

Erfassung von Vorspannkräften in Schraubverbänden mittels Ultraschall

Gerhard Gerstmayr¹, Philipp Oberhuber², Lambert Bösch³, Jakob Thomas⁴

- 1...Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben, Österreich
- 2...Magna Powertrain, Lannach, Österreich
- 3...Magna Steyr Fahrzeugtechnik, Graz, Österreich
- 4...ARNOLD Umformtechnik, Forchtenberg, Deutschland

1. Einführung

Entwicklungen zu immer kompakterer und leichter Bauweise bei gleich bleibender hoher Qualität sind heutzutage essentielle Anforderungen an die Automobilindustrie [1]. Im Fahrzeugbau werden Antriebsstrangkomponenten aus Aluminiumlegierungen und zunehmend auch aus Magnesiumlegierungen hergestellt. Beim Einsatz von Magnesiumlegierungen liegt der Fokus auf der Entwicklung thermisch beständiger Legierungen, welche den Anforderungen hinsichtlich Kriechbeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Vergießbarkeit und Preis genügen. Zur Verbindung von Mg-Druckgussteilen werden bevorzugt metrische Schrauben aus Stahl und Aluminium der Legierungen EN AW 6056 und EN AW 6013 eingesetzt [2],[3]. Alternativ dazu birgt der Einsatz von hochfesten gewindefurchenden Aluminiumschrauben großes Potential hinsichtlich Kosten- und Gewichtseinsparung [4]. Bei Schraubverbindungen ist sowohl die Montagevorspannkraft als auch die nach einer bestimmten Betriebsdauer und thermischer Beanspruchung verbleibende Restklemmkraft von entscheidender Bedeutung [5].

Die Kenntnis und messtechnische Erfassung von Klemmkraften in Schraubverbänden ist zur Abschätzung und Gewährleistung der Funktionalität von Bauteilen, wie zum Beispiel der Dichtheit in Getriebegehäusen, von besonderer Wichtigkeit. Die Messung von Vorspannkräften in Schraubverbindungen kann mittels Dehnmessstreifen, Kraftmessdosen, Längenmessungen an Schrauben oder Ultraschall erfolgen.

Die Methode der Dehnmessstreifen gibt die Möglichkeit der Vorspannkraftmessung an Originalverschraubungen, mit dem Nachteil der Notwendigkeit eines gewindelosen Schaftbereiches, während bei Verwendung von Kraftmessdosen der Aufbau des Schraubverbandes immer verändert werden muss, was zu erheblichen Veränderungen der Steifigkeit führt.

Dieser Beitrag stellt die Methode der Montagevorspannkraftmessung an Schraubverbindungen mittels Ultraschall vor. Die Präparation der unterschiedlichen verwendeten Schraubentypen, die Kalibration als auch die Verifikation der Messwerte im Zuge der Messvorbereitungen werden präsentiert. Versuchsergebnisse an elastisch und überelastisch angezogenen Schraubverbänden aus Stahl- und Aluminiumschrauben in Magnesium-Getriebegehäusen aus AZ91 zeigen, dass eine reproduzierbare Erfassung der Klemmkraft an Originalverschraubungen mittels Ultraschallprüfung möglich ist. Vorteile als auch Grenzen dieser Messmethode werden aufgezeigt. Das Ziel des Projektes, in dessen Rahmen die hier beschriebenen Untersuchungen statt fanden, ist die Bewertung der Einsetzbarkeit hochfester gewindefurchender Al-Schrauben in Mg-Mutternwerkstoffen für Antriebsstrangkomponenten.

2. Methoden der Vorspannkraftmessung

Im Folgenden werden die einzelnen Methoden der Vorspannkraftmessung an Schraubverbänden dargestellt und diskutiert.

2.1. Vorspannkraftmessung mittels Ultraschall

Die Ultraschallprüfung ist eines der am meisten angewandten Prüfprinzipien der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und dient unter anderem der Kontrolle von Schweißnähten, Gussteilen, Halbzeugen, Fahrzeugteilen, Walzen, Pipelines, Druckbehältern, Wärmetauschern oder Chemieanlagen. Hinzu kommen Messungen von Wanddicken und die Ermittlung von Werkstoffeigenschaften. Dieser Beitrag beschäftigt sich ausschließlich mit der Messung von Klemmkraften in Schraubverbänden.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c von Transversal- und Longitudinalwellen ist eine Materialkonstante. Sie ist von den elastischen Eigenschaften (E-Modul, Querkontraktionszahl μ) und der Dichte ρ des jeweiligen Mediums abhängig (siehe Glg. (2.1)).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-\mu)}} \quad \text{Glg. (2.1)}$$

Die an einer Grenzfläche zweier Werkstoffe ankommende Ultraschallwelle wird zum Teil durchgelassen und zum Teil reflektiert. Es ergeben sich daraus zwei Verfahren der Prüfung. Entweder wird der durchgelassene oder der reflektierte Schallanteil zur Auswertung herangezogen. Beim Durchschallungsverfahren wertet man den durch das Prüfstück hindurchgeleiteten Ultraschallanteil aus.

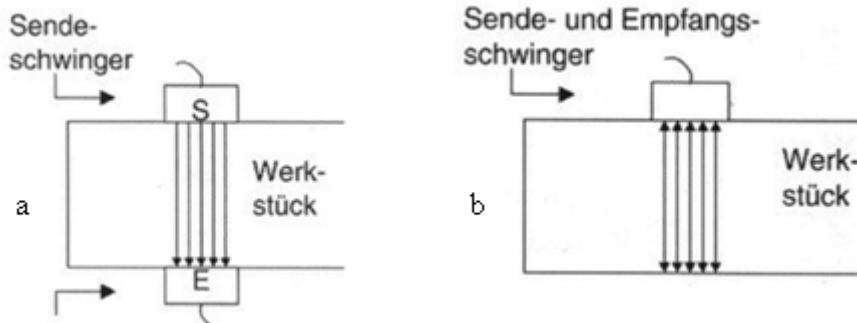


Abb. 2.1: Messanordnung beim Durchschallungsverfahren (a); beim Reflexionsverfahren (b)

Beim Reflexionsverfahren wird der reflektierte Schallanteil ausgewertet. Die Messanordnungen der beiden Prüfverfahren sind in Abb. 2.1 dargestellt. Da beim Reflexionsverfahren der gleiche Schwinger nacheinander erst als Sender und danach als Empfänger dient, ist dieses Verfahren nur mit Impulsen realisierbar. Wegen der Möglichkeit der einfachen Bestimmung der Laufzeit bzw. der Entfernung ist es das bei weitem am häufigsten angewendete Verfahren. Der vom Schwinger erzeugte Ultraschallimpuls läuft senkrecht zur Kontaktfläche in das Werkstück hinein. An der Rückseite des Prüfgegenstandes wird er ganz oder teilweise reflektiert. Liegt die reflektierende Fläche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle, so wird die Schallwelle senkrecht zu ihrer ursprünglichen Richtung zurückgeworfen und erreicht nach einer gewissen Laufzeit, abhängig von der Entfernung zwischen Schwinger und reflektierender Fläche, wieder die Kontaktfläche des Schwingers (siehe Abb. 2.2). Der Ultraschallimpuls wird mit einem Prüfkopf generiert. Die in der praktischen Ultraschallprüfung heute benutzten Prüfköpfe arbeiten fast ausschließlich nach dem piezoelektrischen Effekt.

