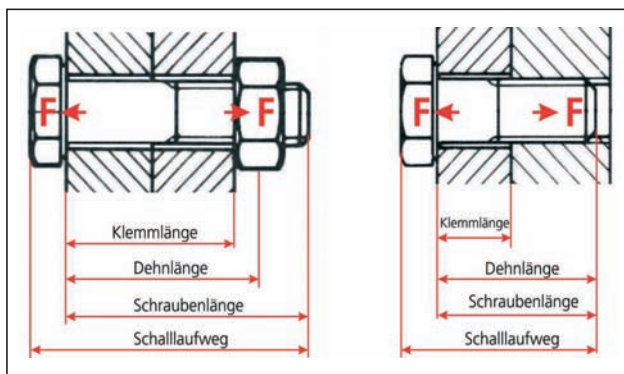


Abb. 7: Skizze zur Begriffsdefinition

Prüfkopfwahl

Die Wahl des Prüfkopfes ist von entscheidender Bedeutung. Es muss angestrebt werden, ein möglichst schmales Schallbündel im Schraubenschaft einzustellen, um Seitenwandreflexionen zu vermeiden und um ein gutes Signal/Rausch Verhältnis zu erzielen.

Prüfsysteme und Messablauf

Die Abbildung 8 zeigt die Komponenten des Systems zur on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und zur Steuerung des Schraubprozesses bei der Verwendung eines Pulsschraubers. Mit den gleichen Komponenten werden auch stationäre Verschraubungsanlagen gesteuert.

Nach dem Einrasten der Nuss und der automatischen Überprüfung der Ankopplung wird die Laufzeit t_0 der Schallwelle in der noch nicht belasteten Schraube gemessen und der Verschraubungsprozess gestartet. Aus den bekannten materialspezifischen akusto-elastischen Kennwerten und der Laufzeit t_0 wird die Laufzeit t_g berechnet, die der für den konkreten Schraubfall vorgegebenen Vorspannkraft entspricht. Nach Überschreitung des Eindrehmomentes verändert sich die Laufzeit systematisch als Folge der zunehmenden Vorspannkraft. Bei Erreichen der Laufzeit t_g ergeht ein Abschalt-Signal an die Steuereinheit der Schraubspindel.

Die Ultraschallsignale werden induktiv vom rotierenden Schaft auf den statischen Teil des Schraubwerkzeuges übertragen. Die Laufzeitmesswerte werden in der Frontend-Elektronik ermittelt, ausgewertet und zur späteren Dokumentation gespeichert.

Die Kommunikation zur Steuereinheit des Schraubwerkzeuges erfolgt über eine Ethernet-Verbindung unter TCP/IP Protokoll.

Die Abbildung 9 zeigt das System, das in zweifacher Ausführung für einen japanischen Auftraggeber zur Verschraubung von Sechskantschrauben (Schlüsselweite 17 mm und 19 mm) mit Flansch gefertigt wurde. Auf dem Ultraschall-

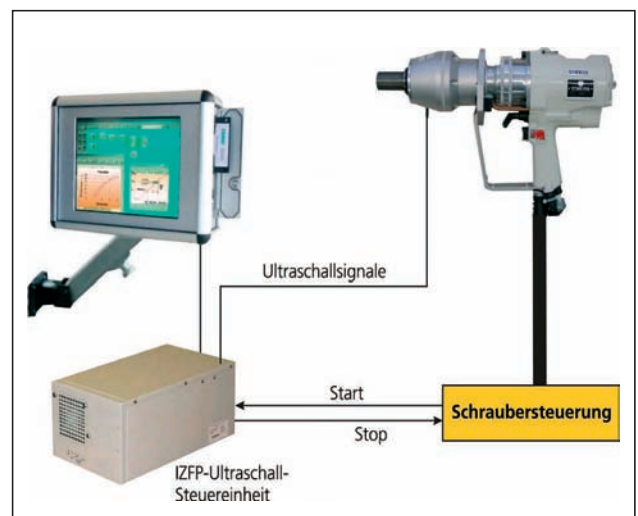


Abb. 8: Komponenten des Systems zur on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und zur Steuerung des Schraubprozesses bei der Verwendung eines Pulsschraubers



Abb. 9: Handelsüblicher Pulsschrauber mit Nuss und Signalübertrager zum vorspannkraftgesteuerten Anziehen



Abb. 10: Handelsübliche Pulsschrauber mit Nuss und Signalübertrager zum gezielten online-Einstellen der Vorspannkraft ohne Fehler durch Reibkraftverluste

Frontend steht der TFT-Bildschirm mit Touch-Screen, links daneben der URYU Pulsschrauber mit Signalübertragungsmodul und Nuss, dahinter die Steuereinheit des Schraubers.

