

Vorspannkraft-Monitoring mittels Ultraschallmethoden ohne Referenzmessung - verlässliche Vorspannkraftermittlung für verbaute Schraubenverbindungen

Autoren:

Simon Herter, Thomas Niwinski, Marcus Klein, Matthias Oechsner, Michael M. Becker

Beschreibung des Projektziels und Projektzusammenfassung

Ultraschallsysteme werden seit über fünfzehn Jahren zur Bestimmung der Vorspannkraft in Schrauben bei der Montage genutzt. Die kommerziell verfügbaren industriellen Systeme basieren auf Longitudinalwellen. Bei der Nutzung dieser Ein-Moden-Methode ist jedoch die Kenntnis der Referenzlaufzeit jeder Schraube im nicht verspannten Zustand und eine material- und schraubfallspezifische Kalibrierung erforderlich [1].

Ziel des Projekts war die Weiterentwicklung und Validierung einer Methode, mit der die Vorspannkraft in Schrauben auch ohne Kenntnis der Referenzlaufzeit jeder Schraube im nicht verspannten Zustand sowohl für ein dauerhaftes Monitoring als auch für stichprobenartiges Überprüfen möglich ist. Hierfür wurde die konventionelle Ultraschall-Laufzeitbestimmung um eine zweite Wellenart ergänzt. Bei der Zwei-Moden-Methode wird zusätzlich zur Longitudinalwelle auch die Transversalwelle verwendet [2]. Durch Anwendung analytischer Berechnungsverfahren kann zudem auch auf die aufwändige experimentelle Kalibrierung verzichtet werden.

Hierzu wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Schraubenwerkstoffe unterschiedlicher Festigkeitsklassen, Oberflächenschutzsysteme und Durchmesser charakterisiert. Die Bewertung erfolgte mit zunehmender Komplexität. Zunächst wurden die Einflüsse auf die akusto-elastischen Konstanten an zylindrischen Werkstoffproben ermittelt. Hierfür wurde eine umfangreiche Grundcharakterisierung durchgeführt, um auch werkstoffabhängige Einflüsse zu identifizieren. Ferner wurden zur Validierung der Zwei-Moden-Methode zahlreiche experimentelle Untersuchungen an Schrauben und Schraubenverbindungen durchgeführt. Hierbei wurden Einflüsse wie Montageverfahren (drehende und ziehende Montage), Oberflächenzustand (Korrosion), Temperatur und Belastungsart (Axial- bzw. Biegebelastung) und schraubfallspezifische Randbedingungen (Variation der Klemm-, Gewinde- und Schaftlänge) untersucht. Neben den möglichen schraubenbezogenen Einflussfaktoren existieren im Rahmen der Ultraschall-Laufzeitmessung ebenfalls mögliche Störquellen, die sich im Rahmen der Zwei-Moden-Methode nachteilig auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse auswirken können. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projekts Methoden zur Datenverarbeitung und Erzeugung robuster Ultraschallsignale zur Optimierung hochpräziser Laufzeitmessungen entwickelt.

Stand der Technik

In den nationalen und internationalen Richtlinien zur Verwendung von Verschraubungen in Stahltragwerken [3–7] werden mehrere mechanische Verfahren gleichberechtigt zur Prüfung von vorgespannten Schraubenverbindungen vorgeschlagen. Diese Verfahren sind allerdings unmittelbare Ableitungen aus der Montage der Schraubenverbindungen und unterliegen damit denselben Einflussfaktoren hinsichtlich Reib- und Oberflächenbedingungen, Fertigungstoleranzen sowie Umwelteinflüssen. Die Funktionsfähigkeit einer Schraubenverbindung hängt von einer prozesssicher aufzubringenden Montagevorspannkraft, den Setzkräften und der daraus resultierenden Vorspannkraft ab. Hierbei muss die resultierende Vorspannkraft ausreichend hoch sein, damit die

Betriebssicherheit der Schraubenverbindung gegeben ist und es nicht zum Ausfall der Verbindung durch Dauerbruch oder selbsttätigem Lösen kommt [8]. Bei den heute allgemein etablierten Montageverfahren (Drehmoment-, Drehwinkel- oder Streckgrenzverfahren) erfolgt die Messung der Vorspannkraft nicht direkt, sondern über die Steuerung und Überwachung von Prozessparametern, wie dem Drehmoment, dem Drehwinkel, der Einschraubtiefe oder der Einschraubzeit [9]. Eine direkte Messung ist durch Applikation von Dehnungsmessstreifen (DMS) oder durch Kraftmessringe möglich. Diese Methoden eignen sich jedoch eher für Laborversuche und nicht für die Serienanwendung. Zudem haben sie den Nachteil, dass sich durch notwendige Modifikationen an der Schraube für die DMS-Messung oder durch das Einbringen zusätzlicher Klemmteile (Kraftmessring) die Steifigkeit des Gesamtsystems ändern und die Messergebnisse somit nicht mehr auf den eigentlichen Schraubfall in allen Eigenschaften übertragbar sind.