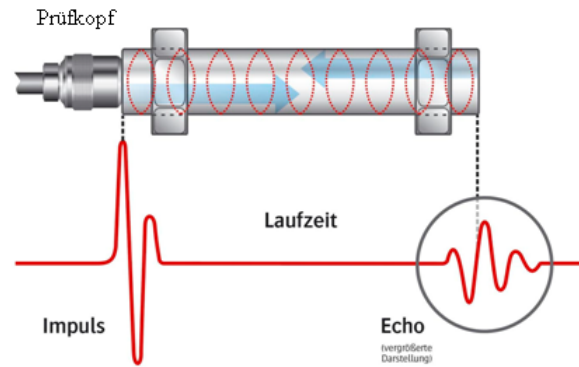


Abb. 2.2: Messmethode der Vorspannkraft beim Reflexionsverfahren

Beim Impuls-Reflexionsverfahren dient der den Schallimpuls erzeugende piezoelektrische Schwinger auch zum Empfang der reflektierten Signale. Er muss daher sehr kurze Zeit nach Aussenden des Sendeimpulses wieder im Ruhezustand sein, damit die verglichen mit dem Sendeimpuls erheblich kleineren reflektierten Impulsanteile ungestört empfangen werden können. Zur Einleitung einer Longitudinalwelle in einen zu prüfenden Gegenstand ist eine Flüssigkeit zwischen Prüfkopf und Werkstückoberfläche unerlässlich. Zwar pflanzt sich die Longitudinalwelle auch in Luft fort, die Reflexion an der Prüflingsoberfläche wäre aber nahezu 100%. Durch eine flüssige Zwischenschicht wird die gewünschte Durchlässigkeit in den Prüfling erheblich verbessert. Die Notwendigkeit der Ankopplung gilt als ein Nachteil der Ultraschallprüfung z.B. im Vergleich mit Durchstrahlungs- oder Wirbelstromprüfung.

Die Untersuchungen wurden mit dem Gerät BoltMikeII von der Fa. Krautkrämer durchgeführt. Vorteile dieses Geräts zur Messung der Vorspannkraft in Schraubverbänden sind:

- Einfache und schnelle Handhabung des Geräts
- Portables Messgerät kann problemlos transportiert werden
- Geringe Schraubenpräparation notwendig
- Vorspannkraftmessungen am Originalaufbau des Schraubverbandes sind möglich

Nicht alle Schraubenanwendungen eignen sich für die Ultraschallmessung. Folgende Grenzen der Anwendbarkeit sind zu beachten:

- Längung der Schraube: Da mit der Ultraschalltechnik die Änderung der Länge einer Schraube gemessen wird, ist eine Mindestlänge der Schraube notwendig um eine ausreichende Messgenauigkeit zu erzielen. Ist die Längung der Schraube sehr klein, entstehen auf Grund von Messschwankungen durch das manuelle Aufsetzen des Prüfkopfes große relative Messfehler.
- Höhe der Vorspannkraft: Bei der Messung von sehr kleinen Vorspannkraften unter 10 % der Dehngrenze kommt es auf Grund der kleinen Längung der Schraube zu großen Messunsicherheiten
- Ultraschallleitendes Material: Bestimmte Gusseisentypen und viele Kunststoffe absorbieren Ultraschallwellen
- Eingeschränkter Temperaturbereich: Der verwendete Prüfkopf kann nur für Temperaturen bis zu ca. 80 °C eingesetzt werden.
- Messungen bei erhöhter Temperatur: Es muss ein stationärer Temperaturzustand vorherrschen. Aus diesem Grund muss bei Relaxationsuntersuchungen der Schraubverband vor der Messung auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden, wodurch der Einfluss der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten

von Schraube und Klemmteile auf die Vorspannkraft während des Aufheizens messtechnisch nicht erfasst werden kann.

2.2. Vorspannkraftmessung mittels Dehnmessstreifen

Bei dieser Methode werden Dehnmessstreifen in geeigneter Form direkt auf die Schraube appliziert und die entstehenden Dehnungen beim Anzug der Schraube gemessen und über eine bei der Kalibration festgelegte Linearisierungstabelle in Vorspannkraft umgerechnet.

Diese Art der Vorspannkraftmessung wird bereits seit einigen Jahren in der Automobilindustrie angewendet. Eine häufige Methode ist die Verwendung von vier 90° „T“ Vollbrücken DMS in einem Rosettenmuster um Dehnungen auf Grund von Temperaturschwankungen zu kompensieren. Um die Dehnmessstreifen applizieren zu können empfiehlt [6] eine Verringerung des nominellen Durchmesser der Schraube um 0,8 mm auf einer Länge von 8 mm direkt unterhalb des Schraubenkopfes im gewindefreien Teil des Schaftes. Dabei sollte darauf geachtet werden, die Änderungen der Steifigkeit des Schraubverbandes so gering wie möglich zu halten. Durch ein Loch im Schraubenkopf werden die Drähte der DMS geführt (siehe Abb. 2.3) [6].

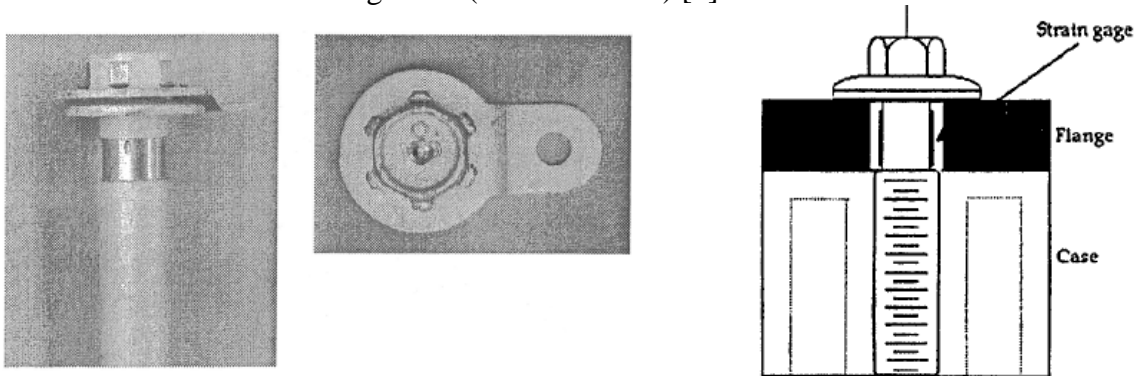


Abb. 2.3: Mechanisch vorbereitete Schraube für DMS Applizierung und Loch im Schraubenkopf für DMS-Kabel (a); Messanordnung von [7-[9] (b)

[7-[9] untersuchten das Relaxationsverhalten von metrischen M10 Stahlschrauben mit Hilfe von Dehnmessstreifen. Dazu wurden die untersuchten Schrauben unterhalb des Schraubenkopfes mechanisch bearbeitet und vier 90° „T“ DMS in Form der Rosette appliziert (siehe Abb. 2.3).

