



## ARTICLE

# Ultraschallbasierte *in situ* Vorspannkraftermittlung an Schrauben ohne Referenzmessung im nicht verspannten Zustand durch Kombination von Longitudinal- und Transversalwellen

## Ultrasonic *in situ* evaluation of the bolt preload without referencing an unloaded state using a combination of longitudinal and transverse waves

T. J. Niwinski<sup>1</sup>  | F. Kraemer<sup>1</sup>  | M. Klein<sup>1</sup> | M. Oechsner<sup>1</sup> | S. Herter<sup>2</sup> | M. M. Becker<sup>2</sup>

*Ausgewählter Beitrag von der 13. Informations- und Diskussionsveranstaltung SCHRAUBENVERBINDUNGEN des deutschen Schraubenverbandes (DSV) und des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) der TU Darmstadt am 23./24.06.2021*

*Selected contribution from the 13th information and discussion event BOLTED CONNECTIONS of the German Fastener Association (DSV) and the Center for Structural Materials (MPA-IfW) of the TU Darmstadt on 23./24.06.2021*

<sup>1</sup>Technische Universität Darmstadt, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW), Darmstadt, Deutschland

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Campus E3 1, Saarbrücken, Deutschland

### Correspondence

T. J. Niwinski, Technische Universität Darmstadt, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW), Grafenstraße 2, 64283, Darmstadt, Deutschland.  
Email: niwinski.thomas@gmail.com

### Funding information

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF); Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

### Abstract

Die ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung an Schrauben wird derzeit überwiegend mit der Ein-Moden-Methode realisiert. Diese Methode basiert auf der Laufzeitmessung von Longitudinalwellen. Hierbei ist für jede Schraube eine Referenzmessung im nicht verspannten Zustand notwendig. In der vorliegenden Publikation wird die Ein-Moden-Methode um eine weitere Ultraschallwellenart, die Transversalwelle, ergänzt. Es wird dargestellt, dass mit der Zwei-Moden-Methode auf eine Referenzmessung im nicht verspannten Zustand verzichtet werden kann. Ein analytisches Verfahren zur Bestimmung des schraubfallspezifischen akusto-elastischen Materialkennwerts ( $K$ -Wert) wird vorgestellt, welcher für die ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung notwendig ist. Die analytisch ermittelten  $K$ -Werte werden mit experimentellen  $K$ -Werten aus Zugversuchen an Schrauben verglichen. Der Einfluss von Werkstoff, Festigkeitsklasse und Oberflächenschutzsystem wurde an zylindrischen Werkstoffproben ermittelt. In Bauteilversuchen wurden Vorspannkraft an montierten Schrauben mit der Zwei-Moden-Methode ermittelt, ein möglicher Einfluss des Montageverfahrens untersucht und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeit interpretiert.

Dieser Open Access Beitrag steht unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die jede Nutzung des Beitrags in allen Medien gestattet, sofern der ursprüngliche Beitrag ordnungsgemäß zitiert wird.

© 2023 Die Autoren. *Materialwiss. Werkstofftech.* veröffentlicht von Wiley-VCH GmbH.

**SCHLÜSSELWÖRTER**

akusto-elastische Konstanten, Longitudinal- und Transversalwelle, Schraubenverbindung, ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung, Zwei-Moden-Methode

**Abstract**

Ultrasonic based bolt preload evaluation is commonly performed using the mono-wave method. This method works by measuring the time of flight of longitudinal waves. Here, a reference measurement in the unloaded condition is necessary for each bolt. In this publication the longitudinal wave is complemented by another type of ultrasonic wave - the transverse wave. This method does not require a reference measurement in the unloaded condition for each bolt. Moreover, an analytic method for determining the bolt-specific  $K$ -value is introduced, which is needed for the ultrasonic bolt preload determination. The analytically calculated  $K$ -values are compared with experimental  $K$ -values from tensile tests. The influence of material, bolt property class and surface protection system were determined with cylindrical specimens. In component tests, the bolt preload was evaluated using the bi-wave method, a possible influence of the bolt assembly method was investigated and the results were interpreted regarding their accuracy.

**KEYWORDS**

acoustoelastic constants, bi-wave method, bolted connection, longitudinal and transverse wave, ultrasonic bolt preload measurement

## 1 | EINLEITUNG

Kraft- und reibschlüssige Schraubenverbindungen sind in ihrer Zuverlässigkeit einerseits an eine korrekte Auslegung, andererseits aber auch an eine zuverlässige Aufbringung der erforderlichen Vorspannkraft gebunden. Schrauben finden in einer Vielzahl komplexer Baugruppen als Verbindungsmittel Verwendung, z. B. in Windenergieanlagen, im Kraftwerks- und Turbinenbau, der petrochemischen Industrie oder im Automobilbereich.

An diese Verbindungen werden sehr hohe Sicherheitsanforderungen gestellt, da das Versagen einer Schraube zu erheblichen wirtschaftlichen Folgeschäden durch Betriebsausfälle führen oder im schlimmsten Fall Menschenleben gefährden kann.

Zu geringe Vorspannkraften können sich negativ auf die Schwingfestigkeit von Schraubenverbindungen auswirken und somit zu einem vorzeitigen Versagen führen. Bei einer vorgespannten, exzentrisch belasteten Schraubenverbindung nimmt die auf die Schraube wirkende Zusatzkraft mit sinkender Vorspannkraft zu, wenn ein Aufklaffen der Trennfugen nicht verhindert werden kann [1–3]. Neben dem Schwingbruch als typische Versagensform bei zyklischer Belastung kann es bei zu geringen Vorspannkraften und zyklischer

transversaler Belastung auch zum selbsttätigen Losdrehen kommen [2, 4, 5].

In der Praxis werden Schraubenverbindungen bei der Montage aufgrund der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens oft drehmomentgesteuert angezogen. Beim Anziehdrehmoment handelt es sich jedoch nur um eine indirekte Größe zur Einstellung der Vorspannkraft. Durch die Streuung der Reibungszahlen im Gewinde und unter Kopf sowie durch Ungenauigkeiten der eingesetzten Werkzeuge kann es zu Abweichungen von bis zu ca. 30% bei der tatsächlich aufgebrachten Vorspannkraft kommen [6, 7]. Die direkte Vorspannkraftermittlung an Schrauben ist beispielsweise mit Dehnungsmessstreifen, Kraftmessringen oder anhand einer Messung der Längenänderung mittels Mikrometerschraube möglich. Diese Methoden erfordern jedoch entweder eine aufwendige mechanische Bearbeitung der Schrauben oder sind mit konstruktiven Veränderungen der Verbindung verbunden. Die genannten Defizite erhöhen das Interesse an alternativen Methoden zur direkten, zerstörungsfreien Vorspannkraftermittlung, vorzugsweise ohne Kenntnis über Zustandsgrößen der Schraube im nicht verspannten Zustand. Diese sollen nicht nur bei der Montage, sondern auch über die gesamte Bauteillebensdauer und für ein stichprobenartiges Überprüfen der Vorspannkraft einsetzbar sein [8]. Ultraschallbasierte Methoden zur

Ermittlung der Vorspannkraft finden seit den 1970er Jahren Anwendung [9–12].

Im Rahmen dieser Publikation werden die theoretischen Grundlagen zur ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung zusammengefasst und die in der Praxis gängige Ein-Moden-Methode, die auf der Laufzeitmessung von Longitudinalwellen basiert, vorgestellt. Es wird gezeigt, dass durch Hinzunahme einer zweiten Wellenart, einer Transversalwelle, auf eine Referenzmessung jeder Schraube im nicht verspannten Zustand verzichtet werden kann.