Ultraschallmethoden zur Vorspannkraftbestimmung sind in Form der Ein-Moden-Methode seit vielen Jahren Stand der Technik, jedoch ohne normativen Rahmen. Im einfachsten Fall wird die Laufzeit t_L einer Longitudinalwelle entsprechend Abbildung 1 ausgewertet.

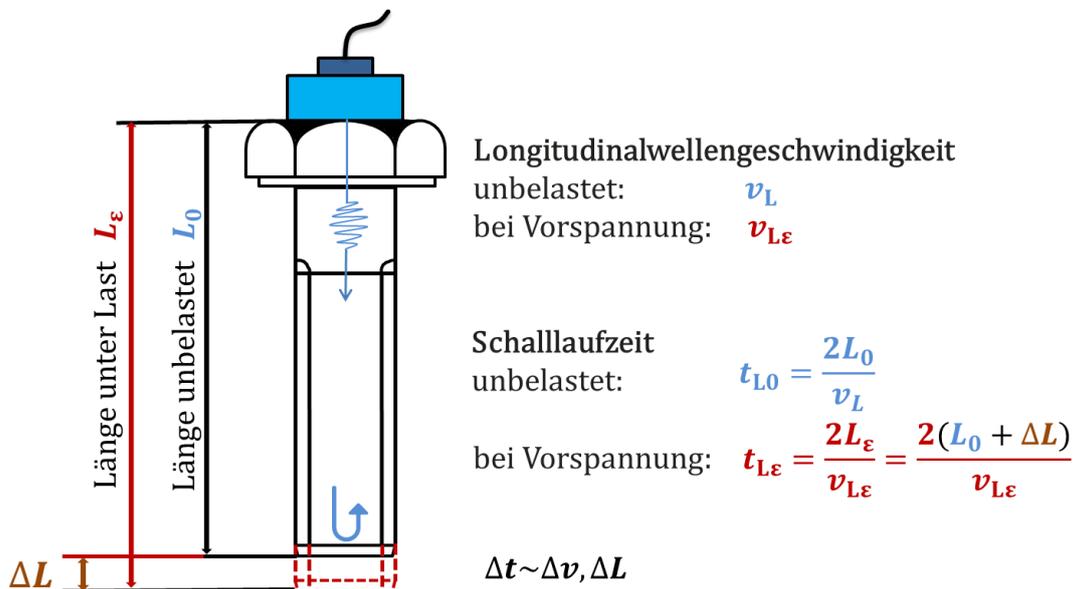


Abbildung 1: Prinzip der ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung in Schrauben in Anlehnung an [1]

Wenn die Schraube im nicht verspannten Zustand die Länge L_0 hat, so beträgt die Laufzeit der Longitudinalwelle im Puls-Echo-Modus:

$$t_{L0} = \frac{2L_0}{v_L}$$

mit der Longitudinalwellengeschwindigkeit v_L . Durch die Montage und die dadurch wirkende mechanische Spannung in Längsrichtung dehnt sich die Schraube um ΔL . Die Laufzeit im vorgespannten Zustand beträgt daher:

$$t_{L\epsilon} = \frac{2(L_0 + \Delta L)}{v_{L\epsilon}}$$

Wie die voranstehende Gleichung zeigt, ändert sich nicht nur der Schallweg, sondern auch die Schallgeschwindigkeit aufgrund der Spannung. Dies gilt gleichermaßen für die Schallgeschwindigkeit einer linear polarisierten Transversalwelle, die den gleichen Schallweg und die gleiche Längsspannung erfährt und ist auf den akusto-elastischen Effekt zurückzuführen. Lediglich der Grad der Änderung der Schallgeschwindigkeit ist aufgrund anderer mechanischer Randbedingungen bei dieser Wellenart um ungefähr zwei Größenordnungen kleiner im Vergleich zur Longitudinalwelle. Die Herleitung dieser

Zusammenhänge aus den elastischen Konstanten 3. Ordnung wurden durch Hughes und Kelly [10] bereits 1953 beschrieben. In Abbildung 2 sind die Effekte der Längung sowie die additiven Auswirkungen des akusto-elastischen Effekts auf Longitudinal- und Transversalwellen qualitativ dargestellt.

