

Überprüfung der Vorspannkraft in Schrauben und Bolzen mittels Ultraschallverfahren

Eckhardt SCHNEIDER

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP;
Campus E3 1; 66123 Saarbrücken

Kurzfassung. Zur Bestimmung der Schraubenvorspannkraft im Erstanzug sind Ultraschallsysteme schon seit Jahren in industrieller Nutzung. Alle Systeme messen die Laufzeitänderung einer Ultraschall-Longitudinalwelle, die sich über die gesamte Schraubenlänge ausbreitet, vom Schraubenende reflektiert und vom Ultraschallwandler wieder empfangen wird. Die Systeme unterscheiden sich in den Anwendungsmöglichkeiten, off- oder on-line, in der Zuverlässigkeit und in den Möglichkeiten der Prozessintegration. Das Ultraschallverfahren zur Vorspannkraftermittlung lässt sich rückführen auf eine relative Zeit- und Längenmessung. Die periodische Überprüfung der Vorspannkraft mittels Ultraschallverfahren setzt voraus, dass zumindest der Laufzeitwert bei Beendigung des Erstanzuges und der schraubfallspezifische K-Wert bekannt sind. Diese beiden Werte quantifizieren die zu überprüfende Vorspannkraft der konkreten Schraube eindeutig. Die bei der Überprüfung gemessene Laufzeit kann mit der beim Erstanzug festgestellten bewertet werden, wenn die genutzten Messsysteme zur Bestimmung der Laufzeiten an Kalibrierkörpern vergleichend genutzt werden können. Somit wird die Genauigkeit bei der Überprüfung der Vorspannkraft von der Genauigkeit der Laufzeitmessung bestimmt. Bei händisch ausgeführten Laufzeitmessungen an den Kalibrierschrauben wurden Standardabweichungen kleiner 0,3 % erzielt; das entspricht einer Unsicherheit von ca. ± 21 MPa oder $\pm 4,2$ % bei einem Streckgrenzwert der Schraube von 500 MPa.

1. Einführung

Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung der Vorspannkraft bei Schrauben und Bolzen sind schon seit Jahren in Nutzung. Sie bieten den Vorteil eines Ergebnisses, das frei von Fehlern durch Reibungseinflüsse ist. Weite Anwendung finden Präzisions-Wanddicken-Messgeräte wie z.B. die Geräte 25DL bzw. 25DLplus [1] sowie Geräte z.B. BOLTMIKE III [2], das die Messgröße in z. B. Längung und Vorspannkraft umrechnet. Alle Ultraschallverfahren zur Bestimmung der Schraubenvorspannkraft basieren auf der Messung der Laufzeit einer Ultraschall-Longitudinalwelle, die sich über die gesamte Schraubenlänge ausbreitet, vom Schraubenende reflektiert und vom Ultraschallwandler wieder empfangen wird. Bei den oben genannten Systemen wird die Laufzeit vor und nach dem Anziehen gemessen; und anhand vorher ermittelter Kalibrierungen wird das Messergebnis bewertet.

Zur Online-Bestimmung der Vorspannkraft mittels Ultraschallverfahren wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt und in die industrielle Nutzung eingeführt. Bei der INTELLIFAST Technologie [3] wird eine dünne piezoelektrische Schicht auf jeden Schraubenkopf aufgesputtert. Durch Kontaktierung mit einem Metallstift im Werkzeug wird das elektrische Signal während des Anziehprozesses übertragen, die Welle erzeugt, die Signale empfangen und die Vorspannkraft angezeigt. Ein anderer Ansatz nutzt eine piezoelektrische Scheibe, die auf den Schraubenkopf aufgeklebt wird. Das IZFP System nutzt

einen geeigneten handelsüblichen Ultraschall-Longitudinalwellenprüfkopf, der in die Schraubennuss integriert wird [4,5].

Mit dem Ziel der periodischen Überprüfung der Vorspannkraft mit dem INTELLIFAST System ist sicherzustellen, dass die piezoelektrischen Eigenschaften der aufgespülten piezoelektrischen Schicht nach Klima- und Temperatureinflüssen je nach Schraubfall auch über Jahre unverändert bleiben. Die diesbezüglichen Optimierungen der Piezoschicht sind für konkrete Anwendungen mit großem Erfolg gelungen [3].

Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen zeigen eine von den genannten Verfahren unabhängige Vorgehensweise auf, die Vorspannkraft mittels Ultraschallverfahren zu überprüfen.

2. Grundlegendes

Alle Ultraschallverfahren zur Bestimmung der Vorspannkraft basieren auf der Ermittlung der relativen Änderung der Ultraschalllaufzeit. Die mit dem Anziehen einhergehende Zunahme der Zugspannung in Schraubenlängsrichtung hat zur Folge, dass die Schraube länger wird (Hooke'sche Beziehung) und damit der Laufweg und die Schalllaufzeit. Die Abbildung 1 zeigt im blau dargestellten Teil die relative Laufzeitzunahme als Funktion der durch die Längsspannung verursachten Dehnung, d. h. der relativen Längenänderung. Die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle bleibt aber nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmenden Zugspannungen systematisch ab. Diese Geschwindigkeitsänderung, als akusto-elastischer Effekt bekannt, kann unter Nutzung der materialabhängigen elastischen Konstanten II. Ordnung (E-Modul, Schubmodul) und der elastischen Konstanten III. Ordnung (Murnaghan-Konstanten) mathematisch beschrieben werden [6]. Für den in den angezogenen Schrauben wirkenden einaxialen Zugspannungsfall können die materialabhängigen elastischen Konstanten zu einem Zahlenwert, oft mit K-Wert bezeichnet, zusammengefasst werden. Der K-Wert kann experimentell im Zugversuch oder an einem Schraubenmessstand mit Druckmessdose oder unter Verwendung einer gut geschmierten Schraube durch das Messen des aufgebrachtten Drehmomentes ermittelt werden.

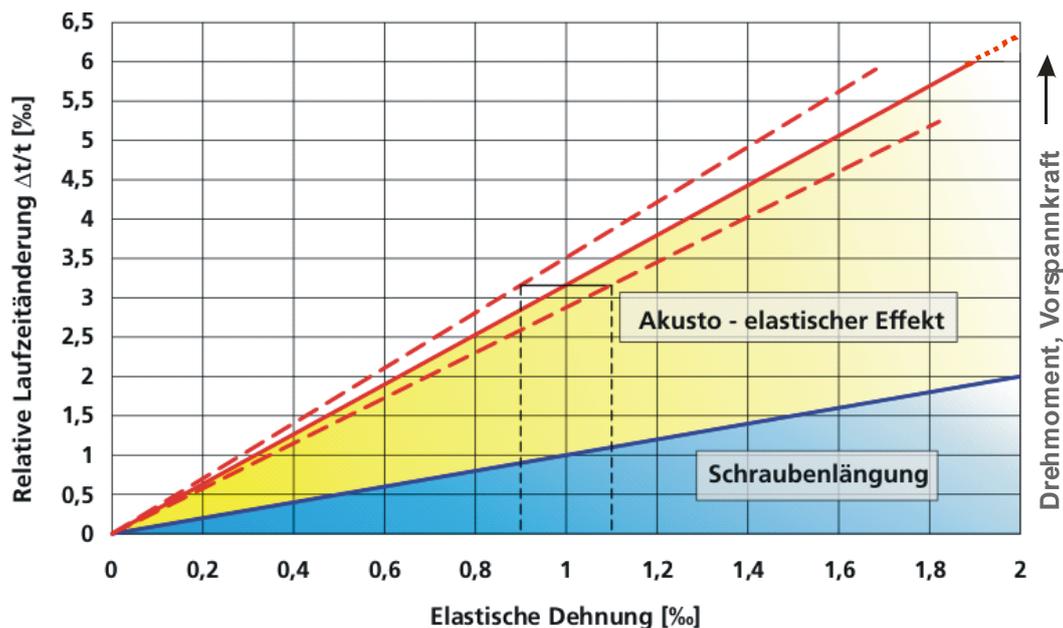


Abb. 1: Relative Laufzeitänderung der Longitudinalwelle mit der elastischen Dehnung einer Schraube und Anteile der Längung und des materialabhängigen akusto-elastischen Effektes an der Messgrößenänderung während des Anziehprozesses.