An zylindrischen Werkstoffproben wird der Einfluss der Festigkeitsklasse und der Werkstoffzusammensetzung, unterschiedlicher schraubentypischer Oberflächenschutzsysteme sowie des Durchmessers auf die akusto-elastischen Konstanten ( $K$ -Werte) untersucht. Diese sind zur ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung notwendig. Zudem wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem eine analytische Ermittlung des schraubfallspezifischen  $K$ -Wertes möglich ist. Dieses Verfahren kann eingesetzt werden, wenn Kalibrierversuche an bereits verbauten Schrauben im Labor nicht möglich sind. Die analytisch ermittelten  $K$ -Werte werden mit in Zugversuchen experimentell bestimmten  $K$ -Werten verglichen und hinsichtlich der Genauigkeit bewertet. Darüber hinaus wird in Bauteilversuchen der Einfluss des Montageverfahrens auf die Genauigkeit der ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung untersucht.

## 2 | ULTRASCHALLBASIERTE VORSPANNKRAFTERMITLETLUNG – STAND DER TECHNIK

### 2.1 | Theoretische Grundlagen der ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung

Nach der Hookeschen Elastizitätstheorie dürften Änderungen in der Schalllaufzeit von Ultraschallwellen eines spannungsbehafteten Körpers nur auf die daraus resultierende Dehnung, respektive Längenänderung, zurückzuführen sein. Experimentell lässt sich dies jedoch nicht bestätigen. Die Abhängigkeit zwischen Beanspruchungszustand und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen, dem akusto-elastischen Effekt, wurde bereits 1953 hergeleitet [13]. Die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwelle hängt von der Ausbreitungsrichtung der Körperschwingung und der Polarisationsrichtung der Teilchenschwingung gegenüber der Spannungsrichtung ab. Bei einer Longitudinalwelle schwingen die Teilchen in Richtung der Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwelle und bei einer

Transversalwelle senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwelle. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Longitudinalwelle  $v_{Lo}$  bzw. Transversalwelle  $v_{To}$  in einem unbelasteten, isotropen Körper lässt sich mathematisch beschreiben [14, 15]:

$$v_{Lo} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}} \tag{1}$$

$$v_{To} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0}} \tag{2}$$

Hierin sind  $\rho_0$  die Materialdichte im spannungsfreien Zustand und  $\lambda$  sowie  $\mu$  die elastischen Konstanten zweiter Ordnung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen ändert sich in Abhängigkeit des Beanspruchungszustandes. Der akusto-elastische Effekt ist dabei am stärksten bei Longitudinalwellen mit identischer Ausbreitungsrichtung zur Spannungsrichtung  $v_{11}$  ausgeprägt, Bild 1.

Die Steigungen der Geraden werden akusto-elastische Konstanten  $AEC$  genannt und lassen sich mit den elastischen Konstanten zweiter ( $\lambda, \mu$ ) und dritter ( $l, m, n$ ) Ordnung beschreiben [15]:

$$AEC_{11} = \frac{1}{\lambda + 2\mu} \left( \frac{\mu l}{\lambda + \mu} + \frac{\mu \lambda}{2(\lambda + \mu)} + 2\lambda + 5\mu + 2m \right) \tag{3}$$

$$AEC_{13} = \frac{1}{2(\lambda + \mu)} \left( m + \frac{\mu n}{4\mu} \right) + 2 \tag{4}$$

Der erste Index der akusto-elastischen Konstanten beschreibt die Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwelle

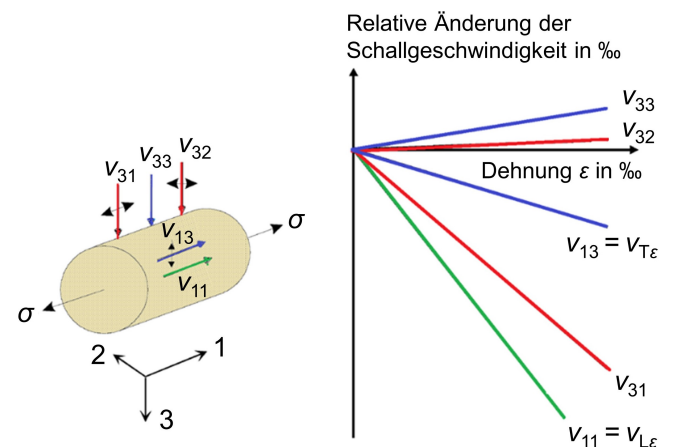


BILD 1 Moden-Abhängigkeit des akusto-elastischen Effekts (Bild in Anlehnung an [15]).

FIGURE 1 Mode dependency of the acoustoelastic effect (Figure based on [15]).

und der zweite Index die Schwingungsrichtung der Teilchen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen ist somit werkstoffabhängig. Sie nimmt für die beschriebenen Longitudinal- und Transversalwellen bei einer Zugbeanspruchung zu und bei einer Druckbeanspruchung ab. Zudem ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen temperaturabhängig, wobei eine steigende Temperatur in einer Zunahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit resultiert [14]. Der akustoelektische Effekt ist im linear-elastischen Bereich des Werkstoffverhaltens ein lineares Phänomen. Bei Überschreitung der Elastizitätsgrenze gelten die beschriebenen Abhängigkeiten zwischen Beanspruchungszustand und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen nicht mehr [13, 15]. Im Rahmen dieser Publikation wird nur der lineare Bereich behandelt.

## 2.2 | Ein-Moden-Methode

Die Abhängigkeit zwischen Beanspruchungszustand und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen wird seit den 1970er Jahren für die zerstörungsfreie Ermittlung von Kräften bzw. Spannungen genutzt [10, 15–19]. Bei kommerziell erhältlichen Ultraschallsystemen zur Vorspannkraftermittlung an Schrauben ist die Ein-Moden-Methode am gängigsten. Diese beruht auf der Messung der Laufzeitänderung nur einer Ultraschallwellenart, z. B. der Longitudinalwelle [9–12, 20]. Hierzu wird am Schraubenkopf ein Ultraschall-Sensor appliziert. Es können hierzu Ultraschallwandler eingesetzt werden, wie sie beispielsweise in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung Anwendung finden, oder auch piezoelektrische Sensoren aufgeklebt bzw. eine piezoelektrische Dünnschicht aufgesputtert werden [21]. Bei der Nutzung von Ultraschallwandlern aus der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung muss zur Überbrückung des Luftspalts zwischen Ultraschallwandler und Schraubenoberfläche ein Koppelmedium benutzt werden. Die Ultraschallwellen werden durch das Anlegen einer hochfrequenten elektrischen Wechselspannung erzeugt, wodurch das Piezoelement zum Schwingen angeregt wird. Das Prinzip basiert auf dem inversen piezoelektrischen Effekt, bei dem eine elektrische Spannung eine Verformung bei bestimmten Kristallen oder Keramiken hervorruft [14]. Die Ultraschallwelle wird von der Schraubenkuppe reflektiert und die Laufzeit wird mit der Puls-Echo-Methode ermittelt, wobei der Ultraschall-Sensor zugleich als Sender und Empfänger dient. Das Verfahren basiert auf der Referenzmessung der Laufzeit im nicht verspannten Zustand  $t_{L0}$ . Diese hängt von der Schraubenlänge  $L_0$  und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle  $v_{LE}$  des jeweiligen Werkstoffes im spannungsfreien

