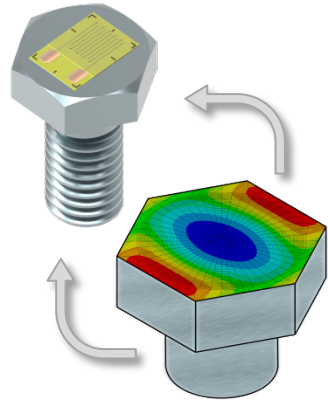


Messverfahren zur Ermittlung der Schraubenvorspannung mittels Dehnungsmessstreifen

Chorzewski, D.; Hofmann, S.

Im folgenden Artikel wird das im letzten Jahr vorgestellte rückwirkungsfreie Messverfahren zur Messung von Schraubenvorspannkraften mit Dehnungsmessstreifen (DMS) näher untersucht. Vorgestellt wird ein aufgebautes FEM-Modell zur Charakterisierung unterschiedlicher Einflussfaktoren und eine erste Testmessung.



In the following section, the repercussion free measurement method for measuring bolt preload tension with strain gauges that was presented last year is analysed. A structured FEM model for the characterisation of different influencing factors and a first test measurement will be presented.

Einleitung

Für einen sicheren Betrieb von Schraubenverbindungen ist die Kenntnis der Schraubenvorspannung unerlässlich. In vielen Anwendungsbereichen reicht ein Anziehen der Schraubverbindung mittels eines Drehmomentschlüssels aus, um die erforderliche Schraubenvorspannung zu gewährleisten. Dieses Verfahren ist jedoch stark von den vorliegenden Reibungsverhältnissen abhängig. Für kritische Anwendungszwecke und die Überwachung im laufenden Betrieb bieten sich weitere Verfahren an. Zwei übliche Messprinzipien basieren dabei auf die Verwendung von Dehnungsmessstreifen. Diese werden entweder auf einem verjüngten Schraubenschaft oder in einer im Schaft befindlichen zentrischen Bohrung installiert. Nachteil dieser Verfahren ist die Modifizierung der Schraube im verspannten Zustand und der damit resultierenden Verringerung der zulässigen Schraubenvorspannkraft. Daher soll das in /1/ beschriebene Verfahren näher untersucht werden, da eine quasi rückwirkungsfreie Messung ermöglicht wird. Vorgesehen ist dabei die Installation von DMS auf der Schraubenkopfoberfläche.

Zur Realisierung des Vorhabens wird im Folgenden eine FEM-Simulation einer vereinfachten Schraubverbindung aufgebaut. Diese wird zur Charakterisierung unterschiedlicher Einflussfaktoren und zur Beurteilung der in Versuchen auftretenden Streuungen verwendet. Abschließend erfolgt eine Testmessung.

FEM - Simulation

Um die in der Schraube vorliegenden Beanspruchungsverhältnisse zu untersuchen, wurde ein FEM-Modell einer vereinfachten Schraubverbindung aufgebaut. Das Modell ist reduziert auf eine Schraube ohne Gewinde, sowie auf eine zylindrische Auflagefläche. Die Vorspannkraft der Schraube wird durch eine Zugkraft an der freien Schraubenstirnfläche dargestellt. Darüber hinaus wurde das Modell basierend auf die Norm DIN EN ISO 4014 (Sechskantschrauben mit Schaft) parametrisch aufgebaut. Einerseits können dadurch die Auswirkungen der tolerierten Schraubenabmessungen auf die Höhe der Beanspruchungen in einer Parameteranalyse untersucht werden. Andererseits besteht die Möglichkeit das aufgebaute Modell für alle in der oben genannten Norm dargestellten Schraubengrößen zu verwenden.

In Abbildung 1 ist exemplarisch der Spannungsverlauf (von Mises-Vergleichsspannung) im aufgebauten Modell (Schraube: M8 x 60 - 8.8) bei Belastung mit einer Schraubenvorspannkraft abgebildet.