Die Vorteile dieses Messsystems sind:

- Durchgehende Messung der Vorspannkraft bei veränderlicher bzw. erhöhter Temperatur möglich
- Minimale Veränderung der Steifigkeiten des Schraubverbandes durch Applikation der Dehnmessstreifen
- Vorspannkraftmessungen am Originalschraubverband möglich

Folgende Einschränkungen sind bei dieser Messmethode gegeben:

- Nur ab einer bestimmten Schraubendimension möglich, da sonst der Platz für die DMS-Applikation nicht ausreicht. In der Literatur finden sich nur Beiträge ab einer Schraubengröße M10.
- Es ist ein gewindefreier Schaft notwendig. Ein eventueller Abtrag des vorhandenen Gewindes durch mechanische Bearbeitung beeinflusst massiv die Steifigkeiten des Schraubverbandes und den Eigenspannungszustand.

- Die Applikation der DMS ist aufwändig und kostenintensiv. Weiters ist zur Führung der Drähte eine spezielle Präparation des Schraubenkopfes sowie der Nuss des Schraubautomaten notwendig (z. B. Aussentorxschrauben).

2.3. Vorspannkraftmessung mittels Kraftmessdose (KMD)

Bei dieser Art der Vorspannkraftmessung wird der Aufbau des Schraubverbandes durch Zwischenschalten einer Kraftmessdose verändert. Dies hat signifikante Einflüsse auf die Gesamtsteifigkeit des Systems und auf das Verhalten des Verbandes bei veränderlicher bzw. erhöhter Temperatur. Eine Erhöhung der Betriebstemperatur beeinflusst die Schraubenverbindung besonders bei unterschiedlichen thermophysikalischen und mechanischen Eigenschaften der Verschraubungskomponenten [1]. Die Wirkung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Schrauben und verspannten Teile als auch die Temperaturabhängigkeit der E-Moduli sind qualitativ in Abb. 2.4 dargestellt.

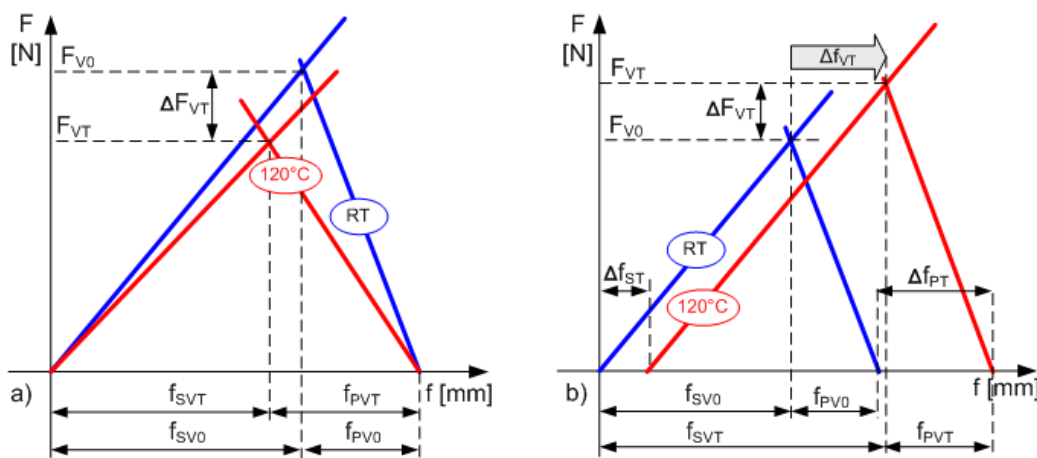


Abb. 2.4: Die Wirkung der Betriebstemperatur auf das Verspannungsdreieck: E-Moduli (a); Wärmeausdehnung (b) [1]

Die bei steigender Temperatur sinkenden E-Moduli bewirken eine Verminderung der Vorspannkraft von F_{V0} um den Wert ΔF_{VT} bei Raumtemperatur nach F_{VT} bei einer für Antriebsstrangkomponenten relevanten Betriebstemperatur von 120°C (siehe Abb. 2.4 a). Die Abkürzungen f_{SV0} , f_{PV0} bzw. f_{SVT} und f_{PVT} bezeichnen die Dehnungen bzw. Stauchungen der Schraube und verspannten Teile bei Raumtemperatur und bei 120°C. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungen der einzelnen Komponenten der Schraubenverbindungen können sowohl eine Zu- als auch eine Abnahme der Vorspannkraft verursachen. Im gezeigten Fall wurde eine größere Wärmedehnung der verspannten Teile (Δf_{PT}) als der Schraube (Δf_{ST}) angenommen was eine Erhöhung der Vorspannkraft bei steigender Temperatur bewirkt. Die Gesamtlänge des Schraubverbandes ist Δf_{VT} [1].

Abb. 2.5 b zeigt den durch Verwendung einer Vollbrücken-DMS Kraftmessdose aus Stahl der Fa. KALIBER verstärkten Einfluss der Wärmedehnungen auf die Vorspannkraft bei steigender Temperatur. Abb. 2.5 a zeigt den verwendeten Versuchsaufbau für die Untersuchung des Relaxationsverhaltens von hochfesten gewindefurchenden Al-Schrauben in Mg-Mutternwerkstoffen. Der Betrag des Vorspannkraftabfalles auf Grund der Wärmedehnungen wurde nach VDI2230 berechnet (ΔF_{VT}) und zum Gesamtversuch addiert um die reine Relaxation zu erhalten.