Durchlaufen die beiden Wellenarten im selben Material die gleiche Strecke s , so benötigen sie verschiedene Zeiten (t_L , t_T) denn ihre Geschwindigkeiten (v_L , v_T) unterscheiden sich. Der Quotient Q der Ausbreitungsgeschwindigkeiten hängt jedoch nicht von der Strecke s ab und ist ein Materialparameter, der nur von der Querkontraktion ν im lastfreien Fall abhängig ist:

$$\frac{v_T}{v_L} = \frac{\frac{s}{t_{T0}}}{\frac{s}{t_{L0}}} = \frac{t_{L0}}{t_{T0}} = \sqrt{\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)}} = Q$$

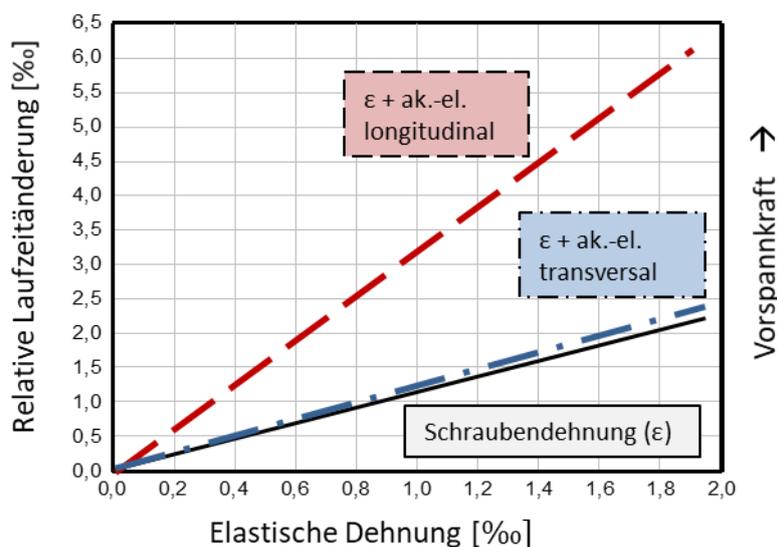


Abbildung 2: Repräsentativer Verlauf der Änderung der Schalllaufzeiten für longitudinale und transversale Ultraschallwellen in Abhängigkeit der elastischen Schraubendehnung.

Die Ermittlung der Vorspannkraft ist somit durch die Beschreibung des akusto-elastischen Verhaltens beider Wellenarten theoretisch auch ohne die Kenntnis der tatsächlich vorliegenden durchschallten Länge einer Schraubenverbindung möglich. Auf der Basis existierender Methoden zur Ultraschallwellenanregung mittels piezoelektrischer und elektromagnetischer Wechselwirkung wurde im Rahmen des Projekts die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Theorie geprüft sowie Vorgehensweisen zur Verbesserung erforscht und Handhabungsvorgaben für Anwender entwickelt.

Allgemeine Einflussfaktoren auf die akusto-elastischen Konstanten

Mögliche Einflüsse auf die akusto-elastischen Konstanten (K -Werte) wurden an zylindrischen Werkstoffproben systematisch untersucht und bewertet. Hierzu wurden Proben verschiedener Schraubenwerkstoffe, Festigkeitsklassen, Oberflächenschutzsysteme und Durchmesser verwendet. Die zylindrischen Werkstoffproben mit beidseitigem Gewinde wurden in einer Universalprüfmaschine eingespannt und kontinuierlich im elastischen Bereich axial belastet. Gleichzeitig wurden die Laufzeitzunahmen der Longitudinal- und Transversalwelle mit der Puls-Echo-Methode gemessen. Es wurden separate Wandler mit entsprechenden Koppelmitteln zur Anregung der Longitudinal- und Transversalwellen verwendet und am Probenkopf mit magnetischen Haltern appliziert.

Repräsentative Ergebnisse der ermittelten K -Werte an zylindrischen Werkstoffproben mit Nenndurchmesser M16 aus 32CrB4 (1.7076) sind in Abbildung 3 in einem Säulendiagramm, getrennt nach Festigkeitsklasse, Oberflächenschutzsystem und Wellenart, dargestellt. Die Messungen wurden an jeweils 5 zylindrischen Werkstoffproben derselben Variante durchgeführt.