ISO 4014 - M8 x 60
Vergleichsspannung (von Mises)



Max Min

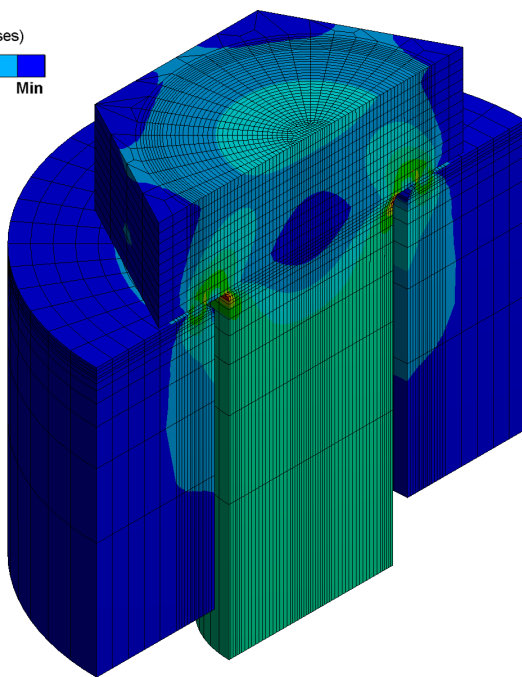


Abbildung 1: Exemplarischer Spannungsverlauf im aufgebauten Modell bei Belastung mittels einer Vorspannkraft F_V

Da der Fokus im aktuellen Vorhaben auf den Schraubengrößen M6 und M8 liegt, wurde nach der Bestätigung der Plausibilität der Modellergebnisse eine Parameteranalyse durchgeführt. Das vergleichende Kriterium zwischen den einzelnen Untersuchungen ist hierbei die minimale normale elastische Dehnung (Druck) die sich in der Mitte der Schraubenkopfoberfläche ergibt. Diese Dehnung wird anschließend ebenfalls als Erwartungswert für die experimentellen Untersuchungen herangezogen.

Durch die Parameteranalyse wurde nachgewiesen, dass eine Veränderung bestimmter einzelner Abmessungen des Modells die Dehnungen auf der Schraubenkopfoberfläche beeinflusst. Als Beispiel sei hier der Schaftdurchmesser der Schraube d_s , der Durchmesser der Durchgangsbohrung d_d und die Kopfhöhe k zu nennen. Die Schlüsselweite s hat im Gegensatz zu den oben genannten Abmessungen keinen Einfluss. In Abbildung 2 wird der Einfluss einer Veränderung der Kopfhöhe k dargestellt. Die untersuchten Abmessungen entsprechen der unteren (5,06 mm) und oberen (5,54 mm) Toleranzgrenze, wobei $k = 5,3$ mm dem Nennmaß entspricht.

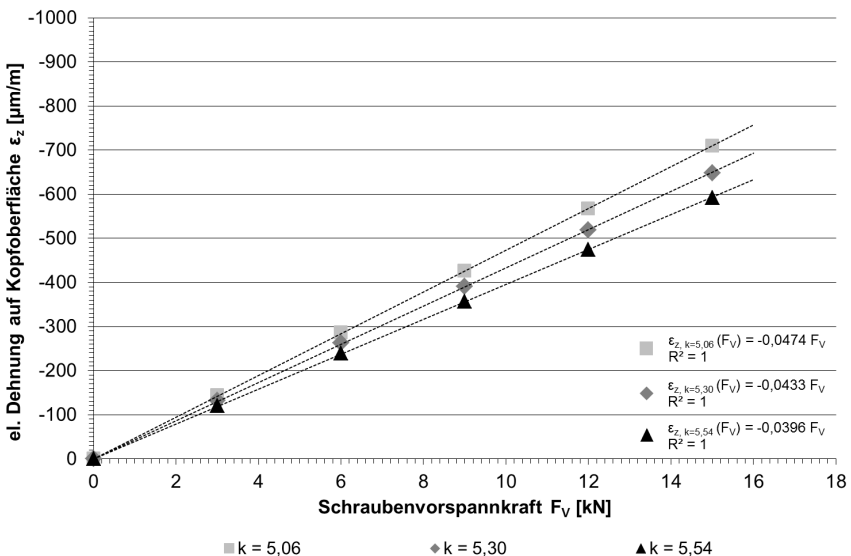


Abbildung 2: Verlauf der min. normalen elastischen Dehnung ϵ_z auf der Kopfoberfläche in Abhängigkeit der Kopfhöhe k und der Vorspannkraft F_V bei sonst konstanten Abmessungen

Die erste wichtige Erkenntnis aus Abbildung 2 ist die für die Realisierung des Vorhabens notwendige Linearität zwischen Schraubenvorspannkraft und Dehnung. Ferner ist eine prozentuale Abweichung der Dehnung von bis zu 20 Prozent durch die fertigungsbedingten Toleranzen der Kopfhöhe zu erwarten.