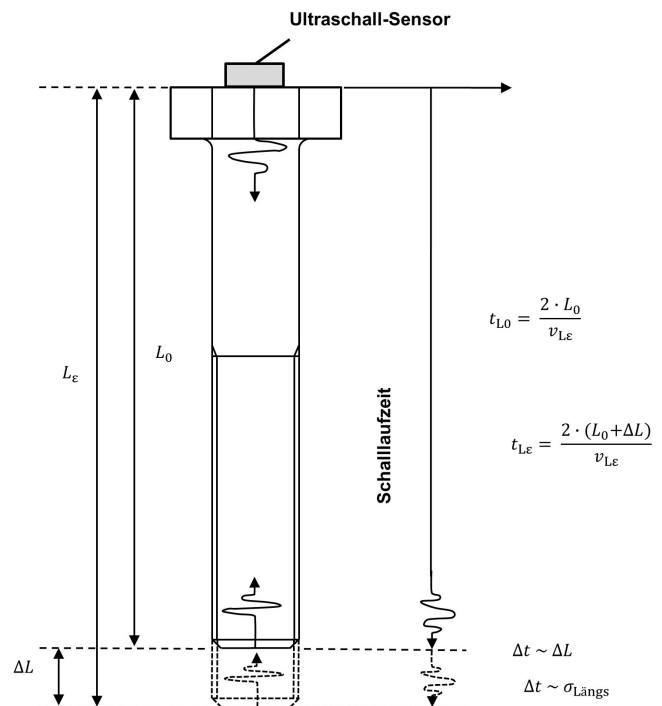
Zustand ab. Nach der Montage wird zur Kontrolle der Vorspannkraft die Laufzeit im verspannten Zustand  $t_{LE}$  gemessen, Bild 2.

Bei der Messung der Laufzeit im verspannten Zustand  $t_{LE}$  überlagern sich zwei Effekte, Bild 3. Einerseits kommt es zu einer Laufzeitzunahme aufgrund der Schraubenlängung  $\Delta L$ , andererseits verändert sich auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle  $v_{LE}$  aufgrund der Vorspannkraft und des dadurch in der Schraube wirkenden Beanspruchungszustandes  $\sigma_{L\text{ängs}}$ .

Durch eine Referenzmessung der Laufzeit im nicht verspannten Zustand  $t_{L0}$  und durch die Ermittlung der relativen Laufzeitänderung  $\Delta t/t_{L0}$  lässt sich die Vorspannkraft  $F_V$  in der Schraube bestimmen [22]:

$$F_V = K \cdot \frac{t_L - t_{L0}}{t_{L0}} = K \cdot \frac{\Delta t}{t_{L0}} \quad (5)$$

Der  $K$ -Wert dient als Proportionalitätsfaktor zwischen der relativen Laufzeitänderung  $\Delta t/t_{L0}$  und der Vorspannkraft  $F_V$  und fasst beide zur Laufzeitänderung beitragenden Effekte zusammen. Der  $K$ -Wert ist abhängig vom Werkstoff und der Geometrie des Schraubfalls (Schraubengeometrie und Klemmlänge) und muss für jeden Schraubfall individuell in Kalibrierversuchen



**BILD 2** Prinzip der ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung an Schrauben - Ein-Moden-Methode (Bild in Anlehnung an [15]).

**FIGURE 2** Principle of the ultrasonic bolt preload evaluation - one-wave method (Figure based on [15]).

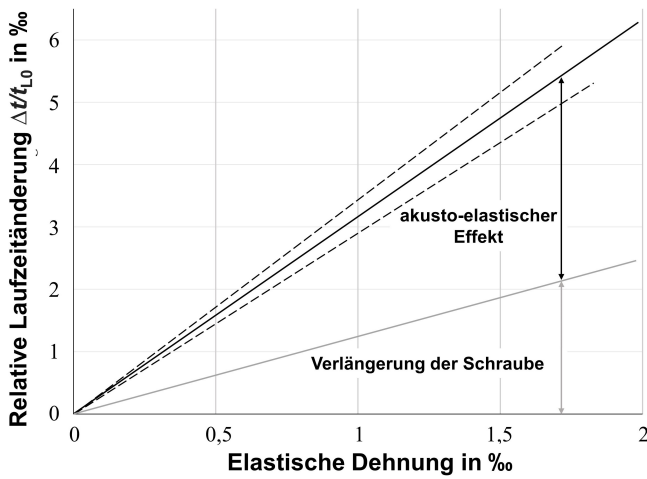


BILD 3 Relative Laufzeitänderung einer Longitudinalwelle aufgrund des akusto-elastischen Effekts und Verlängerung der Schraube (Bild in Anlehnung an [15]).

FIGURE 3 Relative change in the time of flight of a longitudinal wave due to the acoustoelastic effect and the bolt elongation (figure based on [15]).

ermittelt werden. Bei Schrauben im Einsatz, zu denen keine Referenzmessungen der Laufzeiten im nicht verspannten Zustand  $t_{L0}$  vorliegen, ist eine ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung mit dieser Methode jedoch nicht möglich.

### 2.3 | Zwei-Moden-Methode

Um auch Vorspannkraft an Schrauben ohne vorherige Referenzmessung der Laufzeit im nicht verspannten Zustand ermitteln zu können, wird die in der Ein-Moden-Methode verwendete Longitudinalwelle um eine weitere Wellenart, die Transversalwelle, ergänzt [8, 23–25]. Grundlage der Zwei-Moden-Methode ist, dass der Schallweg für beide Wellenarten identisch ist, so dass Laufzeitenänderungen lediglich auf den akusto-elastischen Effekt zurückzuführen sind. Da beide Wellenarten unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten besitzen und unterschiedlich stark auf den akusto-elastischen Effekt reagieren, lässt sich ein Proportionalitätsfaktor  $Q$  definieren, der von der Länge der Schraube  $L$  unabhängig ist [22]:

$$Q = \frac{v_L}{v_T} = \frac{\frac{L}{t_L}}{\frac{L}{t_T}} = \frac{t_T}{t_L} \quad (6)$$

Die Vorspannkraft  $F_V$  lässt sich als lineare Funktion des  $Q$ -Wertes definieren [22]:

$$F_V(Q) = (Q - Q_0) \quad (7)$$

mit [22]:

$$Q_0 = \frac{t_{T0}}{t_{L0}} \quad (8)$$

Die Steigung der Geraden des  $Q$ -Wertes  $S$  lässt sich mithilfe der schraubfallspezifischen akusto-elastischen Konstanten der Longitudinalwelle  $K_{L, \text{Schraubfall}}$  und der Transversalwelle  $K_{T, \text{Schraubfall}}$  bestimmen [22]:

$$S = \frac{Q - Q_0}{F - F_0} \quad (9)$$

mit [22]:

$$Q = \frac{\frac{F \cdot t_{T0}}{K_{T, \text{Schraubfall}}} + t_{T0}}{\frac{F \cdot t_{L0}}{K_{L, \text{Schraubfall}}} + t_{L0}} \quad (10)$$

Hierbei ist  $F$  eine frei wählbare Kraft unterhalb der Streckgrenze des Schraubenwerkstoffes und  $F_0$  die zur Bestimmung von  $Q_0$  zugehörige Kraft (in diesem Fall 0 kN). Für die Zwei-Moden-Methode ist aufgrund der Längenunabhängigkeit nur noch eine Schraube zur Bestimmung von  $Q_0$  im nicht verspannten Zustand notwendig. Diese kann beispielsweise dem Lagerbestand entnommen oder aus der Konstruktion ausgebaut werden. An allen weiteren Schrauben desselben Typs kann die Vorspannkraft dann aber ohne vorherige Referenzmessung im nicht verspannten Zustand ermittelt werden.