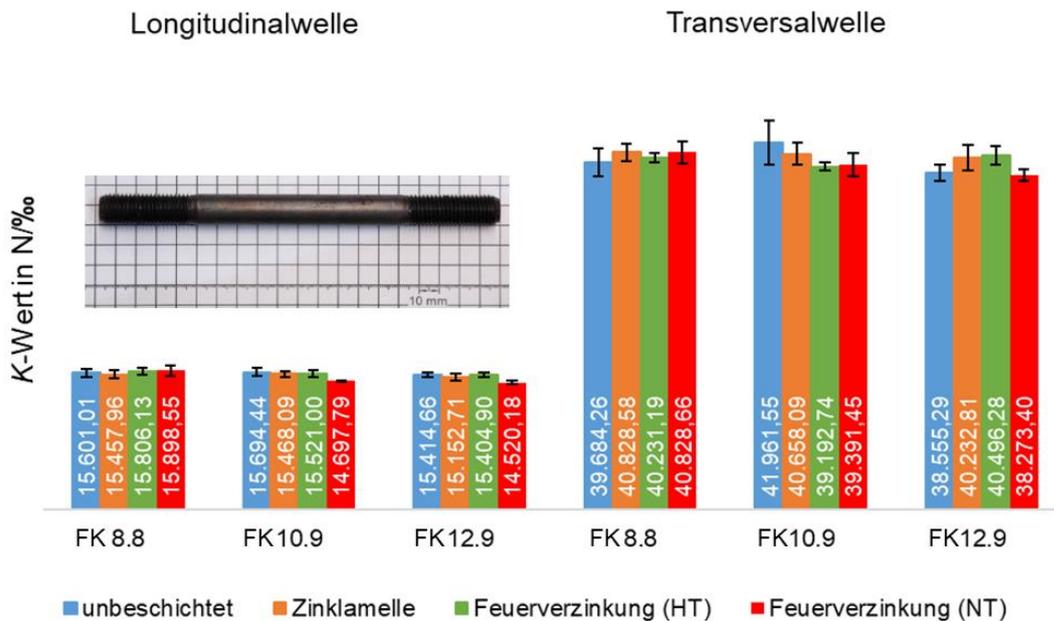


Abbildung 3: Akusto-elastische Konstanten (K -Werte): 32CrB4, zylindrische Werkstoffproben M16

Vergleicht man die ermittelten K -Werte untereinander, so lässt sich erkennen, dass weder die Festigkeitsklasse noch das Oberflächenschutzsystem einen signifikanten Einfluss auf die K -Werte haben. Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde neben dem Oberflächenschutzsystem auch der Schraubenwerkstoff variiert. Die Versuche erfolgten an zylindrischen Werkstoffproben identischer Geometrie aus 32CrB4 (1.7076) und 33MnCrB5-2 (1.7185). Es konnte gezeigt werden, dass weder das Oberflächenschutzsystem noch die Stahlzusammensetzung einen signifikanten Einfluss auf die K -Werte haben.

Geometrie und Spannungsverteilung

Neben den beschriebenen untersuchten Einflussfaktoren, wurden auch die geometrischen Einflussfaktoren auf die akusto-elastischen Konstanten (K -Werte) untersucht. Hierfür wurde der Spannungsverlauf für verschiedene Schraubverbindungen entlang der Schraubenmittellinie berechnet.

Für die Simulation wurde die Schraube in drei Module unterteilt (Kopf-, Schaft- und Gewindemodul), in denen jeweils die Auswirkung der Geometrie auf den Spannungsverlauf untersucht wurde. Die Simulation des Kopf- und Gewindemoduls erfolgte mittels Finite-Elemente-Methode. Das Schaftmodul lässt sich mit dem Nenndurchmesser analytisch berechnen. Der modulare Aufbau der Schraube, sowie eine beispielhafte Simulation der einzelnen Modulbausteine ist in Abbildung 4 dargestellt.

Ausgehend von diesen Simulationen kann der Flächeninhalt unterhalb des Spannungsverlaufs der Schraubenmittellinie bestimmt werden. Für gängige Schraubengeometrien wurden numerische Gleichungen hergeleitet, die eine Ermittlung des Flächeninhaltes mit Kenntnis geometrischer Kenngrößen, wie beispielsweise der Kopfgeometrie, erlauben. Im Anschluss erfolgt der Vergleich des Spannungsverlaufes der jeweiligen Schraubverbindung mit einem idealen Bolzen gleicher Länge. Die

Ermittlung des Geometriefaktors erfolgt durch Division, wobei die beiden Spannungsverläufe zuvor auf die Schaftspannung normiert werden. Eine ausführliche Beschreibung und Herleitung der Geometriekompensation und der geometrischen Einflüsse auf die akusto-elastischen Kennwerte kann [11] und [12] entnommen werden.