Da eine Schraubenkennzeichnung auf jeder Kopfoberfläche vorgeschrieben ist, ist eine Bearbeitung dieser vor dem Kleben der DMS erforderlich. Dies ermöglicht es, die Kopfhöhe der zu beklebenden Schraube ungefähr auf das zugelassene Mindestmaß zu reduzieren um die Messwertstreuung der späteren Messung gering zu halten. Festgelegt wird daher $k = 5,0 \text{ mm}$ bei M8 Schrauben und $k = 3,7 \text{ mm}$ bei M6.

Durch das aufgebaute parametrische FEM-Modell der Schraube wurde gezeigt, dass eine Bestimmung der Schraubenvorspannkraft aus der am Schraubenkopf vorliegenden Dehnung möglich ist. Weiterhin wurden Erwartungswerte für die anschließenden experimentellen Messungen bestimmt und verschiedene Einflussfaktoren dargestellt. Damit diese Einflussfaktoren auch bei der späteren Messung charakterisiert werden können, wurde die Konstruktion aufbauend auf den FEM-Analysen aufgebaut (siehe Kapitel Messverfahren).

Messverfahren

Für die Messung der Dehnungen an der Schraubenkopfoberfläche wurden unterschiedliche DMS-Bauformen in Betracht gezogen. Durch die vorliegenden Platzverhältnisse, insbesondere bei der M6 Schraube, wird die Auswahl beschränkt. Zusätzlich soll das Messverfahren einfach in der Handhabung und wirtschaftlich sein, sodass sich die Auswahl weiter reduziert. Aufgrund dieser genannten Kriterien werden im weiteren Vorhaben lineare DMS mit Anschlusskabeln verwendet. Diese DMS werden mit dem Ziel der Messung der maximalen Empfindlichkeit bzw. der maximalen Dehnung mittig auf der Schraube appliziert. In Abbildung 3 ist die Positionierung der DMS auf dem Schraubenkopf dargestellt.

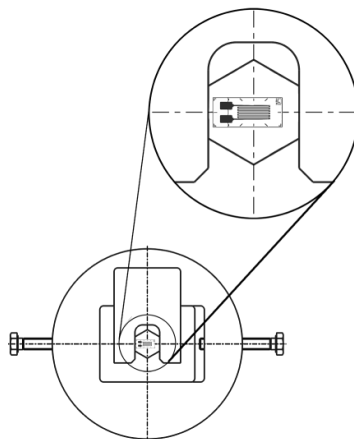


Abbildung 3: Draufsicht der konstruierten Messeinrichtung mit einem applizierten linearen DMS der Fa. HBM (DMS aus /3/)

Nach der Auswahl der DMS erfolgte die Konstruktion der Messeinrichtung für die experimentellen Untersuchungen (siehe Abbildung 4). Dabei dient die Ringkraftmessdose (6) zur Messung der Schraubenvorspannkraft im verspannten Zustand der zu untersuchenden Schraube (3). Das Verspannen der Schraube erfolgt durch das Anziehen der Mutter (10), wobei die Schraubensicherung (4) das Mitdrehen der Schraube verhindert. Für die Untersuchung der beiden Schraubengrößen ist die Schraubenauflagefläche (5), sowie die Mutterauflage (9) austauschbar. Durch das Axiallager (8) der Mutterauflage wird versucht ein möglichst annähernd torsionsfreies Anziehen der Schraube zu ermöglichen.

Einige der im Kapitel „FEM-Simulation“ ermittelten Einflussfaktoren wurden innerhalb der Konstruktion und Fertigung berücksichtigt. So ist die Schraubenauflagefläche für die beiden Schraubengrößen in jeweils dreifacher Ausführung vorhanden (unterschiedliche Durchgangsbohrungen). Außerdem ist durch ein Wenden der Auflagefläche eine Anpassung der Bohrungsfasen möglich. Des Weiteren kann durch die seitliche linke Schraube (1) eine gewünschte Exzentrizität zwischen der Schraubenachse und der Bohrungsachse eingestellt werden.