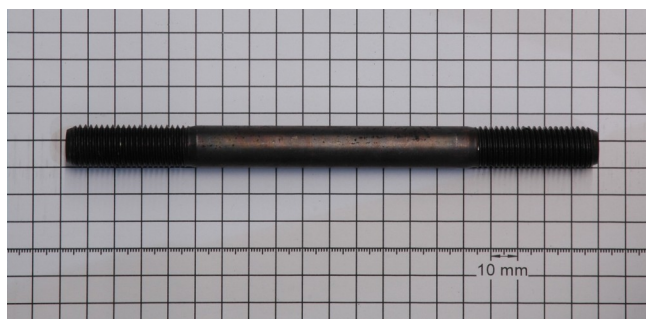
## 3 | UNTERSUCHUNGEN AN ZYLINDRISCHEN WERKSTOFFPROBEN

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. Nachstehend sind die für die im Rahmen dieser Publikation vorgestellten Ergebnisse relevanten Kennwerte der zylindrischen Werkstoffproben

aufgeführt. Weitere Ergebnisse können dem Abschlussbericht des Forschungsprojektes entnommen werden [22].

### 3.1 | Probengeometrie und -werkstoffe

In den experimentellen Untersuchungen wurden zylindrische Werkstoffproben aus einem für die Schraubenherstellung typischen chrom- und borlegierten Stahl 32CrB4 (1.7076) nach DIN EN 10263-4 in den Festigkeitsklassen (FK) 8.8, 10.9 und 12.9 mit einem Nenn-durchmesser M16 verwendet [26], Bild 4. Alle zylindrischen Werkstoffproben stammen aus derselben Charge und sind gemäß der Festigkeitsklasse unterschiedlich schlussvergütet. Zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte der verwendeten zylindrischen Werkstoffproben wurden Zugversuche nach DIN EN ISO 898-1 und DIN EN ISO 6892-1 an jeweils 5 unbeschichteten Zugproben, welche aus unbeschichteten Schrauben



**BILD 4** Geometrie der zylindrischen Werkstoffproben, Werkstoff 32CrB4, Nenn-durchmesser M16, Festigkeitsklassen (FK) 8.8, 10.9 und 12.9.

**FIGURE 4** Geometry of cylindrical specimens, material 32CrB4, nominal diameter M16, property classes (FK) 8.8, 10.9 and 12.9.

**TABELLE 1** Ergebnisse der Zugversuche an abgedrehten Proben, Werkstoff 32CrB4, Nenn-durchmesser M16, Festigkeitsklassen (FK) 8.8, 10.9 und 12.9, Sollwerte nach [27].

**TABLE 1** Tensile test results, machined test pieces, material 32CrB4, nominal size M16, property classes (FK) 8.8, 10.9 and 12.9, reference values according to [27].

	Dehngrenze $R_{p0.2}$ in MPa	Zugfestigkeit $R_m$ in MPa	Bruchdehnung $A$ in %	Brucheinschnürung $Z$ in %	Elastizitätsmodul $E$ in GPa
Sollwerte FK 8.8	640	800	12,0	52	–
Mittelwert Versuch	823 ± 2	906 ± 3	19,3 ± 0,3	67 ± 1	209,0 ± 4,0
Sollwerte FK 10.9	940	1040	9,0	48	–
Mittelwert Versuch	1065 ± 6	1134 ± 3	16,5 ± 0,9	63 ± 1	208,4 ± 2,9
Sollwerte FK 12.9	1100	1220	8,0	44	–
Mittelwert Versuch	1200 ± 4	1280 ± 4	14,1 ± 0,6	61 ± 1	206,8 ± 3,4

derselben Charge hergestellt wurden, je Festigkeitsklasse durchgeführt [27, 28].

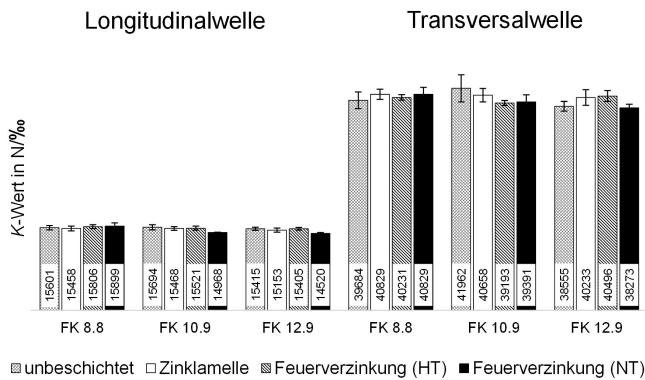
Die ermittelten Werkstoffkennwerte erfüllen die Mindestanforderungen nach DIN EN ISO 898-1 [27], Tabelle 1.

Zusätzlich zu den Zugversuchen wurden an jeder untersuchten Variante der zylindrischen Werkstoffproben Härtemessungen durchgeführt und Längs- und Querschleife im Bereich des Schaftes und des Gewindes angefertigt. Es wurden lichtmikroskopische Untersuchungen zur Beurteilung des Werkstoffgefüges, der Werkstoffhomogenität und der Korngröße durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes wurde mittels Funkenemissionsspektralanalyse bestätigt. [22] Es handelt sich um normkonformes Probenmaterial [27].

### 3.2 | Experimentelle Ermittlung der akusto-elastischen Konstanten ( $K$ -Werte) und mögliche Einflussfaktoren

Zur Ermittlung der akusto-elastischen Konstanten ( $K$ -Werte) wurden die zylindrischen Werkstoffproben mit beidseitigem Gewinde in einer Universalprüfmaschine eingespannt und bei kontinuierlich steigender Kraft im elastischen Bereich axial belastet. Gleichzeitig wurden die Laufzeitzunahmen der Longitudinal- und Transversalwellen mit der Puls-Echo-Methode gemessen. Es wurden separate Wandler mit entsprechenden Koppelmitteln zur Anregung der Longitudinal- und Transversalwellen verwendet und am Probenkopf appliziert. Die stirnseitigen Oberflächen der zylindrischen Werkstoffproben wurden für die Ultraschallmessungen nicht mechanisch bearbeitet.

Die ermittelten  $K$ -Werte sind in einem Säulendiagramm, getrennt nach Festigkeitsklasse, Oberflächenschutzsystem und Wellenart, dargestellt, Bild 5. Das arithmetische Mittel und die Standardabweichung der  $K$ -



**BILD 5** Akusto-elastische Konstanten der Longitudinal- und Transversalwelle ( $K$ -Werte): Werkstoff 32CrB4, zylindrische Werkstoffproben, verschiedene Oberflächenschutzsysteme, Nenndurchmesser M16, Festigkeitsklassen (FK) 8.8, 10.9 und 12.9.

**FIGURE 5** Acoustoelastic constants for longitudinal and transverse wave ( $K$ -values): material 32CrB4, cylindrical specimens, various surface protection systems, nominal diameter M16, property classes (FK) 8.8, 10.9 and 12.9.