Der schraubfallspezifische K -Wert setzt sich aus einem materialspezifischen und einem geometriespezifischen Anteil zusammen, wobei letzterer sich wiederum aus dem Referenzquerschnitt und dem Geometriefaktor zusammensetzt. Die Berechnung des Referenzquerschnitts ist an VDI 2230 angelehnt. Eine detaillierte Beschreibung kann [12] entnommen werden.

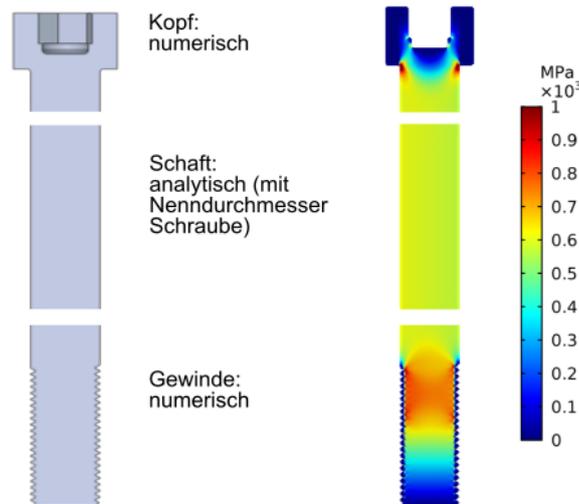


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Schraube gegliedert in ihre Modulbausteine (links) und der dazu gehörige simulierte bzw. analytisch berechnete Spannungsverlauf.

Einfluss der Belastungsart auf die ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung

Axialbelastung

Die Versuche erfolgten an unbeschichteten und feuerverzinkten HV-Garnituren, jeweils bestehend aus einer HV-Schraube M16x100 bzw. M36x220 der Festigkeitsklassen 10.9 aus 32CrB4 (1.7076), zwei HV-Scheiben und einer HV-Mutter. Die Klemmlängen betragen $l_k = 82$ mm und $l_k = 180$ mm. Es wurden jeweils 3 HV-Garnituren je Variante untersucht.

Mithilfe von Universalprüfmaschinen wurden die HV-Schrauben mit Axialkräften belastet, die den Regel-Vorspannkräften F_{p,c^*} nach DIN EN 1090-2 entsprechen, Abbildung 5 (links). An jeder HV-Schraube wurden 5 Messungen je Wellenart, bestehend aus 5 Einzelmesswerten, durchgeführt.

Repräsentativ für die Versuchsreihe werden nachfolgend die berechneten (Ultraschallverfahren) und gemessenen (Kraftmessdose) Vorspannkräfte an den feuerverzinkten M16x100 HV-Schrauben dargestellt. Zudem erfolgt noch ein Vergleich für die Vorspannkraftberechnung basierend auf der Zwei-Moden-Methode unter Verwendung von analytisch berechneten akusto-elastischen Konstanten (K -Werte) und experimentell ermittelten K -Werten. Für die Vorspannkraftbestimmung mittels der Ein-Moden-Methode wird die relative Laufzeitänderung der Longitudinalwelle mit dem K -Wert multipliziert. Für die Berechnung der Vorspannkraft auf Basis der Zwei-Moden-Methode wird der Quotient Q aus Transversalwellen- und Longitudinalwellenlaufzeit genutzt [12].

In Tabelle 1 sind die berechneten Vorspannkraften mittels beider Methoden aufgeführt. Zusätzlich ist als Vergleich die gemessene Kraft an der Universalprüfmaschine angegeben. Die K -Werte wurden analytisch berechnet.

Tabelle 1: Berechnete Kraftwerte für die M16x100 HV-Schrauben mittels der Ein- bzw. Zwei-Moden-Methode und die angezeigten Kraftwerte der Universalprüfmaschine.

Methodik	Probe 1 in kN	Probe 2 in kN	Probe 3 in kN
Kraftmessdose (Referenz)	100	100	100
Ein-Moden-Methode	108 (+8 %)	104 (+4 %)	108 (+8%)
Zwei-Moden-Methode	118 (+18 %)	122 (+22 %)	114 (+14 %)

In Tabelle 2 sind die berechneten Kräfte für die Zwei-Moden-Methode, einerseits mittels der experimentell bestimmten akusto-elastischen Konstanten (K -Werte), andererseits mit den analytisch berechneten K -Werten, im Vergleich zur angezeigten Kraft der Universalprüfmaschine angegeben.

Tabelle 2: Berechnete Kraftwerte für die M16x100 HV-Schrauben mittels der Zwei-Moden-Methode unter Verwendung der experimentell bestimmten K -Werte für die Transversal- und Longitudinalwelle und die angezeigten Kraftwerte der Universalprüfmaschine.