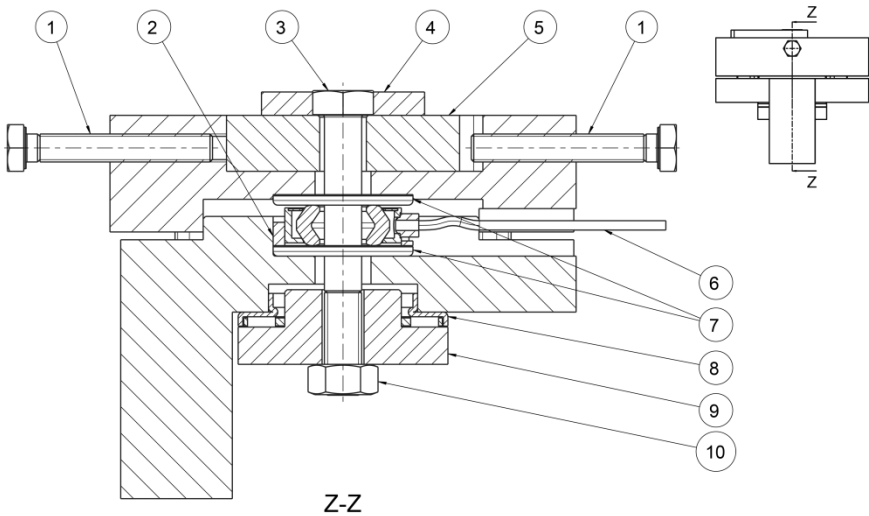


Abbildung 4: Schnittansicht der konstruierten Messeinrichtung im zusammengebauten Zustand

Experimentelle Untersuchung - Erste Ergebnisse

Für die Ermittlung der Empfindlichkeit werden die Schrauben entsprechend der zuvor getroffenen Erkenntnisse mit einem DMS versehen und in die Messeinrichtung eingesetzt. Der Versuchsablauf beinhaltet anschließend ein stufenförmiges Anziehen und Lösen der Schraube unter Berücksichtigung der maximalen Vorspannkraft. Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wird die Schraube einige Male neu eingesetzt und die Messungen entsprechend wiederholt.

In Abbildung 5 sind die Messwerte der durchgeführten Messung an einer M8 x 60 - 8.8 Schraube als Datenpunkte dargestellt. Durch diese ist eine Regressionsgerade gelegt, die die elektrische Empfindlichkeit des Systems beschreibt (siehe Gleichung 1).

$$\frac{u}{F_V} = -0,0239 \frac{\text{mV/V}}{\text{kN}} \quad 1$$

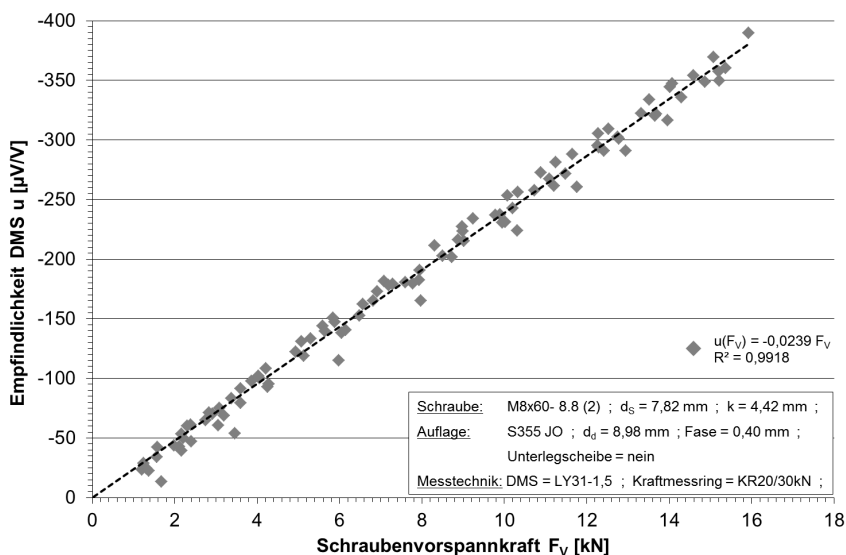


Abbildung 5: Datenpunkte der gemessenen Schraubenvorspannkraft F_V der Ringkraftmessdose in Abhängigkeit der gemessenen elektrischen Empfindlichkeit des DMS u

Im Vergleich zur durchgeführten Messung mit linearem DMS in /1/, weist die Abbildung 5 eine geringere Streuung der Messwerte auf. Als Gründe hierfür

werden der geänderte Versuchsaufbau mit verbesserter Messtechnik und die genauere Platzierung der DMS auf dem Schraubenkopf angenommen.