Entsprechend ist der K-Wert die Proportionalitätskonstante zwischen der gemessenen Laufzeitänderung und der Längsspannung bzw. -dehnung oder der Vorspannkraft oder dem Drehmoment. Die durch die genutzte Messtechnik zur experimentellen Ermittlung des K-Wertes verursachte Ungenauigkeit des K-Wertes ist vernachlässigbar klein gegenüber der Unsicherheit, die durch den Gefügestand der individuellen Schraube verursacht wird. In einer Untersuchung an mehr als 100 Schrauben des gleichen Typs aus mehreren Lieferungen des gleichen Herstellers wurden K-Werte mit einer Streuung $\leq \pm 4\%$ ermittelt. Wie Abbildung 1 im blauen Teil verdeutlicht, bestimmen die akusto-elastischen Materialeigenschaften den größten Teil des gesamten Messeffektes.

Die Schallwelle durchläuft die gesamte Länge der Schraube und damit unbelastete Teile und Längsbereiche mit unterschiedlich stark ausgeprägten Längsspannungen. Das Ergebnis ist der Mittelwert. Abhängig vom Gesamtlänge / Klemmlänge- oder Gesamtlänge / Dehnlänge - Verhältnis verändert sich der K-Wert. Der Fehler wird von den Toleranzen der jeweiligen Längenangaben bestimmt.

Die Laufzeit in der noch nicht belasteten Schraube wird verfahrensabhängig entweder an der bereitgestellten Schraube oder während des Eindrehvorganges gemessen. Sie wird von der ursprünglichen Schraubenlänge, der Materialdichte und den elastischen Materialkonstanten bestimmt. Bei den Online-Verfahren wird die Laufzeitänderung während des Anziehprozesses mit Messraten > 40 Hz gemessen. Mit Kenntnis des K-Wertes kann die relative Laufzeitzunahme berechnet werden, die der geforderten Vorspannkraft entspricht. Sobald die online gemessene Laufzeit den berechneten Wert erreicht, wird beim IZFP-System ein Signal zum Abschalten an das stationäre Schraubensystem oder an ein Druckluftventil zur Beendigung des Schraubprozesses gegeben. Die Fehler bei der Messung der relativen Laufzeitänderung sind $\leq 0,015\%$.

Die Temperatur der Schraube hat Einfluss auf das Messergebnis. Da der lineare Temperatur-Ausdehnungskoeffizient bei Metallen ebenso wie die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle sehr gut bekannt sind, lässt sich der Temperatureinfluss einfach korrigieren, wenn angenommen werden kann, dass die Temperatur gleichförmig über die Schraubenlänge ist und dem am Schraubenkopf gemessenen Wert entspricht.

Es wurde auch gezeigt, dass eventuell eingebrachte Torsionsspannungen im Falle von Stahlschrauben einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf das Messergebnis haben; für Aluminiumschrauben gilt das allerdings nicht immer.

Alle Ultraschallverfahren zur Bestimmung der Schraubenvorspannkraft basieren auf der Messung der durch das Anziehen verursachten relativen Laufzeitzunahme. Die experimentelle Ermittlung der K-Werte lässt sich auch durch das Messen der relativen Laufzeit- und der relativen Längenänderung der Schraube bewerkstelligen. Damit ist die Vorspannkraftbestimmung mittels Ultraschallverfahren rückführbar auf das Messen der relativen Änderungen von Zeit und Länge.

Die VDI/VDE 2862 „Mindestanforderungen zum Einsatz von Schraubensystemen und -werkzeugen in der Automobilindustrie“ schreibt vor: „Es werden kontinuierlich gleiche Messgrößen über mindestens zwei voneinander unabhängige Messkreise gleichzeitig aufgenommen“. Breite Verwendung finden Schraubensysteme, die in zwei unabhängigen Messkreisen das aufgebrachte Drehmoment ermitteln. Allerdings folgt daraus keine größere Sicherheit im Hinblick auf die tatsächlich aufgebrachte Vorspannkraft, denn die Reibungsverluste bleiben nach wie vor unberücksichtigt. Einige Pulsschraubensysteme ermöglichen das Einlesen der aufgebrachten Drehmomente und bieten damit die gemeinsame Darstellung mit der gemessenen Ultraschalllaufzeit. Die Abbildung 2 zeigt die Bildschirmdarstellung des IZFP Systems zur online Bestimmung der Vorspannkraft für einen io und einen nio Schraubfall. Die Beurteilung der beiden Messgrößen Laufzeit und Drehmoment, die auf unterschiedliche physikalische Effekte zurückgehen, bieten echte Redundanz im