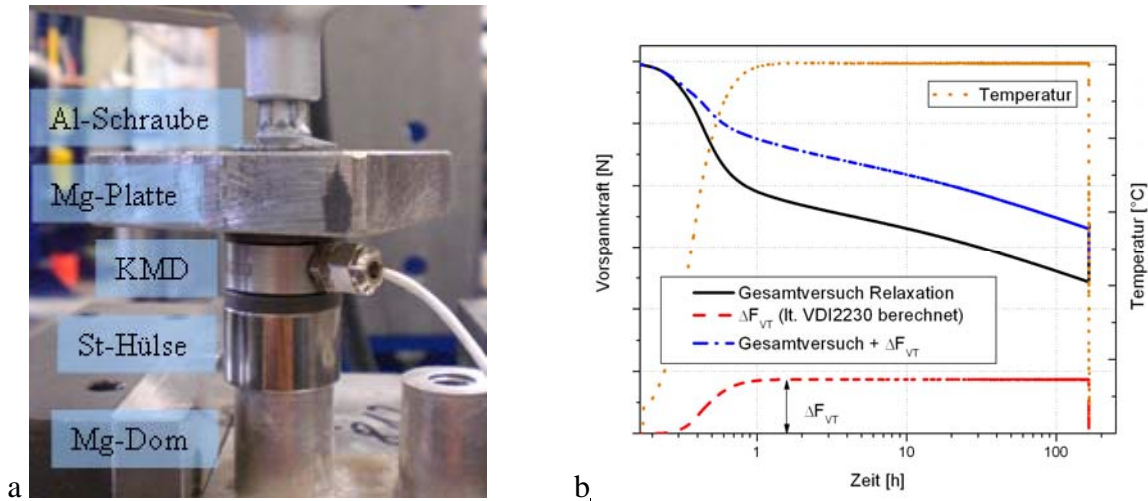


Abb. 2.5: Versuchsaufbau bei Relaxationsmessungen (a); Relaxationsverhalten mit Anteil der durch Wärmedehnungen verursachten Vorspannkraftveränderung (b)

Um den quantitativen Einfluss der Kraftmessdose und der Abstandshülse auf das Verhalten des Schraubverbandes darzustellen, wurden die Verspannungsdreiecke nach VDI2230 für beide Varianten berechnet. Für den in Abb. 2.5 untersuchten Aufbau ist die Wärmeausdehnung der Schraube größer als jene der verspannten Teile. Dies führt zu einer Verringerung der Vorspannkraft und der mechanischen Längung von Schraube (f_s) bzw. der Stauchung der Klemmteile (f_p) (siehe Abb. 2.6 a) bei Betriebstemperatur.

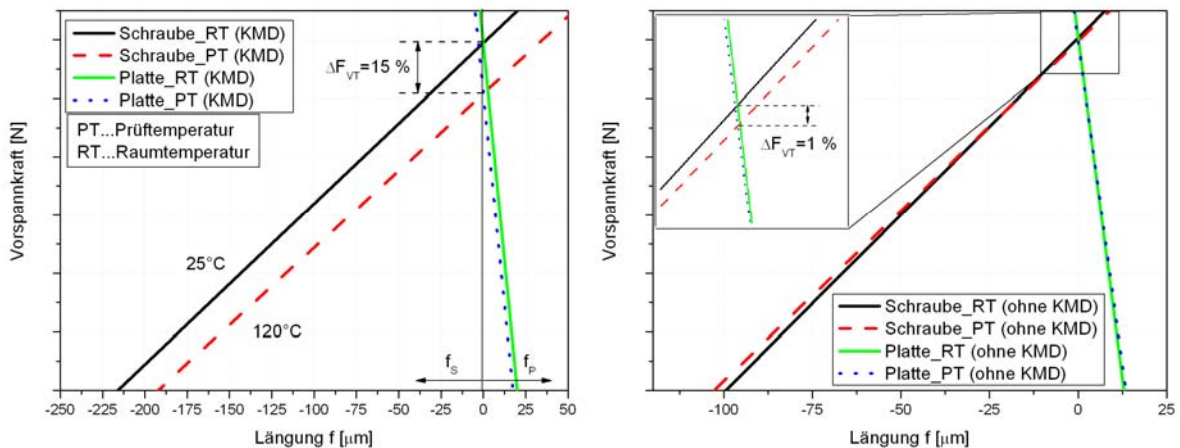


Abb. 2.6: Verspannungsdreieck des untersuchten Schraubverbandes mit KMD und Hülse (a); Verspannungsdreieck des Originalaufbaus (b)

Bei Berechnung ohne St-Hülse und KMD ist die Wärmedehnung der Mg-Klemmplatte größer als jene der Al-Schraube und bewirkt eine Zunahme der mechanischen Längung bzw. Stauchung von Schraube und Klemmplatte (siehe Abb. 2.6 b). Dies allein würde einen Anstieg der Vorspannkraft bewirken. Die Abnahme der Vorspannkraft auf Grund der bei erhöhter Temperatur verringerten E-Moduli übersteigt aber die Vorspannkraftzunahme durch die Wärmeausdehnungskoeffizienten. Dies bewirkt einen leichten resultierenden Abfall der Vorspannkraft von Raumtemperatur zu Betriebstemperatur. Der Vergleich dieser beiden Verspannungsdreiecke verdeutlicht den signifikanten Einfluss der zusätzlichen Klemmelemente (KMD, St-Hülse) auf das Verhalten des Schraubverbandes bei erhöhter Temperatur.

Die Vorteile dieses Messsystems sind:

- Durchgehende Messung der Vorspannkraft bei veränderlicher bzw. erhöhter Temperatur möglich

- Einfache Verwendbarkeit – keine Präparation der Schrauben notwendig
- Vorspannkraften auch bei Schrauben kleiner Dimensionen messbar

Folgende Einschränkungen sind bei dieser Messmethode gegeben:

- Steifigkeiten und Gesamtverhalten des Schraubverbandes bei sich verändernder Temperatur werden durch den Einsatz von Kraftmessdosen signifikant verändert

3. Experimentelle Untersuchungen

In weiterer Folge werden Vorspannkraftuntersuchungen an mit unterschiedlichen Schrauben verschraubten Mg- Druckguss Getriebegehäusen aus AZ91 vorgestellt. Für die Vorspannkraftmessungen wurden folgende Stahl- und Aluminiumschrauben verwendet:

- Metrische Stahlschrauben M10x35 mit Aluminiumtopf und Mikroverkapselung. Diese wurden in ein Seriengetriebegehäuse GMT800 mit vorgeschrittenem Gewinde elastisch mit 34 Nm verschraubt (Serienanzugsvorschrift).
- Trilobulare gewindefurchende Al-Schrauben TT2000 M8x35 EN AW 7075 wurden in ein Prototypengehäuse aus AZ91 mit gegossenen Kernlöchern unterer Kernlochtoleranz überelastisch mit 17 Nm + 90° verschraubt.
- Metrische Al-Schrauben M8x31 EN AW 6056 wurden in ein Prototypengehäuse aus AZ91 mit vorgefurchtem Gewinde unterer Kernlochtoleranz überelastisch mit 15 Nm + 90° verschraubt.

Bei den Prototypengehäusen wurden andere Stifteinsätze als beim Seriengehäuse verwendet. Auf Grund von Abnutzungserscheinungen dieser Stifteinsätze beim Gießprozess in der Serienfertigung kommt es zu Schwankungen der Kernlochgröße. Deshalb wurde eine zulässige Toleranz der Kernlochgröße definiert welche vom Gießer in der Serienfertigung eingehalten werden kann.