Werte wurden aus je 5 Messungen an jeweils 5 zylindrischen Werkstoffproben derselben Variante gebildet. Der  $K$ -Wert besitzt die Einheit N/‰, so dass dieser ausdrückt, wie viel Kraft für ein Promille Laufzeitänderung notwendig ist.

Vergleicht man die ermittelten  $K$ -Werte untereinander, so lässt sich erkennen, dass für die Longitudinalwelle für dieselbe Laufzeitänderung eine geringere Kraft notwendig ist im Vergleich zur Transversalwelle. Dies ist auf die Modenabhängigkeit des akusto-elastischen Effekt zurückzuführen. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass weder die Festigkeitsklasse noch das Oberflächenschutzsystem einen markanten Einfluss auf die  $K$ -Werte der untersuchten zylindrischen Werkstoffproben mit Nenndurchmesser M16 haben. Die ermittelten  $K$ -Werte liegen nah beieinander, und die Fehlerindikatoren überschneiden sich.

Im Rahmen weiterer Untersuchungen wurde neben dem Oberflächenschutzsystem auch der Schraubenwerkstoff (Stahlzusammensetzung) variiert. Die Versuche erfolgten an zylindrischen Werkstoffproben mit Nenndurchmesser M36 identischer Geometrie aus 32CrB4 und 33MnCrB5-2. Es konnte auch hier gezeigt werden, dass weder das Oberflächenschutzsystem noch die Stahlzusammensetzung einen markanten Einfluss auf die  $K$ -Werte haben [22].

## 4 | ANALYTISCHE ERMITTLUNG DER SCHRAUBFALLSPEZIFISCHEN AKUSTO-ELASTISCHEN KONSTANTEN ( $K$ -WERTE)

Die experimentelle Ermittlung der schraubfallspezifischen akusto-elastischen Konstanten ( $K$ -Werte) ist aufwändig, Abschnitt 3.2. Nachfolgend wird ein Verfahren beschrieben und hinsichtlich der Genauigkeit bewertet, mit dem eine analytische Berechnung der schraubfallspezifischen  $K$ -Werte möglich ist.

### 4.1 Verfahren

Der schraubfallspezifische  $K$ -Wert setzt sich in dem vorgeschlagenen Verfahren aus einem materialspezifischen und einem geometriespezifischen Anteil zusammen, wobei letzterer sich wiederum aus einem Geometriefaktor  $N_{m(x)}^{\text{sim}}$  und dem Referenzquerschnitt  $A_{\text{ref}}$  zusammensetzt [29, 30]:

$$K_{\text{Schraubfall}} = K_{\text{Material}} \cdot A_{\text{ref}} \cdot \frac{1}{N_{m(x)}^{\text{sim}}} \quad (11)$$

Die Berechnung des Referenzquerschnittes  $A_{\text{ref}}$  erfolgt in Anlehnung an die Nachgiebigkeitsberechnung einer Schraube der VDI 2230 [31].

Für die Berechnung des Geometriefaktors  $N_{m(x)}^{\text{sim}}$  wird der Spannungsverlauf der Schraubenverbindung entlang der Schraubenmittellinie simuliert und der Flächeninhalt unterhalb dieses Spannungsverlaufs ermittelt. Dieser wird mit dem Flächeninhalt unterhalb des Spannungsverlaufs eines idealen Bolzens derselben Länge verglichen. Für die Simulation wurde die Schraube in 3 Module unterteilt, in denen jeweils die Auswirkung der Geometrie auf den Spannungsverlauf untersucht wurde. Das Kopf- und Gewindemodul wurde mittels Finite-Elemente-Methode simuliert. Hierzu wurden linear-elastische Berechnungen unterschiedlicher Schraubengeometrien mit der Software COMSOL Multiphysics durchgeführt. Die Schrauben wurden zuvor in einer 3D-CAD Software (SolidWorks 2015) erstellt und als STEP-Dateien in die Finite-Elemente-Methoden-Software exportiert. Zur Vernetzung der 3D-Modelle wurden Tetraeder-Elemente verwendet. Das Schaftmodul lässt sich

**TABELLE 2** Gegenüberstellung der experimentell ermittelten und analytisch berechneten schraubfallspezifischen  $K$ -Werte, feuerverzinkte HV-Garnitur M16x100, Festigkeitsklasse 10.9, Werkstoff 32CrB4, Klemmlänge  $l_k = 82$  mm.

**TABLE 2** Comparison of the experimentally determined and analytically calculated bolt specific  $K$ -values, hot-dip galvanized HV bolt M16x100, property class 10.9, material 32CrB4, clamp length  $l_k = 82$  mm.

$K_{L, \text{Material}}$ in MPa/%	$K_{T, \text{Material}}$ in MPa/%	Methodik	$K_{L, \text{Schraubfall}}$ in N/%	$K_{T, \text{Schraubfall}}$ in N/%
64,34	162,46	Experiment	12.728	36.459
$N_{m(x)}^{\text{sim}}$	$A_{\text{ref}}$ in mm <sup>2</sup>	Berechnung	12.775	34.780
0,87	187,8	Abweichung in %	0,4	4,6

mit dem Nenndurchmesser analytisch berechnen. Für Sechskantschrauben wurden numerische Gleichungen hergeleitet, die eine einfache Ermittlung des Flächeninhaltes unterhalb des Spannungsverlaufes nur mit der Kenntnis der geometrischen Kenngrößen der Schraubenverbindung erlauben [22, 29, 30].

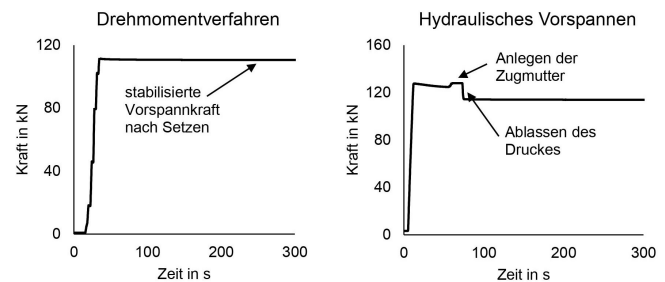
## 4.2 | Validierung des Verfahrens

Die experimentelle Ermittlung der schraubfallspezifischen  $K$ -Werte zur Validierung des analytischen Verfahrens erfolgte durch die Messung der Laufzeitzunahme der Longitudinal- und Transversalwelle im Puls-Echo-Verfahren bei gleichzeitiger kontinuierlicher axialer Kraftsteigerung. Hierzu wurde eine feuerverzinkte HV-Garnitur mit einer Klemmlänge von  $l_k = 82$  mm nach DIN EN 14399-4, bestehend aus einer HV-Schraube M16x100 der Festigkeitsklasse 10.9 aus dem Werkstoff 32CrB4, zwei HV-Scheiben und einer HV-Mutter, verwendet [32] (H: hochfest, V: vorgespannt).

Die Grundcharakterisierung wurde an Proben derselben Charge des Werkstoffs 32CrB4 durchgeführt, Abschnitt 3.1. Die stirnseitigen Oberflächen der HV-Schraube wurden für die Ultraschallmessungen nicht mechanisch bearbeitet.

Die Ergebnisse des analytischen Verfahrens und der experimentellen Ermittlung wurden tabellarisch gegenübergestellt, Tabelle 2. Die materialspezifischen Anteile  $K_{L, \text{Material}}$  und  $K_{T, \text{Material}}$  wurden für die Longitudinal- und Transversalwelle an zylindrischen Werkstoffproben ermittelt und rechnerisch geometriekompensiert, Abschnitt 3.