Hinblick auf die erzielte Vorspannkraft. Im io Fall (untere Darstellung) ist ein Teil des aufgebracht Drehmomentes in Reibung übergegangen und die Ultraschalllaufzeit (gelb) hat nicht den Wert erreicht, der der vorgegeben Vorspannkraft entspricht.

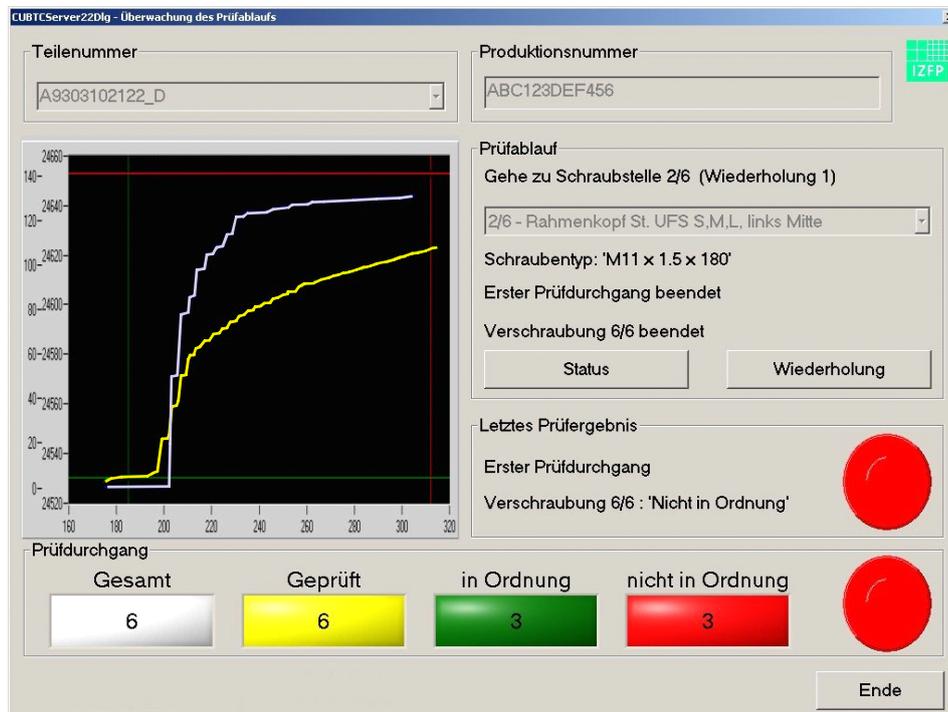
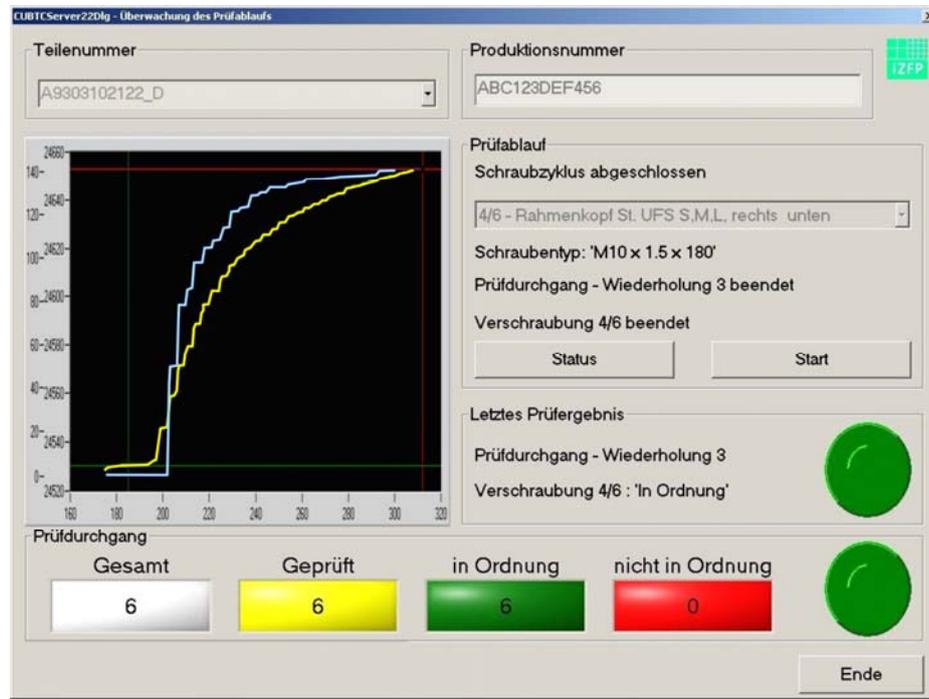