Die metrischen Stahlschrauben M10x35 mit Aluminiumtopf werden derzeit serienmäßig bei MAGNA Powertrain in Getriebegehäuse verschraubt. Weiters wird auch die metrische Al-Schraube EN AW 6056 bereits erfolgreich eingesetzt. Um die Einsetzbarkeit der hochfesten gewindefurchenden Al-Schraube TT2000 M8x35 EN AW 7075 zu untersuchen, sollen die Ergebnisse dieser Verschraubungen mit den Serienapplikationen verglichen werden.

Die Vorspannkraftmessungen mittels Ultraschall wurden mit dem portablen Gerät BoltMikeII von Krautkrämer durchgeführt (siehe Abb. 3.1 a). Dieses Gerät verfügt über einen Prüfkopf welcher bei den Messungen manuell an den Schraubenkopf angelegt wird (siehe Abb. 3.1 b und c).



Abb. 3.1: BoltMikeII (a); Messung der Vorspannkraft mit Prüfkopf (b); im Detail (c)

Die Laufzeit des Schallimpulses (Longitudinalwellen), der die Schraube entlang ihrer Achse durchläuft wird gemessen und die Vorspannkraft errechnet. Der Einfluss der in der Schraube vorherrschenden Spannung σ auf die Änderung der Schallgeschwindigkeit (Δv) (akusto-

elastischer Effekt) wird durch einen Spannungsfaktor K kompensiert ($K = \frac{\Delta v}{\sigma}$), sodass nur die Längung der Schraube (ΔL) durch die Spannungsbeanspruchung gemessen wird (siehe Abb. 3.2 a). Die Änderung der Schallgeschwindigkeit auf Grund einer Temperaturänderung wird in BoltMikeII über einen integrierten Temperatursgleich (c) korrigiert. So wird die Ultraschall-Laufzeit auf einen Standardwert von 22,2°C rückgerechnet und garantiert die Messung der reinen thermischen Längung der Schraube (siehe Abb. 3.2 b) [10]. Bei der Wahl des Prüfkopfes wurde auf eine vollständige Bedeckung des Schraubenkopfes geachtet.

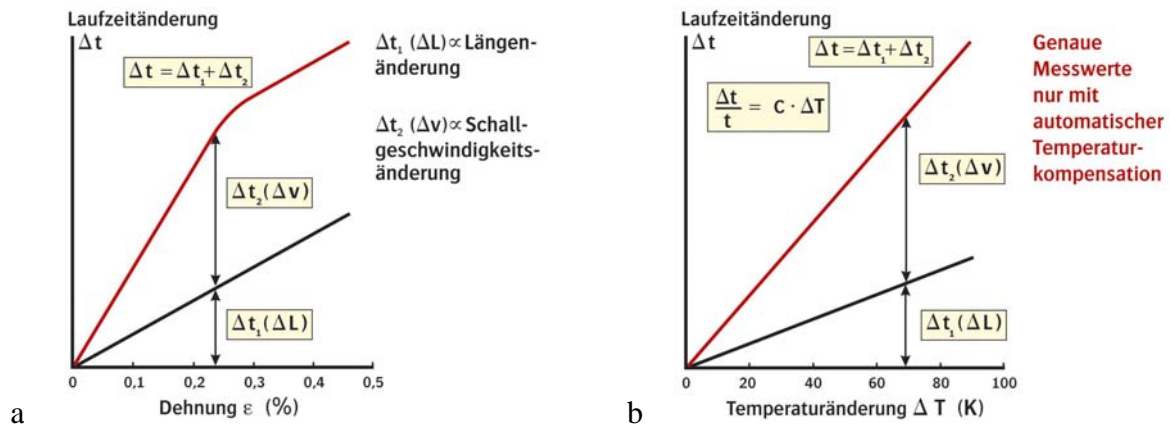


Abb. 3.2: Einfluss der Spannung auf die Schallgeschwindigkeit (a); Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit (b)

3.1. Präparation der Schrauben

Die Schraube muss eine ebene Kontaktfläche für den Prüfkopf bieten um eine Ultraschallwelle senden bzw. empfangen zu können. Weiters sollte das Schaftende der Schraube auch eine Parallelfäche aufweisen um die Ultraschallwelle zum Prüfkopf zu reflektieren.

Alle Schrauben wurden im Vorfeld an Schraubenkopf und -schaft planparallel gedreht um eine gute Übertragung des Ultraschallsignals vom Tastkopf in die Schraube zu gewährleisten und weiters eine gute Reflexion des Ultraschallsignals bei den Messungen zu erhalten. Um Streuungen zu vermeiden wurde darauf geachtet, dass die Flächen rechtwinkelig zur Schraubenachse liegen und eine gute planparallele Oberflächenqualität aufweisen. Es wurde darauf geachtet, dass diese Planparallelität auch beim Verschraubvorgang erhalten bleibt und keine Unebenheiten durch etwaige Plastifizierungen am Schraubenkopf auf Grund des Kontakts mit der Nuss des Verschraubautomaten entstehen.

3.2. Kalibration der Schrauben

Nach Eingabe der notwendigen Geometrie- bzw. Materialparameter in die Datenbank von BoltMikeII erfolgte die Kalibration der Schrauben. Exemplarisch wird im Folgenden die Kalibration der hochfesten gewindelfurchenden Schrauben TT2000 EN AW 7075 M8x35 behandelt. Die Ausgangslänge der Schrauben wurde gemessen und hinterlegt. Anschließend wurden in einer Zugprüfmaschine definierte Lasten auf die Schraube aufgebracht und die von BoltMikeII gemessenen Kraftwerte gespeichert. Der Korrekturfaktor wurde über lineare Regression der Punkte ermittelt (siehe Abb. 3.3). Um den Einfluss des Prüfers zu quantifizieren wurden die Messungen von drei Personen durchgeführt. Es ist kein signifikanter Einfluss des Prüfers auf die Messergebnisse erkennbar.

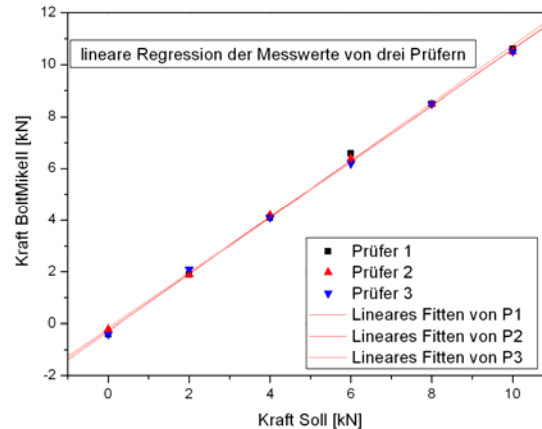


Abb. 3.3: Kalibrationsgerade ermittelt durch lineare Regression

Um eine gute Kopplung des Ultraschallsignals an den Schraubenkopf zu gewährleisten, wurde der Prüfkopf mit WD-40 benetzt. Bei der Messung wurde darauf geachtet keinen Druck auf den Prüfkopf auszuüben. Erst nach Erreichen eines stationären Messwertes wurde die Messung als gültig erachtet.