Ergebnisse

Das System zur Steuerung stationärer Anlagen wurde 2002 von dem Kooperationspartner EST Technologie unter dem Namen flexsonic® /12/ dem Markt vorgestellt. Es war bei DAF Trucks zur Feld-Erprobung in eine Montagelinie eingebaut. Es wurden ca. 90.000 Verschraubungen durchgeführt.

Die Abbildung 11 zeigt die Gegenüberstellung der gleichzeitig aufgezeichneten Laufzeiten und Drehmomente. Man erkennt die Laufzeitänderung nach dem das Eindrehmoment überschritten wurde und die systematische Laufzeitzunahme. Die Messung der Laufzeit nach Reduzierung des Drehmomentes ermöglicht die Beurteilung des Setzverhaltens der Schraubverbindung.

Der Kooperationspartner NEDSCHROEF begleitete die Systemerprobung. Seine Pareto-Analyse belegt die erreichte Robustheit und Zuverlässigkeit dieses Prototyp-Systems.

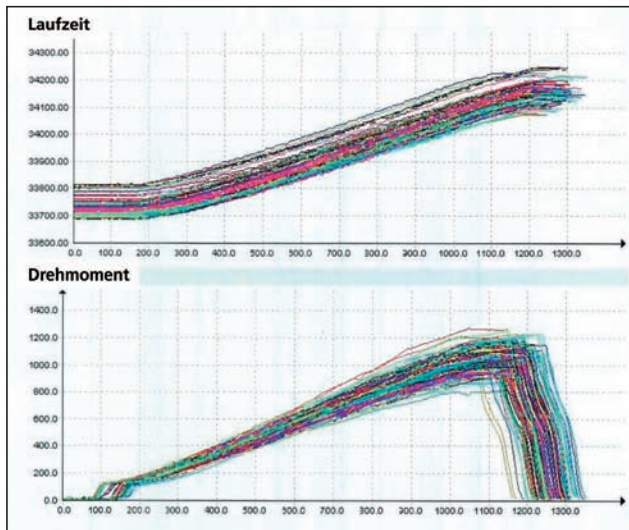


Abb. 11: Laufzeit- und Drehmomentänderung mit der Prozesszeit. Ein Ergebnis aus rund 90.000 mit dem Prototypgerät durchgeführten Verschraubungen

Das unter dem Namen Nedsonic® /13/ vom Kooperationspartner NEDSCHROEF eingeführte System zur Steuerung des Schraubprozesse bei Einsatz eines Pulsschraubers ist seit ca. 2 Jahren in täglicher Nutzung.

Die Abbildung 12 zeigt ein typisches Ergebnis. Dargestellt sind die Zunahme der Schalllaufzeit (grün) und die Drehmomentzunahme (blau), sowie die rote horizontale Linie, die die Laufzeit angibt, die sich aus der geforderten Vorspannkraft ergibt. Bei Erreichen dieses Laufzeitwertes wird der Pulsschrauber abgeschaltet.

Literatur

- /1/ R. B. Thompson, W. Y. Lu, A. V. Clark Jr.: *Ultrasonic Methods; Handbook of Measurements of Residual Stresses*, J. Lu (ed), Society for Experimental Mechanics Inc.; The Fairmont Press Inc. Lilburn, USA (1996) 149-178.
- /2/ E. Schneider: *Ultrasonic Techniques; in V. Hauk: Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods; Elsevier Science B. V. Amsterdam (1997) 522-563.*
- /3/ E. Schneider: *Untersuchungen der materialspezifischen Einflüsse und verfahrenstechnische Entwicklungen der Ultraschallverfahren zur Spannungsanalyse an Bauteilen; D 82; RWTH Aachen, Diss; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2000.*
- /4/ E. Schneider, W. Repplinger: *Bestimmung der Lastspannungen in Schrauben mittels Ultraschallverfahren; Materialspannungen, Vorhaben Nr. 86 Forschungsheft 147 Forschungskuratorium Maschinenbau e.V., Frankfurt 1990.*
- /5/ NEDSCHROEF, Koninklijke Nedtschroef Holding N.V.; Kanaaldijk N.W. 71; NL 5700 AA Helmond
- /6/ BoltMike III, Agfa NDT GmbH *Product Information Ausgabe 11/02*
- /7/ 25 DL plus Präzisionsdickenmesser, Panametrics- NDT Produktinformation 920-014 AG
- /8/ AJAX Fasteners; sfernando@ajaxfast.com.au
- /9/ Pfalz-Flugzeugwerke GmbH, Am Neuen Rheinhafen 10, 67346 Speyer.
- /10/ G. Hartmann: *Leistungsparameter und Einsatzgrenzen von Ultraschall-Messverfahren - 8. Schraubentagung, Darmstadt 2006*
- /11/ Fraunhofer-Technologie-Entwicklungsgruppe TEG, Nobelstrasse 12, 70569 Stuttgart.
- /12/ EST Elektronische Schraub- und Steuerungstechnologie GmbH & Co. KG; Heidenheimer Strasse 47; 73 447 Oberkochen.
- /13/ NEDSCHROEF, Techno Centre.; Kanaaldijk N.W. 71; NL 5700 AA Helmond.