Schraubfall	Probe 1 in kN	Probe 2 in kN	Probe 3 in kN
Kraftmessdose (Referenz)	100	100	100
Zwei-Moden-Methode (experimentell ermittelt)	101 (+1 %)	104 (+4 %)	98 (-2 %)
Zwei-Moden-Methode (analytisch berechnet)	118 (+18 %)	122 (+22 %)	114 (+14 %)

Die Ergebnisse belegen, dass die Ein-Moden-Methode in Kombination mit den analytisch berechneten K -Werten bereits sehr geringe Abweichungen von maximal ca. 8 % zu der Kraftmessdose der Universalprüfmaschine, die als Referenz dient, aufweist. Ausgehend von analytisch berechneten K -Werten weist die Zwei-Moden-Methode eine größere Abweichung von bis zu 22 % auf. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass die Verwendung von experimentell ermittelten K -Werten zu einer deutlichen Steigerung der Genauigkeit führt, so dass lediglich Abweichungen von max. 4 % unter Verwendung der experimentell gemessenen K -Werte vorliegen. Folglich kann je nach geforderter Präzision der Messung eine analytische oder experimentelle Bestimmung der K -Werte erfolgen. Eine Steigerung der analytisch berechneten K -Werte kann durch präzise Ermittlung der benötigten geometrischen Kenngrößen erreicht werden.

Biegebelastung

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde untersucht, welchen Einfluss eine zur Axialbelastung überlagerte Biegebelastung auf die ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung hat. Die Versuche erfolgten an einer feuerverzinkten HV-Garnitur, bestehend aus einer HV-Schraube M16x100 der Festigkeitsklasse 10.9 aus 32CrB4 (1.7076), zwei HV-Scheiben und einer HV-Mutter. Mit der HV-Garnitur wurde eine Biegevorrichtung mit einer Klemmlänge $l_k = 82$ mm verschraubt, Abbildung 5 (rechts). Die HV-Schraube wurde im Bereich des Schafts auf $d = 12$ mm abgedreht, um Dehnungsmessstreifen (DMS) anbringen zu können. Mit den mittels DMS gemessenen Dehnungen an der Biegezug- und Biegedruckseite wurde die Kraft in der Schraubenlängsachse berechnet.

Mit einer Universalprüfmaschine wurde die Verbindung mit einer exzentrischen Zusatzkraft Z belastet. Es wurden zwei unterschiedliche Zusatzkraftniveaus (15 kN und 20 kN) geprüft. Der Schaft wies dabei zu jeder Zeit eine rein elastische Beanspruchung auf. Als Abbruchkriterium wurde das Klaffen der Fuge definiert, welches bei $Z = 20$ kN auftrat. Die K -Werte wurden analytisch berechnet.

Tabelle 3: Vergleich der berechneten (Ein- bzw. Zwei-Moden-Methode) und gemessenen (DMS) Vorspannkraft unter Biegebelastung.

Exzentrische Zusatzkraft	Dehnungsmesstreifen (Referenz)	Ein-Moden-Methode	Zwei-Moden-Methode
Z = 0 kN	44,7 kN	45,0 kN (+0,7 %)	46,6 kN (+4,3 %)
Z = 15 kN	63,3 kN	63,4 kN (+0,2 %)	65,0 kN (+2,7 %)
Z = 20 kN	80,5 kN	82,4 kN (+2,4 %)	86,5 kN (+7,5 %)

Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die mittels Ein- bzw. Zwei-Moden-Methode gemessenen Vorspannkraft mit den mittels DMS ermittelten Kraftwerten sehr gut übereinstimmen, wenn keine Biegebelastung ($Z = 0$ kN) vorhanden ist. Die Abweichung liegt bei beiden Methoden unter 7,5 %. Die Abweichungen der mittels Ultraschallmethoden gemessenen Kräfte werden bei zunehmender Biegebelastung hauptsächlich für die Zwei-Moden-Methode größer. Die Ein-Moden-Methode liefert auch bei größeren Biegebelastungen sehr präzise Ergebnisse mit einer Abweichung von lediglich 2,4 %. Diese Beobachtung lässt sich auf den Sachverhalt zurückführen, dass die Transversalwelle stärker von einer Biegespannung beeinflusst wird, als die Longitudinalwelle.