Die schraubfallspezifischen  $K$ -Werte lassen sich mit dem vorgestellten analytischen Verfahren hinreichend genau berechnen.



**BILD 6** Vorspannkraft-Signal des Kraftmessrings während der Montage, Drehmomentverfahren (links) und hydraulisches Vorspannen (rechts).

**FIGURE 6** Force washer signal (bolt preload) during bolt assembly, torque method (left) and hydraulic bolt tensioning (right).

## 5 | BAUTEILVERSUCHE – UNTERSUCHUNGEN AN SCHRAUBENVERBINDUNGEN

Im Rahmen von Bauteilversuchen an Schraubenverbindungen wurde der Einfluss des Montageverfahrens (Drehmomentverfahren und hydraulisches Vorspannen) auf die ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung untersucht, Bild 6. Beim hydraulischen Vorspannen handelt es sich um ein Montageverfahren, welches eine reine Axialkraft in der Schraube hervorruft, wohingegen beim Drehmomentverfahren neben der Axialbeanspruchung reibungsbedingt auch eine Torsionsbeanspruchung entsteht [2].

Neben dem Montageverfahren wurden im Rahmen dieser Untersuchung auch die Klemmlänge sowie die Schaft- bzw. Gewindelänge der HV-Schrauben variiert. Die Länge der HV-Schrauben sowie der Durchmesser wurden konstant gehalten, Abschnitt 5.1. Durch die Wahl unterschiedlich starker Stahlbleche (Variante 1–3:  $t_1 = 30$  mm,  $t_2 = 50$  mm und  $t_3 = 60$  mm, Baustahl S355)

wurden verschiedene Klemmlängen realisiert. Um die ultraschallbasiert ermittelten Vorspannkraften nach der Montage beurteilen zu können, wurde ein Kraftmessring zur Referenzmessung verwendet. In den Blechen wurden spezielle Bohrungen bzw. Fräsungen für den Kraftmessring eingebracht, so dass ein Verschrauben beider Bleche ohne eine Vergrößerung der Klemmlänge möglich war, Bild 7 (links). Der Einfluss des Montageverfahrens auf die ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung konnte in Variante 2 und 3 untersucht werden. Variante 1 konnte nicht hydraulisch vorgespannt werden, da der Gewindeüberstand zu groß für den verwendeten Schraubenspannzylinder war.

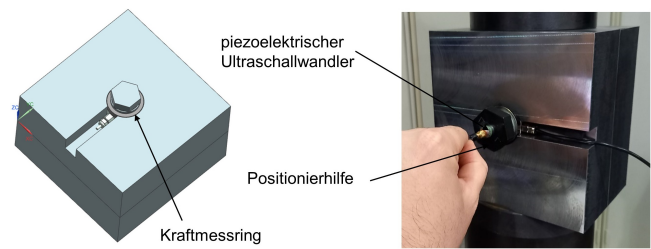
## 5.1 | Schraubengeometrie und -werkstoff

Die Untersuchung erfolgte an feuerverzinkten HV-Garnituren nach DIN EN 14399-4, jeweils bestehend aus einer HV-Schraube M16x160 der Festigkeitsklasse 10.9, zwei HV-Scheiben und einer HV-Mutter (Drehmomentverfahren) bzw. einer speziellen Zugmutter des Werkzeugherstellers (hydraulisches Vorspannen) [32]. Neben dem Montageverfahren und der Klemmlänge wurden auch die Schaftlängen der Schrauben variiert (Variante 1–3:  $l_{s1} = 20$  mm,  $l_{s2} = 60$  mm und  $l_{s3} = 100$  mm). Es wurden jeweils 3 Schrauben je Variante untersucht. Alle Schrauben stammen aus derselben Charge des Werkstoffs 32CrB4. Die Grundcharakterisierung wurde an Proben derselben Charge durchgeführt, Abschnitt 3.1. Die stirnseitigen Oberflächen der HV-Schrauben wurden für die Ultraschallmessungen nicht mechanisch bearbeitet.

## 5.2 | Versuchsdurchführung - Drehmomentverfahren und hydraulisches Vorspannen

Die Montage der HV-Schrauben mit dem modifizierten Drehmomentverfahren erfolgte mit einem digitalen Drehmomentschlüssel über die HV-Mutter. Gemäß DIN EN 1090-2 und DIN EN 1993-1-8/NA wurden die HV-Schrauben mit einem Drehmoment  $M_{A, MKV} = 250$  Nm angezogen, so dass die Regel-Vorspannkraft  $F_{p,C^*} = 100$  kN nach DIN EN 1090-2 und DIN EN 1993-1-8/NA erreicht wird [33, 34].

Das hydraulische Vorspannen wiederum erfolgte mit einem Schraubenspannzylinder. Grundsätzlich muss beim hydraulischen Vorspannen zwischen der durch den Schraubenspannzylinder aufbrachten Montagevorspannkraft und der verbleibenden Vorspannkraft



**BILD 7** Bauteilversuche - Versuchsaufbau mit Kraftmessring (links) und Durchführung der Ultraschallmessungen (rechts).

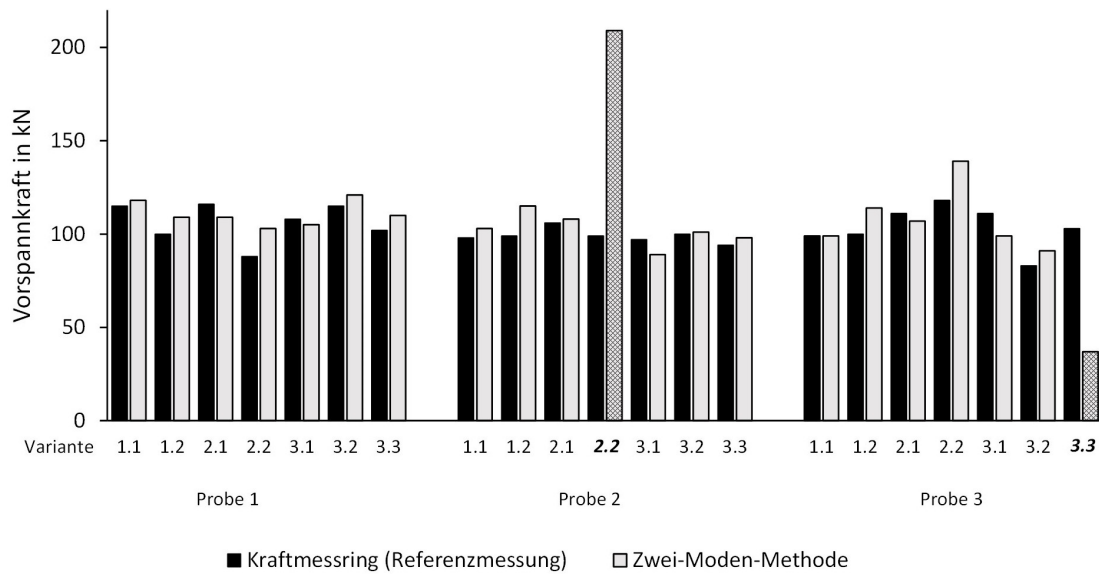
**FIGURE 7** Component tests - experimental setup with force washer (left) and ultrasonic measurements (right).

nach Ablassen des hydraulischen Druckes unterschieden werden. Um die gewünschte Vorspannkraft  $F_{p,C^*}$  zu erreichen, muss die Schraubenverbindung somit höher vorgespannt werden, da es zu Rückfederungsverlusten kommt. Die Höhe des Rückfederungsverlustes wurde in einem Vorversuch bestimmt. Die speziellen Zugmutter werden vor dem Ablassen des hydraulischen Druckes mit einem Anlegemoment fixiert.