Abb. 2: Bildschirmdarstellungen des IZFP Systems für einen io (oben) und einen nio (unten) Schraubfall. Die gleichförmige Veränderung des aufgebracht Drehmomentes (blau) und der Ultraschalllaufzeit (gelb) charakterisiert den io Fall. Im nio Fall geht ein Teil des Drehmomentes in Reibung verloren; die Laufzeit erreicht nicht den Wert, der der geforderten Vorspannkraft entspricht.

3. Periodische Überprüfung der Vorspannkraft

3.1 Problemstellung

Die periodische Überprüfung der Vorspannkraft mittels Ultraschallverfahren setzt voraus, dass zumindest der Laufzeitwert bei Beendigung des Erstanzuges t_σ und der K-Wert der Schraube bekannt sind. Diese beiden Werte charakterisieren die zu überprüfende Vorspannkraft der konkreten Schraube eindeutig. Die Kenntnis der Laufzeit t_0 , die an der unbelasteten Schraube gemessen wurde, ist nicht gefordert. Aus der Differenz der Laufzeit t_σ und der Laufzeit $t_{\sigma 0}$, die bei der Überprüfung gemessen wird, kann bei Kenntnis des K-Wertes die Vorspannkraft bestimmt und die Vorspannkraftänderung quantifiziert werden. Dabei müsste weiterhin vorausgesetzt werden, dass das bei der Überprüfung genutzte Messsystem die gleiche Laufzeit und Laufzeitänderung mit der aufgebrachten Vorspannkraft messen würde wie das beim Erstanzug eingesetzte System. Diese Voraussetzung ist nicht zu erfüllen, insbesondere wenn zwischen Erstanzug und Überprüfung ein längerer Zeitraum liegt. Die Laufzeit wird unter anderem vom eingesetzten Prüfkopf beeinflusst: Schwingerdurchmesser, Mittenfrequenz, Spektrum, Pulslänge, Dämpfung bestimmen Signalfeld, Schallfeld, Signalschwächung und damit den Laufzeitmesswert, egal ob mittels Puls-Echo-Überlappung- oder Signal-Nulldurchgang- oder Amplitudenschwellen- oder Kreuz-Korrelations-Verfahren gemessen. Die Laufzeit wird auch vom genutzten Messverfahren und dem Messgerät beeinflusst.

Eine mit dem Stand der Messtechnik einfach zu realisierende Möglichkeit eröffnet sich, wenn das beim Erstanzug genutzte System bestehend aus Prüfkopf, Koppelmedium und Messgerät zur Messung der Laufzeiten an einem geeignet gewählten Kalibrierprobensatz eingesetzt werden kann. Unter Nutzung des Kalibrierkörpers können auch andere Prüfköpfe und Messgeräte im Hinblick auf die Laufzeit kalibriert werden. Es gilt also einen geeigneten Kalibrierkörper vorzuschlagen und nachzuweisen, dass Laufzeitmessungen mit hin-reichender Genauigkeit durchführbar sind.