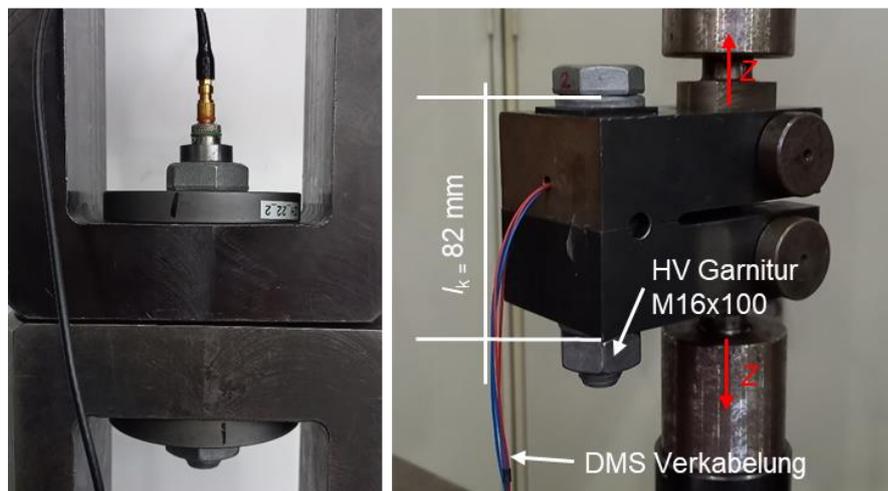


Abbildung 5: Prüfaufbau: Axialbelastung (links) und überlagerte Biegebelastung (rechts).

Optimierungspotential der Ultraschallmessung:

Bedingt durch die komplexe Geometrie von Schrauben unterliegt die Ultraschalllaufzeitmessung Störeffekten, wie z. B. Streuung, Interferenzen und Modenkonversion. Hierdurch ergeben sich Veränderungen in den Signalformen der Rückwandechos, wodurch die Selbstähnlichkeit der ersten beiden Rückwandechos Mehrdeutigkeiten aufweisen kann. Folglich ist die Laufzeitmessung nicht immer eindeutig. Besonders für den Fall der referenzlosen Zwei-Moden-Methode ist die Beurteilung der Laufzeitmessung hinsichtlich der Mehrdeutigkeiten nicht mehr für den Prüfer mittels einer Plausibilitätsüberprüfung möglich, da keinerlei Zusatzinformationen über die Schraubenverbindung bekannt sind. Die Mehrdeutigkeiten führen zu Laufzeitverschiebungen, die wiederum mit der Phase und der Frequenz des verwendeten Ultraschallsensors korrelieren. Sie liegen meist deutlich unterhalb der Laufzeitvariation durch die Längentoleranzen der Verbindungselemente.

Generell gibt es zwei Möglichkeiten den Einfluss dieser Mehrdeutigkeiten auf die Laufzeitmessung zu eliminieren. Einerseits können die Mehrdeutigkeiten mittels maschinellem Lernen detektiert werden,

indem die Signale vorverarbeitet werden, beispielsweise mithilfe einer Unabhängigkeitsanalyse (englisch: Independent Component Analysis, ICA) [13]. Andererseits kann versucht werden die Entstehung der Mehrdeutigkeiten zu reduzieren. Dies kann mittels „Coded Excitation“ umgesetzt werden [14].

Auf Basis der maschinellen Lernalgorithmen können die Laufzeitmessungen sowohl für Longitudinal- als auch für Transversalwellen in valide und invalide Messungen eingeteilt werden. Hierdurch werden die Fehlmessungen automatisch aussortiert und die Vorspannkraftbestimmung wird zuverlässiger. Tabelle 4 gibt die erzielten Klassifikationsgenauigkeiten für ein Modell an, das die Unabhängigkeitsanalyse (ICA) zur Datenverarbeitung als Vorverarbeitung nutzt. Die genauen Ergebnisse sowie die detaillierte Zusammenfassung der Trainings- und Testdatensets können [13] entnommen werden. Die False Discovery Rate (FDR) gibt den Anteil der invaliden Messungen an, die als valide Messungen klassifiziert wurden und somit zu einer falschen Vorspannkraft führen würden. Die Detektionsgenauigkeit gibt die Genauigkeit der Modelle über alle Messungen an.

Tabelle 4: Erreichte Detektionsgenauigkeit der Laufzeitmessungsklassifizierung sowie die False Discovery Rate (FDR) jeweils für die Longitudinal- und die Transversalwelle.