Das Vorspannkraft-Signal des Kraftmessrings wurde nach dem Montagevorgang noch über einen gewissen Zeitraum beobachtet. Es wurde so lange mit dem Beginn der Durchführung der Ultraschallmessungen gewartet, bis sich nach einem anfänglichen Abfallen der Vorspannkraft durch Setzen ein stabiler Zustand eingestellt hat, Bild 6. Um eine wiederholbare Positionierung der Ultraschallwandler bezüglich der Schraubenachse zu realisieren, wurden Positionierhilfen verwendet, Bild 7 (rechts).

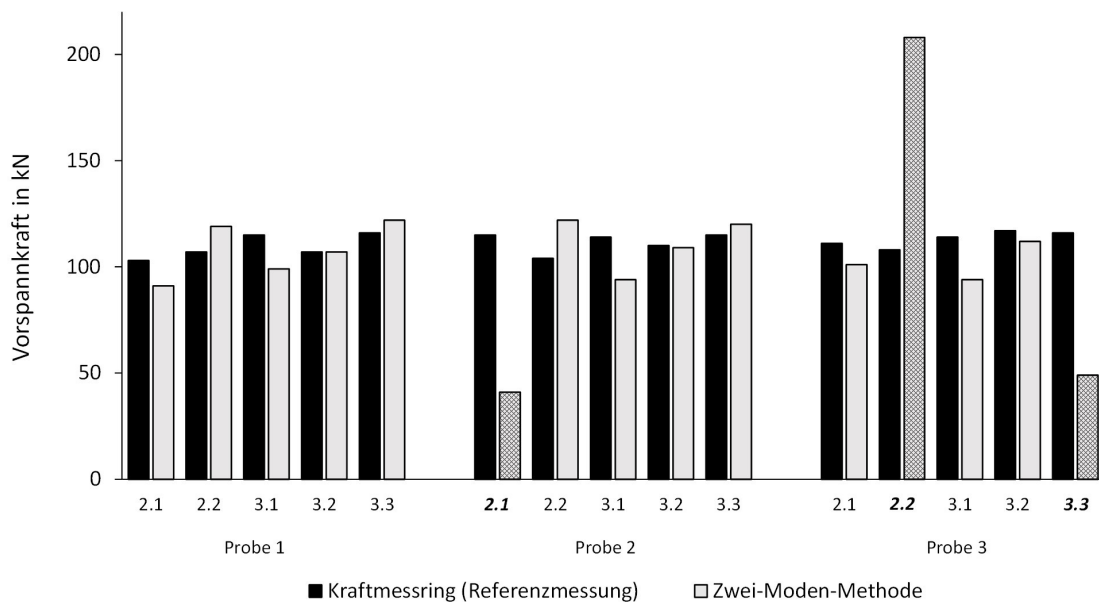
Die schraubfallspezifischen  $K$ -Werte wurden mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahren analytisch bestimmt. Die Ermittlung der  $Q_0$ -Werte erfolgte jeweils an einer Referenzschraube je Variante. Die mittels Zwei-Moden-Methode berechneten Vorspannkraften sind in Balkendiagrammen den Messwerten des Kraftmessrings (Referenzmessung) gegenübergestellt, Bilder 8, 9.

Im Rahmen der Bauteilversuche konnte gezeigt werden, dass das Montageverfahren keinen markanten Einfluss auf die Genauigkeit der ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung hat. Dies stimmt mit anderen publizierten Ergebnissen ähnlicher Untersuchungen überein [35]. Generell kann eine gute Übereinstimmung der gemessenen Vorspannkraften beobachtet werden. Im Mittel liegt die Abweichung zu den mittels Kraftmessring gemessenen Vorspannkraften bei ca. 8% (Drehmomentverfahren) bzw. ca. 9% (hydraulisches Vorspannen) – Ausreißer (kursiv-fett hervorgehoben) nicht mit eingerechnet. Letztere stellen gemessene Kraftwerte dar, die durch Phasensprünge zustande kommen, bei denen die tatsächliche Vorspannkraft stark über- bzw. unterschätzt wird. Dabei handelt es sich um Veränderungen der



**BILD 8** Ergebnisse der ermittelten Vorspannkraft mit der Zwei-Moden-Methode und Kraftmessring (Referenzmessung), Ausreißer kursiv-fett hervorgehoben und schraffiert, analytisch ermittelte  $K$ -Werte, Bauteilversuche, Drehmomentverfahren.

**FIGURE 8** Results of the evaluated bolt preload with the bi-wave method and force washer (reference measurement), outlier in italic-bold and hatched, analytically calculated  $K$ -values, component tests, torque method.



**BILD 9** Ergebnisse der ermittelten Vorspannkraft mit der Zwei-Moden-Methode und Kraftmessring (Referenzmessung), Ausreißer kursiv-fett hervorgehoben und schraffiert, analytisch ermittelte  $K$ -Werte, Bauteilversuche, hydraulisches Vorspannen.

**FIGURE 9** Results of the evaluated bolt preload with the bi-wave method and force washer (reference measurement), outlier in italic-bold and hatched, analytically calculated  $K$ -values, component tests, hydraulic bolt tensioning.

Signalformen der Rückwandeckos, wodurch die Selbstähnlichkeit der ersten beiden Rückwandeckos Mehrdeutigkeiten aufweisen kann. Bedingt durch die komplexe Geometrie von Schrauben unterliegt die Ultraschalllaufzeitmessung Störeffekten, wie z.B. Streuung aufgrund der Schallreflexion, Interferenzen und Modenkonzersion. Die Mehrdeutigkeiten führen zu

Laufzeitverschiebungen. Sie liegen meist deutlich unterhalb der Laufzeitvariation durch die Längstoleranzen der Verbindungselemente. Zudem weisen die Streuungen kein charakteristisches Muster auf, so dass sich diese nicht eindeutig auf die Variation der Geometrie (Klemmlänge, Gewinde- bzw. Schaftlänge) zurückführen lassen.

## 6 | ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieser Publikation wurde ein Monitoring-Verfahren vorgestellt, welches eine ultraschallbasierte und somit zerstörungsfreie Ermittlung der Vorspannkraft auch an montierten Schrauben im Bestand ohne Informationen über die Laufzeit im nicht verspannten Zustand ermöglicht. Hierzu wurden die theoretischen Grundlagen zur ultraschallbasierten Vorspannkraftermittlung zusammengefasst und die gängige Ein-Moden-Methode, die auf der Laufzeitmessung von Longitudinalwellen basiert, vorgestellt. Es wurde gezeigt, wie man durch Hinzunahme der Transversalwelle auf eine Referenzmessung der Laufzeit jeder Schraube im nicht verspannten Zustand verzichten kann. Bei der Zwei-Moden-Methode ist lediglich nur noch eine einzige Schraube zum Referenzieren (Bestimmung von  $Q_0$ ) im nicht verspannten Zustand notwendig. Diese kann beispielsweise dem Lagerbestand entnommen oder aus der Konstruktion ausgebaut werden. An allen weiteren Schrauben desselben Typs kann die Vorspannkraft dann ohne eine vorherige Referenzmessung im nicht verspannten Zustand ermittelt werden.