3.2 Experimentelle Untersuchungen

Für die experimentellen Untersuchungen wurden die Stahl-Sechskant-Schrauben genutzt, die von interessierten Partnern zur Verfügung gestellt wurden. Die Tabelle 1 fasst die ursprüngliche Länge, den Durchmesser und das Länge / Durchmesser-Verhältnis zusammen. Abbildung 3 zeigt die Schrauben. Jeweils vier Exemplare der sieben Schraubentypen wurden im Hinblick auf ihre Länge ausgewählt. Ziel war dabei, die Längen so abzustimmen, dass sie den Bereich der bei der elastischen Beanspruchung auftretenden Längungen abdecken. Damit soll sichergestellt werden, dass eventuell auftretende Signalveränderungen durch die unterschiedlichen Konstellationen zwischen Schallfeld und Schraubengeometrie in den Kalibrierproben abgebildet werden.

Schraubentyp	Länge L [mm]	Durchmesser D [mm]	L/D
1	144,64	16,43	8,8
4	109,13	9,19	11,9
7	99,84	20,63	4,8
5	65,00	16,44	4,0
3	60,24	15,19	4,0
6	44,37	9,17	4,9
2	43,99	7,42	5,9

Tabelle 1: Längen, Durchmesser und Länge/Durchmesser -Verhältnis der zur experimentellen Untersuchung der erreichbaren Laufzeitmessgenauigkeit genutzten Schraubentypen.



Abb. 3: Die zur experimentellen Untersuchung der erreichbaren Laufzeitmessgenauigkeit genutzten Schraubentypen.

Die Schraubenlängen wurden so ausgewählt, dass die Länge l_0 bestmöglich der in der Spezifikation geforderten Schraubenlänge entspricht und die Längen l_ϵ den Bereich der elastischen Dehnung ϵ mit ca. 0,1%, 0,15% und 0,2% abdecken. Die Schrauben wurden nicht gedehnt, also nicht mit Spannung beaufschlagt. Ein Kalibrierprobensatz mit gedehnten Schrauben wird nicht empfohlen, da sich der Spannungszustand in den Schrauben über die Jahre abbaut oder zumindest reduziert. An jeder der 7x4 Schrauben wurden 100 Einzelmessungen der Laufzeit durchgeführt. Nach jeder Einzelmessung wurde der Prüfkopf abgehoben, das Koppelmittel Öl entfernt und wieder neu aufgebracht. Die Abbildungen 4 und 5 zeigen repräsentative Ergebnisse. In Tabelle 2 sind die Standardabweichungen [%] der 100 Einzelmessungen zusammengestellt.

Schraubentyp	Ursprüngliche Länge	Dehnungszustand 1	Dehnungszustand 2	Dehnungszustand 3
1	$\pm 0,055$	$\pm 0,031$	$\pm 0,053$	$\pm 0,039$
2	$\pm 0,074$	$\pm 0,142$	$\pm 0,080$	$\pm 0,050$
3	$\pm 0,109$	$\pm 0,112$	$\pm 0,210$	$\pm 0,123$
4	$\pm 0,109$	$\pm 0,097$	$\pm 0,090$	$\pm 0,076$
5	$\pm 0,137$	$\pm 0,193$	$\pm 0,104$	$\pm 0,168$
6	$\pm 0,344$	$\pm 0,092$	$\pm 0,201$	$\pm 0,130$
7	$\pm 0,179$	$\pm 0,178$	$\pm 0,179$	$\pm 0,204$

Tabelle 2: Standardabweichungen [%] der 100 Einzelmessungen der Laufzeiten an den jeweils 4 Schrauben der 7 Schraubentypen.

Alle Standardabweichungen sind $\leq \pm 0,21\%$; Ausnahme ist Schraubentyp 6 im Ausgangszustand mit 0,344%. Um den Wert der Standardabweichung zu beurteilen sei festgehalten, dass eine Längsspannung von 210 MPa in ferritischen Schrauben eine Schraubendehnung von 1 % verursacht. Wie aus Abbildung 1 zu ersehen, hat die Schraubendehnung von 1% eine relative Laufzeitänderung von ca. 3% zur Folge. Eine Standardabweichung von $\pm 0,3\%$ entspricht einer Unsicherheit von ± 21 MPa; bei einem Streckgrenzwert von

500 MPa sind das $\pm 4,2\%$. Die Zahlenwerte in Abbildung 1 gelten als guter Anhalt für alle bisher untersuchten ferritischen Schrauben.