Wellenart	Detektionsgenauigkeit in %	False Discovery Rate in %
Longitudinalwelle	98,83	0
Transversalwelle	99,92	1,24

Mittels „Coded Excitation“ wird die Ultraschallerzeugung durch gezielt gesteuerte Anregung der piezoelektrischen Wandler so optimiert, dass die Selbstähnlichkeit zwischen den beiden Rückwandechos stabil ist. Somit kommt es nicht zur Ausbildung von Mehrdeutigkeiten in den Signalen und eine robuste Laufzeitmessung ist gewährleistet. Das absolute Nebenmaximum kann um 37 % und das positive Nebenmaximum kann bis zu 64 % reduziert werden. Durch die Verringerung der Nebenmaxima der Kreuzkorrelationsfunktion wird die Mehrdeutigkeit drastisch reduziert und die Zuverlässigkeit der Laufzeitmessung kann deutlich gesteigert werden, da keine Fehlinterpretation in den Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion erfolgen kann [14].

Ausblick und Verbesserungspotential

Die Laufzeitmessung bildet das zentrale Element der ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung. Aktuell hat die kreuzkorrelationsbasierte Laufzeitmessung den Nachteil, dass diese Mehrdeutigkeiten in der Auswertefunktion beinhaltet, so dass es zu unplausiblen Messwerten kommen kann.

In weiterführenden Untersuchungen wäre eine systematische Untersuchung des Einflusses von überelastischen Anziehverfahren von großem praktischem Interesse. Zudem könnten weitere Versuche mit Biegebelastung durchgeführt werden, insbesondere bei langen Schrauben, welche bereits aufgrund von Montageimperfektionen bzw. Winkelschiefstellungen ein statisches Biegemoment aufweisen.

Im Rahmen des Projekts wurde die Ultraschallmethode an Schrauben erprobt, die einer statischen Belastung unterlagen. Eine Untersuchung von zyklischen Belastungsvarianten wäre vor allem hinsichtlich möglicher systematischer Erkenntnisse zur Erkennung von Überlasten und dem Verhalten bei zyklischem Vorspannkraftverlust interessant.

Förderhinweis:

Das IGF-Vorhaben Nr.: 19671 N / DVS-Nr.: V 4.019 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

1. E. Schneider, H.-R. Herzer, K.H. Braunbach (2004) Online-Bestimmung der Schraubenvorspannkraft bei stationären und handgeführten Schraubern, VDI Wissensforum IWB GmbH, Windkraftanlagen, Sicherheit und Zuverlässigkeit. Vortrag 12, Düsseldorf
2. M.M. Becker, N. Groß, R. Herzer (2016) Determination of preload in bolts by ultrasound without referencing in unloaded state. Proc. 19th World Conference on Non-Destructive Testing
3. RESEARCH COUNCIL ON STRUCTURAL CONNECTIONS (RCSC), American Institute of Steel Construction (2000) Specification for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts
4. Deutsches Institut für Normung e.V. (2015) DIN EN 1090-2. Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken - Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche und Englische Fassung prEN 1090-2. Beuth Verlag, Berlin
5. DIN EN 1090-2:2015 (2015) Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken
6. DIN EN ISO 19902:2014 (2014) Petroleum and natural gas industries - Fixed steel offshore structures
7. DVS Richtlinie 1820 (2016) Zerstörungsfreie Prüfung von Offshore - Windenergieanlagen
8. K.-H. Kloos WT (2007) Schraubenverbindungen - Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung, 5. Aufl. Springer-Verlag, Berlin
9. Deutscher Schraubenverband e.V (2007) ICS Handbuch Industrielle Schraubmontage. MÖNNIG-Verlag, Iserlohn
10. Hughes DS, Kelly JL (1953) Second-Order Elastic Deformation of Solids. Phys. Rev. 92(5):1145–1149. doi:10.1103/PhysRev.92.1145
11. Groß N, Becker M, Rabe U (2018) Analytische Korrektur geometriespezifischer Einflüsse auf die Vorspannkraftbestimmung in Schraubenverbindungen mittels Ultraschallmethoden Schraubenverbindungen 2018. VDI Verlag, S 271–275
12. Herter S, Niwinski T, Klein M, Becker MM (2021) Sichere Offshore-Schraubenverbindungen - verlässliche Überwachung der Vorspannkraft mit Ultraschall. Fraunhofer-Publica. Fraunhofer-Publica
13. Herter S, Youssef S, Becker MM, Fischer SCL (2021) Machine Learning Based Preprocessing to Ensure Validity of Cross-Correlated Ultrasound Signals for Time-of-Flight Measurements. J Nondestruct Eval 40(1). doi:10.1007/s10921-020-00745-7
14. Schäfer M, Theado H, Becker MM, Fischer SCL (2021) Optimization of the Unambiguity of Cross-Correlated Ultrasonic Signals through Coded Excitation Sequences for Robust Time-of-Flight Measurements. Signals 2(2):366–377. doi:10.3390/signals2020023