Je nach Anforderung an die Genauigkeit kann die Vorspannkraftermittlung ganz ohne vorherige experimentelle Ermittlung der schraubfallspezifischen akustoelastischen Konstanten ( $K$ -Werte) erfolgen. Diese können mit einem im Rahmen dieser Publikation vorgestellten Berechnungsverfahren mit einer Genauigkeit von ca. 0,5% für die Longitudinalwelle und ca. 5% für die Transversalwelle analytisch ermittelt werden. Die hierfür benötigten materialspezifischen Anteile  $K_{\text{Material}}$  können der Literatur entnommen werden.

Die experimentelle Ermittlung der  $K$ -Werte an unterschiedlichen zylindrischen Werkstoffproben hat gezeigt, dass weder die Festigkeitsklasse, die Stahlzusammensetzung noch das Oberflächenschutzsystem einen signifikanten Einfluss auf die  $K$ -Werte haben.

Im Rahmen von Bauteilversuchen an Schraubenverbindungen konnte ebenso gezeigt werden, dass die Art des Montageverfahrens (Drehmomentverfahren oder hydraulisches Vorspannen) keinen signifikanten Einfluss auf die ultraschallbasierte Vorspannkraftermittlung hat. Die Vorspannkraften konnten mittels der Zwei-Moden-Methode unter Verwendung von analytisch ermittelten  $K$ -Werten mit einer Abweichung von im Mittel unter 10% bestimmt werden. Bei der Verwendung von experimentell ermittelten  $K$ -Werten lässt sich die Genauigkeit entsprechend verbessern.

Bedingt durch die komplexe Geometrie von Schrauben unterliegt die Ultraschalllaufzeitmessung Störeffekten, so dass es zu Mehrdeutigkeiten bei der Laufzeitmessung (Phasensprünge) kommen kann. Diese führen zu einer starken Über- bzw. Unterschätzung der

tatsächlichen Vorspannkraft. Vor allem für den Fall der referenzlosen Zwei-Moden-Methode ist die Beurteilung der Laufzeitmessung hinsichtlich der Mehrdeutigkeiten nicht mittels einer Plausibilitätsüberprüfung möglich. Es konnte gezeigt werden, dass diese Mehrdeutigkeiten durch Methoden des maschinellen Lernens sowie der codierten Anregung von Ultraschallsignalen stark reduziert werden können [36, 37].

### DANKSAGUNG

Das IGF-Vorhaben 19.671N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wird über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Den vorgenannten Einrichtungen sei für die Betreuung und Förderung an dieser Stelle sehr herzlich gedankt. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

### ORCID

T. J. Niwinski  <http://orcid.org/0000-0001-6833-5032>

F. Kraemer  <http://orcid.org/0000-0002-6789-2811>

### REFERENCES

1. H. J. Kloos, W. Schneider, *VDI-Z* **1984**, 126, 741.
2. H. Wiegand, K.-H. Kloos, W. Thomala, *Schraubenverbindungen: Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg **2007**.
3. F. Kraemer, M. Klein, M. Oechsner, *Eng. Failure Anal.* **2020**, 112, 104484.
4. A. Eberhard, S. Beyer, M. Klein, M. Oechsner, *Materialwiss. Werkstofftech.* **2020**, 52, 152.
5. A. Eberhard, *Dissertation*, Technische Universität Darmstadt, Germany, **2020**.
6. H. Pfaff, W. Thomala, *VDI-Z.* **1982**, 124, 76.
7. G. H. Junker, *Verbindungstechnik* **1974**, 6, 25.
8. M. Becker, N. Groß, H. Herzer, vorgestellt auf der *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP Jahrestagung)*, Berlin, Germany, May 22–24, **2017**, pp. 66.
9. H. J. McFaul, *Mater. Eval.* **1974**, 32, 244.
10. J. Deputat, B. Kušmider, *IPPT IFTTR Reports* **1979**, 43, 269.
11. R. Horstman, K. A. Peters, R. L. Meltzer, M. Bruce Vieth, J. S. Heyman, E. J. Chern, *J. Test. Eval.* **1982**, 10, 202.
12. S. G. Joshi, R. G. Pathare, *Ultrasonics* **1984**, 22, 261.
13. D. S. Hughes, J. L. Kelly, *Phys. Rev.* **1953**, 92, 1145.
14. J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, **1986**.
15. F. E. Schneider, Untersuchung der materialspezifischen Einflüsse und verfahrenstechnische Entwicklungen der Ultraschallverfahren zur Spannungsanalyse an Bauteilen, Fraunhofer-IRB-Verl. Stuttgart **2000**.
16. J. Deputat, *Archives of Acoustics* **1990**, 15, 69.

17. J. Deputat, *ZEV+DET Glas. Ann.* **1991**, 115, 231.
18. J. Deputat, *Mechanika teoretyczna i stosowana* **1988**, 26, 263.
19. E. Schneider, R. Herzer, D. Bruche, H. Frotscher, *Nondest. Charact. Mater. VI* **1994**, 383.
20. E. Schneider, vorgestellt auf der *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP Jahrestagung)*, Bremen, Germany, May 30 - June 01, **2011**.
21. F. Hohmann, *Schraubenverbindungen* **2018**, 2336, 67.
22. S. Herter, M. Becker, T. J. Niwinski, M. Klein, M. Oechsner, *Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 19671N* **2021**, Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS.
23. Q. Pan, R. Pan, C. Shao, M. Chang, X. Xu, *Chin. J. Mech. Eng. (Engl. Ed.)* **2020**, 33.
24. H. Walaszek, P. Bouteille, *Mater. Sci. Forum* **2006**, 524–525, 459.
25. C. Xu, X. Li, Q. Pan, W. Song, vorgestellt auf der *12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*, Portoroz, Slovenia, September 4–6, **2013**, pp. 161–170.
26. Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 10263-4* 2018–02.
27. Deutsche Institut für Normung, *DIN EN ISO 898-1* 2013–05.
28. Deutsche Institut für Normung, *DIN EN ISO 6892-1* 2017–02.
29. N. Groß, *Master Thesis*, Universität des Saarlandes, Germany, **2018**.
30. N. Groß, M. Becker, U. Rabe, vorgestellt auf der *Fachtagung Schraubenverbindungen*, Würzburg, Germany, November 21–22, **2018**, pp. 271–275.
31. Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2230 Blatt 1, 2015–11.
32. Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 14399-4* 2015-04.
33. Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 1090-2* 2018-09.
34. Deutsches Institut für Normung, *DIN EN 1993-1-8/NA* 2020-11.
35. M. Duchardt, *Dissertation*, Technische Universität Darmstadt, Germany, **2013**.
36. S. Herter, S. Youssef, M. M. Becker, S. C. L. Fischer, *Journal of Nondestructive Evaluation* **2021**, 40.
37. M. Schäfer, H. Theado, M. M. Becker, S. C. L. Fischer, *Signals* **2021**, 2, 366.

**How to cite this article:** T. J. Niwinski, F. Kraemer, M. Klein, M. Oechsner, S. Herter, M. M. Becker, *Materialwiss. Werkstofftech.* **2023**, 54, e202100355. <https://doi.org/10.1002/mawe.202100355>