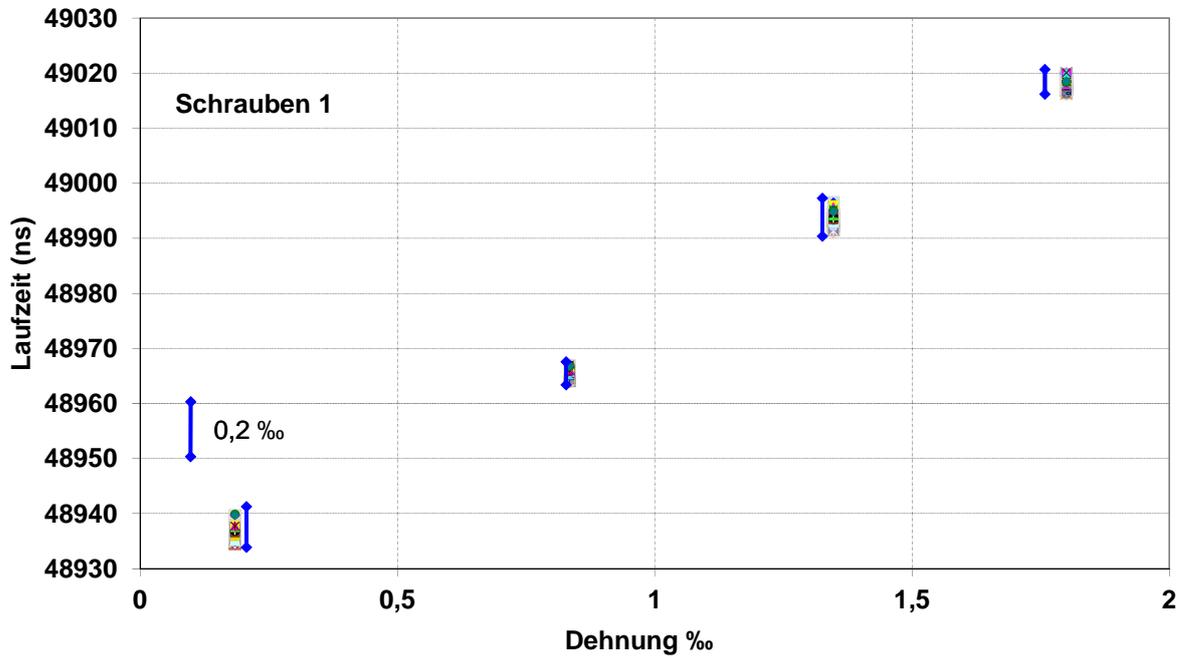


Abb. 4: Ergebnisse von 100 Einzelmessungen der Laufzeiten an den 4 Schrauben des Typs 1.