3.3. Versuchsdurchführung

TT2000 EN AW 7075 M8x35:

Bei diesem Schraubentyp wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. Die Verschraubungen der 1. Versuchsreihe wurden mit einem stationären Schraubautomat der Firma Reckengineering mit Steuerung und Spindeln von Bosch Rexroth und Messgerät Acitve 9000 von der Fa. Holger Claasen bei Fa. ARNOLD in Forchtenberg durchgeführt (siehe Abb. 3.4). An Hand von Abreissversuchen wurde zuvor das überelastische Anzugsverfahren 17 Nm + 90° definiert. Das verwendete Anzugsverfahren ist bis zu einem definierten Schwellmoment drehmomentgesteuert bei vorgegebener Drehzahl. Anschließend wird bei verringerter Drehzahl drehwinkelgesteuert nachgezogen.

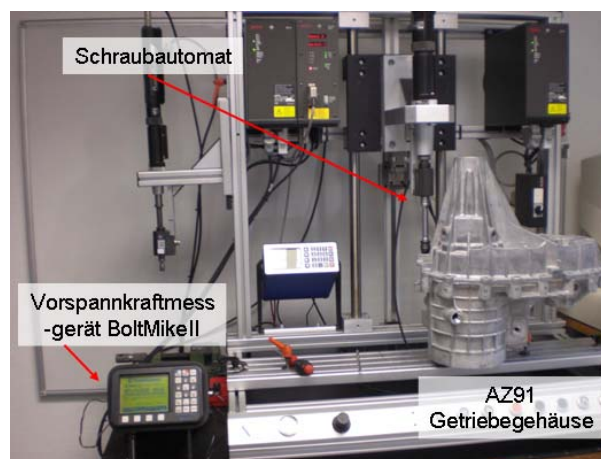


Abb. 3.4: Messaufbau der 1. Versuchsreihe bei Fa. ARNOLD GmbH & Co KG

Die 2. Messreihe wurde mit einem Drehmomentenschlüssel manuell auf 17 Nm angezogen und mit Hilfe eines Winkeleisens 90° nachgedreht. Überelastisch bedeutet, dass die Schraube während des Anzugs zusätzlich zur elastischen Dehnung auch eine plastische Längung erfährt. Vorteile eines überelastischen Anzugs sind:

- Optimales Ausnutzen des Materialfestigkeit der Schraube zur Generierung höchst möglicher Montagevorspannkkräfte

- Geringerer Einfluss der Reibungsverhältnisse im Gewinde und unter dem Schraubenkopf auf die Montagevorspannkraft
- Geringe Schwankung der Montagevorspannkraft.

Die Kernlöcher wurden vor der Verschraubung mit einem Innenfeinmessgerät vermessen um etwaige Schwankungen der Montagevorspannkraft erklären zu können. Vor der Verschraubung wurde die Referenzlänge jeder Schraube mittels Ultraschall gemessen und in BoltMikeII vermerkt um anschließend die Vorspannkraft an Hand dieser Referenzlänge zu berechnen. Die Temperatur wurde mit einem Oberflächentemperaturmessgerät vor der Messung bestimmt und eingegeben. Um einen Einfluss der während des Verschraubvorgangs entstehenden Furchwärme zu vermeiden, wurde nach dem Anzug 10 min gewartet. Nach einer Temperaturmessung am Schraubenkopf wurde die Vorspannkraft gemessen (siehe Abb. 3.5 a).

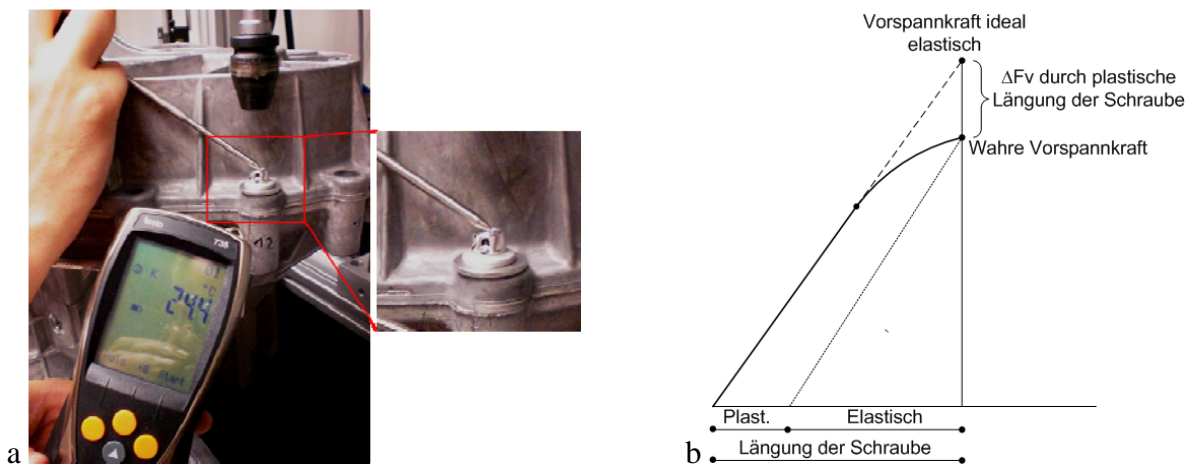


Abb. 3.5: Temperaturmessung (a); Einfluss des überelastischen Anzugs auf die Vorspannkraftmessung (b)

Wie bereits erwähnt tritt bei einem überelastischen Anzug eine plastische Längung der Schraube auf. Da bei der Vorspannkraftmessung mittels BoltMikeII die Auswirkungen einer plastischen Längung der Schraube nicht abgebildet werden können, ist zu erwarten, dass die gemessenen Vorspannkraft höher als die tatsächlich in der Schraube vorherrschenden sind (siehe Abb. 3.5 b).

Eine rein elastisch verformte Schraube weist nach dem Entschrauben keine verbliebene Vorspannkraft mehr auf, da die Schraube wieder die Ausgangslänge annimmt. Auf Grund der plastischen Längung der Schraube beim überelastischen Anzug ist nach dem Entschrauben noch eine messbare Vorspannkraft zu erwarten. Diese Restvorspannkraft kann vom Messwert im verschraubten Zustand abgezogen werden um annähernd die wahre Montagevorspannkraft zu erhalten (.