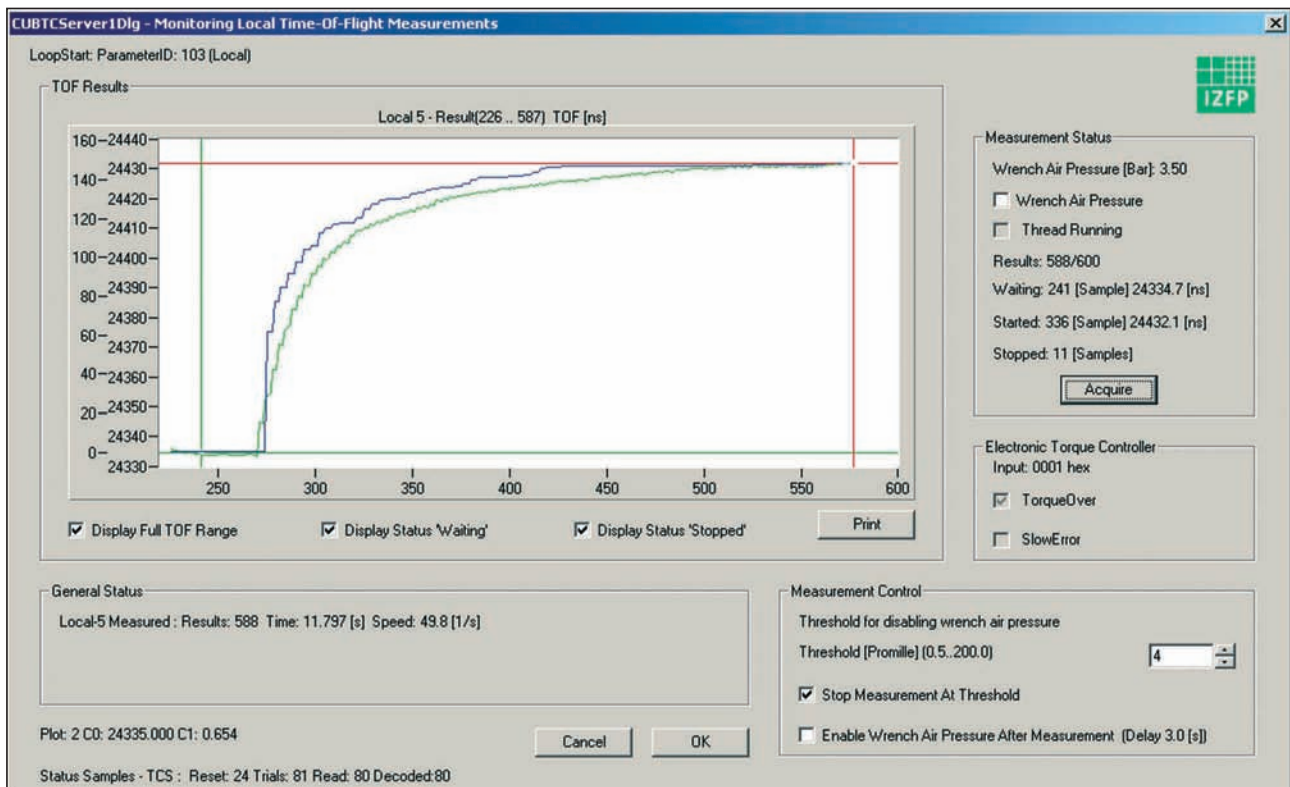


Abb. 12: Darstellung der Laufzeit-(grün) und Drehmomentzunahme (blau) und der roten horizontalen Linie, die die Laufzeit angibt, die sich aus der geforderten Vorspannkraft ergibt