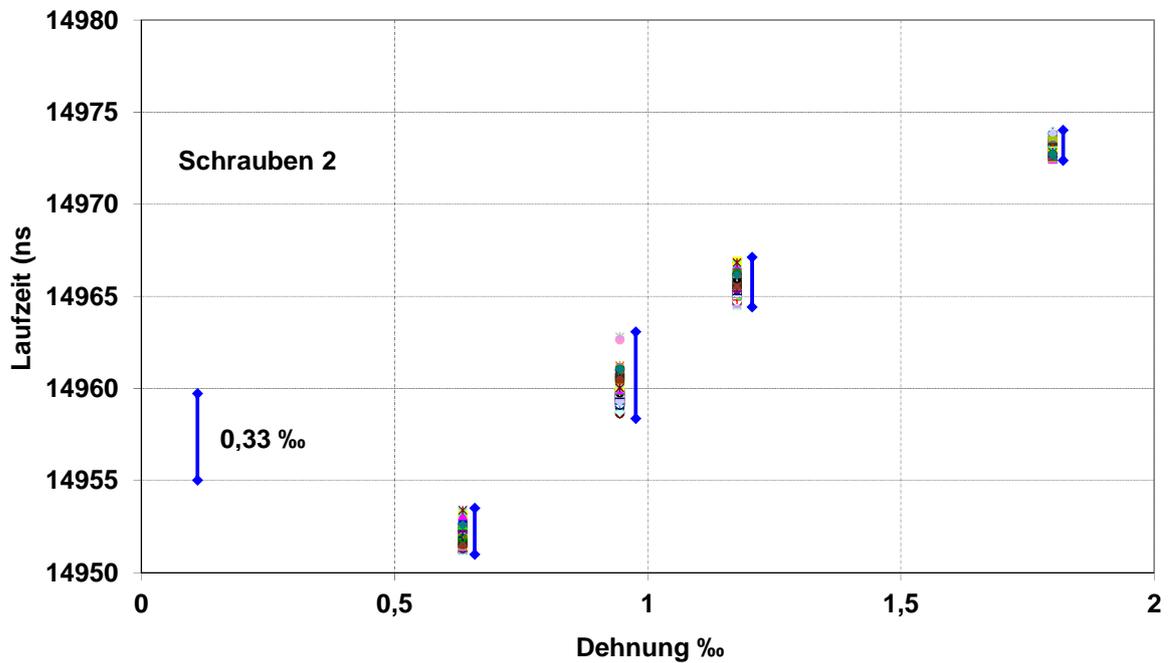


Abb. 5: Ergebnisse von 100 Einzelmessungen der Laufzeiten an den 4 Schrauben des Typs 2.

4. Schlussfolgerung

Wenn die Überprüfung der Vorspannkraft beabsichtigt ist, empfiehlt sich folgendes Vorgehen:

Bereitstellung eines Kalibrierprobensatzes aus z.B. vier Schrauben des gleichen Typs wie die, deren Vorspannkraft überprüft werden soll. Die Längen der vier Schrauben sollten den Bereich der elastischen Dehnung von 0 bis ca. 0,2% abdecken.

Messung und Dokumentation der Laufzeiten an den vier Schrauben mit dem beim Erstanzug einzusetzenden Ultraschallsystem.

Dokumentation des Laufzeitwertes, der bei Beendigung des Erstanzuges gemessen wurde.

Zur Überprüfung der Vorspannkraft sollte der gleiche Prüfkopftyp verwendet werden wie beim Erstanzug. Messung der Laufzeiten an den z. B. vier Schrauben des Kalibrierprobensatzes mit dem zur Überprüfung der Vorspannkraft ausgewählten Prüfkopf.

Bestimmung des Differenzbetrages der mit den beiden Prüfköpfen an den vier Schrauben ermittelten Laufzeiten. Mit diesem Differenzbetrag sind die im Erstanzug gemessenen Laufzeiten und die bei der Überprüfung der Vorspannkraft festgestellten ineinander überführbar.

Die Überprüfung der Vorspannkraft an einer mit dem INTELLIFAST-System angezogenen Schrauben gelingt nach gleichem Vorgehen, wenn unmittelbar nach dem Erstanzug ein geeigneter handelsüblicher Prüfkopf genutzt und die Laufzeit gemessen und dokumentiert wird.

Referenzen

- [1] <http://www.olympus-ims.com/de/35>.
- [2] G. Splitt: Schraubenspannungs-Messung mit Ultraschall - moderne Messtechnik für sichere Schraubverbindungen; DGZfP Jahrestagung 2002; DGZfP Berlin (2002).
- [3] info@intellifast.de und F. Scheuch, private Mitteilungen.
- [4] E. Schneider, R. Herzer, K.-H. Braunbach: Ultraschall-System zur on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und zur Schraubersteuerung; DGZfP Jahrestagung 2005; Berichtsband 94-CD; DGZfP Berlin (2005).
- [5] E. Schneider, R. Herzer: Ultraschall-System zur on-line Bestimmung der Schraubenvorspannkraft und zur Schraubersteuerung; zfP Zeitung 100, Juni 2006; DGZfP Berlin (2006) 40-46.
- [6] E. Schneider: Untersuchung der materialspezifischen Einflüsse und verfahrenstechnische Entwicklungen der Ultraschallverfahren zur Spannungsanalyse an Bauteilen; Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2000).