3.4. Ergebnisse

Die Montagevorspannkraft nach Anzug der Schrauben sowie die Restvorspannkraft nach dem Ausbau der Schrauben wurde gemessen und daraus die wahre Montagevorspannkraft errechnet. Durch Längenmessungen mittels Ultraschall wurden die Längen der Schrauben vor dem Anziehen und nach dem Entschrauben gemessen und die plastische Längung bestimmt. Es existiert ein linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen plastischen Längung der Schraube und der gemessenen Restvorspannkraft nach dem Ausbau der Schraube (siehe Abb. 3.6). Weiters ist ersichtlich, dass bei unterer Kernlochtoleranz tendenziell kleinere Restvorspannkraft bzw. kleinere plastische Längungen der Schrauben gemessen wurden. Der Grund dafür liegt im unterschiedlich hohen Furchmoment. Bei unterer Kernlochtoleranz ist das für das Furchen notwendige Moment signifikant größer wodurch weniger Drehmoment

zum Aufbau der Vorspannkraft zur Verfügung steht. Folglich führt das kleinere effektive Anzugsmoment zu einer geringeren plastischen Längung der Schraube.

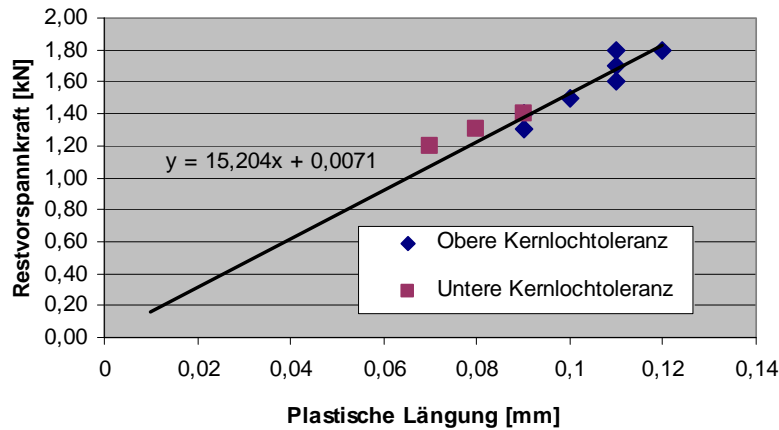


Abb. 3.6: Zusammenhang zwischen plastischer Längung der Schraube und gemessener Restvorspannkraft nach Ausbau der Schraube

EN AW 6056 M8x31 und M10x40 Stahlschrauben:

Die metrischen Stahlschrauben M10x40 wurden in ein Seriengetriebegehäuse der Mg-Legierung AZ91 mit vorgeschnittenem Gewinde mit einem Moment von 34 Nm angezogen. Die metrischen Al-Schrauben M8x31 wurden in ein Prototypengetriebegehäuse überelastisch mit 15 Nm + 90° verschraubt.

3.5. Vergleich der Messergebnisse

In Abb. 3.7 sind die gemessenen Vorspannkraftwerte abgebildet. Bei den überelastischen angezogenen Al-Schrauben sind die Klemmkraftwerte sowohl beim Schwellmoment (Fv 17 Nm bzw. Fv 15 Nm) als auch nach der gesamten Anzugsvorschrift aufgeführt (17 Nm+90° bzw. 15 Nm+90°). Die gemessenen Montagevorspannkraft der TT2000 M8x35 EN AW 7075 wurden um den Betrag der durchschnittlichen Restvorspannkraft von 1,3 kN vermindert (Fv red). Bei den Schrauben M8x31 EN AW 6056 wurde der gleiche Betrag abgezogen da keine genauen Versuchsdaten vorlagen.

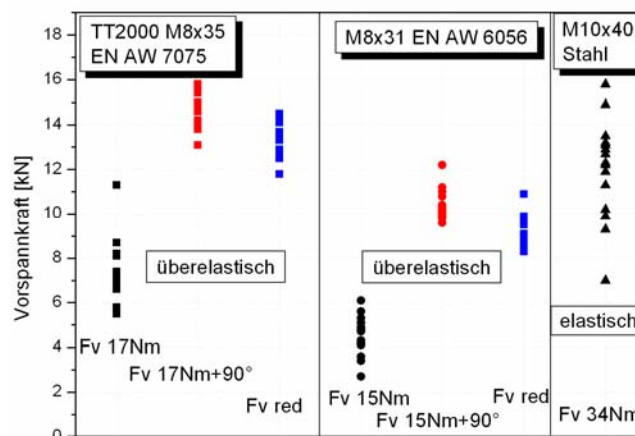


Abb. 3.7: Vergleich der erzielten Vorspannkraftwerte der unterschiedlichen Schraubentypen

Es ist erkennbar, dass die Vorspannkraftwerte bei den überelastisch angezogenen Al-Schrauben eine geringere Streuung aufweisen als die elastisch angezogenen Stahlschrauben. Dies kann durch den größeren Einfluss der Gewinde- und Unterkopfreibung auf die Vorspannkraft beim elastischen Anzug erklärt werden (Abb. 3.8 b). Die höchstfesten Al-

Schrauben 7075 weisen signifikant höhere Montagevorspannkraften als die Al-Schrauben 6056 bei vergleichbar geringer Streuung auf. Es ist bemerkenswert zu erwähnen, dass die Stahlschrauben beim in Serie angewandten Anzugsverfahren von 34 Nm keine höheren Vorspannkraften als die höchstfesten Al-Schrauben TT2000 M8x35 EN AW 7075 aufweisen. Vielmehr kommt es auf Grund der starken Schwankungen vereinzelt zu Schrauben mit sehr niedrigen Vorspannkraftwerten im Bereich von 7 – 9 kN. Es ist anzunehmen, dass die Stahlschrauben durch Erhöhung des Anzugsmoments noch höhere Vorspannkraften erreichen. Dies war aber nicht Ziel der Untersuchung.

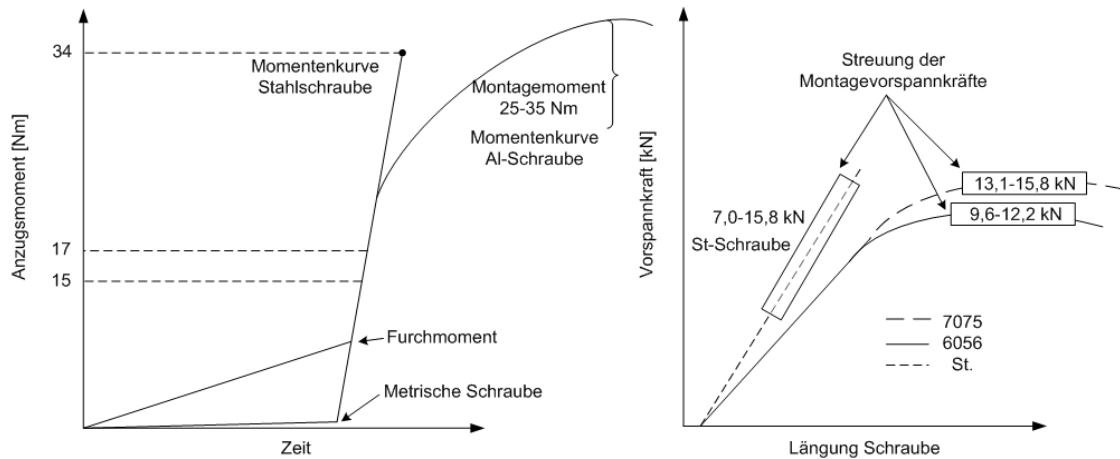


Abb. 3.8: Momentenkurve beim drehzahlgesteuerten Schraubenanzug (a); Vorspannkraftaufbau beim Schraubenanzug (b)

Abb. 3.8 a zeigt schematisch den Verlauf einer Momentenkurve für die Stahl- bzw. Aluminiumschraube beim drehzahlgesteuerten Anzugsverfahren. Die metrischen Schrauben weisen ein sehr geringes Verschraubmoment beim Einschrauben auf, wogegen für die Furcharbeit ein höheres Drehmoment überwunden werden muss. Das Plastifizieren der Aluminiumschrauben ist an dem Abflachen der Momentenkurve zu erkennen, während die Stahlschraube beim verwendeten Anzugsverfahren noch linear elastisch ist. In Abb. 3.8 b ist schematisch der Aufbau der Vorspannkraft beim Anzug der unterschiedlichen Schrauben dargestellt. Der höhere E-Modul der Stahlschraube bewirkt eine geringere Längung im Vergleich zu den Al-Schrauben. Der Einfluss des überelastischen Anzugs auf die Streuung der Vorspannkraften ist ersichtlich.

Die niedrige Dehngrenze der Al-Schrauben EN AW 6056 führt zu früheren Plastifizierungen der Schraube während des Anzugs und resultiert in niedrigeren Montagevorspannkraften im Vergleich zur Al-Schraube EN AW 7075 (siehe Tab. 3.1).

	EN AW 7075	EN AW 6056	Stahl 9.8
Dehngrenze Rp0,2 [MPa]	460-480	400-420	720-750
Fv min [kN]	13,1	9,6	7
Fv max [kN]	15,8	12,2	21,7

Tab. 3.1: Dehngrenzen und resultierende minimale und maximale Vorspannkraftwerte der unterschiedlichen Schraubentypen

4. Diskussion

Die Vorspannkraftmessmethode mittels Ultraschall bietet die Möglichkeit Klemmkraften in Schraubverbänden mit originalem Aufbau einfach und schnell zu messen. Auf Grund des erheblichen Temperatureinflusses auf das Messsignal können beim verwendeten Gerät BoltMikeII nur Klemmkraften bei stationärer Temperatur bestimmt werden. Es ist daher zu sagen, dass dieses Gerät vorwiegend für die Erfassung von Montagevorspannkraften geeignet

ist. Bei kontinuierlichen Vorspannkraftmessungen wie dies bei Relaxationsmessungen notwendig ist, erschwert das erforderliche Abkühlen des Schraubverbandes auf Umgebungstemperatur die Messungen erheblich. Hier ist eine Kombination von Ultraschallmessung und Kraftmessdose vorstellbar. Alternativ zu BoltMikeII bietet die Fa. Intellifast GmbH eine sehr aufwendige und kostenintensive Möglichkeit zu Dauermessungen von Vorspannkraften mittels Ultraschall auch bei erhöhter Temperatur.

Dauerhafte Messungen der Vorspannkraft sind mit der Methode der Kraftmessdose auch bei erhöhter Temperatur problemlos möglich. Die notwendige Veränderung des Schraubverbandes führt zu veränderten Steifigkeiten und beeinflusst die Messwerte bei erhöhter Temperatur auf Grund der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Teile im Schraubverband signifikant. Die Methode der Dehnmessstreifen bietet die Möglichkeit einer Dauermessung der Klemmkraft bei sich verändernder Temperatur. Bestimmte Voraussetzungen hinsichtlich des Schraubentyps bzw. die Applikation und notwendigen Präparation von Schraube und Schrauber machen diese Art der Vorspannkraftmessung aufwendig und kostenintensiv.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die verwendete Methode der Ultraschallmessung mittels BoltMikeII zur Erfassung von Montagvorspannkraften bei allen untersuchten Schraubentypen zu guten reproduzierbaren Messwerten führte. Bei Langzeitmessungen zur Untersuchung des Vorspannkraftabfalles bei erhöhter Temperatur sollten aber vermehrt Kraftmessdosen bzw. Dehnmessstreifen verwendet werden.

5. Literatur

- [1] Hinteregger Chr., Leitner H., Jakob T., Godor I.: Relaxationsverhalten von EN AW 7075 Gewindefurchschrauben für Antriebsstrangkomponenten aus Magnesium (Teil 1), Fachaufsatz Verbindungstechnik, Konstruktion September 9-2008, Seite 109-114
- [2] Heinrich F.: "Aluminiumschrauben mit gesteigerten mechanischen Eigenschaften für höher beanspruchte Leichtmetallverbindungen", 8. Informations- und Diskussionsveranstaltung, Darmstadt, 10.05.2006
- [3] Friedrich H.: "Werkstofftechnische Anforderungen an gewindefurchende Verbindungselemente", DVM Bericht 671, 2004, S. 23
- [4] Leitner H., Hinteregger Chr., Jakob T., Gerstmayr G. & Oberhuber P.: Einsatz hochfester Aluminium-Gewindefurchschrauben für Antriebsstrangkomponenten aus Magnesium-Legierungen zur Reduktion des Gewichtes und der Kosten, DVM-Bericht 675, DVM-Tag 2008
- [5] Arz U., Berger C., Kaiser B., Kremer U.: Relaxationsverhalten von Schrauben aus Aluminiumlegierungen bei 150°C, Fachaufsatz Verbindungstechnik, Konstruktion April 4-2003, Seite 70-74
- [6] Xu S., Williams G. et al: Bolt-load Retention Testing of Magnesium Alloys for Automotive Applications, SAE technical paper, 2006-01-0072
- [7] Moreno I., Sohn K., Jones J., Allison, J.: Bolt-Load Retention Behaviour of a Die Cast Magnesium-Rare Earth Alloy, SAE technical paper, 2001-01-0425
- [8] Chen F., Jones J., McGinn T., Kearns J., Nielsen A., Allison J.: Bolt-Load Retention and Creep of Die-Cast Magnesium Alloys, SAE technical paper 970325
- [9] Sohn K., Yurko J., Jones J., Kearns J., Allison J.: Bolt-Load Retention Behaviour of a Die-Cast AZ91D and AE42 Magnesium, SAE technical paper 980090
- [10] Handbuch BoltMikeII SW-Vers. 1.5