Bei Betrachtung der ermittelten mittleren Empfindlichkeit, zeigt sich für die aktuell durchgeführten Messungen eine in etwa gleich große Empfindlichkeit wie in /1/. Da im Vergleich zu /1/ jedoch eine andere Schraubengröße untersucht wurde, sind die ermittelten Empfindlichkeiten nicht direkt miteinander vergleichbar. Wie sich die Empfindlichkeiten in Abhängigkeit der Schraubengrößen verändern wird in weiteren Untersuchungen geprüft. Ferner muss angemerkt werden, dass die zuvor dargestellte Messung mit einer nach der Norm DIN EN ISO 4014 zu geringen Kopfhöhe durchgeführt wurde ($k = 4,4 \text{ mm}$). Dennoch wird bei den weiterfolgenden Messungen mit einer Kopfhöhe von $k = 5,00 \text{ mm}$ eine immer noch ausreichend hohe Empfindlichkeit erwartet.

Vergleich: Testmessung und Berechnung mittels FEM-Modell

In Abbildung 6 ist ein Vergleich der ermittelten Dehnungen aus der Testmessung (Mittelwert) und einer auf die untersuchte Schraube angepasste FEM-Berechnung dargestellt. Die Abweichung zwischen beiden Kurven beträgt ca. 9 %. Dies wird als akzeptable Abweichung eingestuft, da keine genauen Werkstoffkennwerte vorliegen und nicht alle für das FEM-Modell notwendigen Schraubenabmessungen ermittelt werden können. Zusätzlich muss noch die statistische Unsicherheit der durchgeführten Messung berücksichtigt werden.

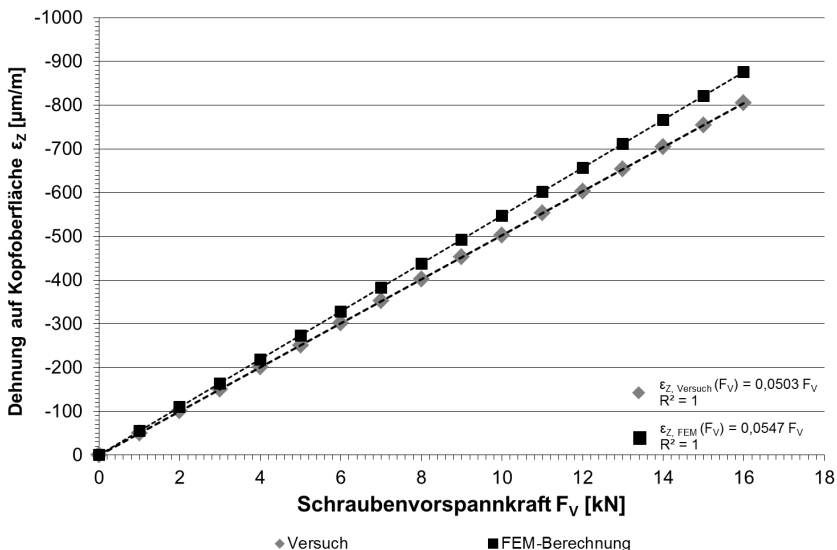


Abbildung 6: Vergleich der ermittelten Dehnungen aus der Testmessung und einer FEM-Berechnung

Ausblick

Im weiteren Verlauf werden weitere Schrauben in den Größen M6 und M8 untersucht. Im Anschluss an die Versuche wird dann eine statistische Auswertung dieser zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit des Messverfahrens durchgeführt. Weiterhin sollen unterschiedliche Einflussfaktoren wie z.B. die Änderung der Durchgangsbohrungen untersucht werden.

Ferner soll bei zu hoher Streuung der Messergebnisse, infolge der unterschiedlichen Schraubengeometrien, das FEM-Modell zur Verbesserung der Ergebnisse verwendet werden. Dafür ist vorgesehen eine statistische Versuchsplanung (DOE) in ANSYS durchzuführen, um eine Gleichung zu ermitteln durch die anschließend ein Korrekturfaktor für die einzelnen Schrauben berechnet werden kann.

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Artikel wurde das in /1/ beschriebene Messverfahren zur Ermittlung von Schraubenvorspannkraften mittels am Schraubenkopf installierter DMS genauer untersucht. Hierfür wurde ein FEM-Modell aufgebaut, welches die Möglichkeit schafft unterschiedliche Einflussfaktoren zu charakterisieren. Als Beispiel sei hier die Kopfhöhe zu nennen. Allein durch die fertigungstechnische Toleranz ist mit einer Streuung der Ergebnisse von bis zu 20 % zu rechnen. Das Ziel ist daher die Schraubenkopfhöhe vor der Installation der DMS auf eine normierte Höhe plan zu schleifen. Aufbauend auf der FEM-Simulation wurde anschließend die Platzierung der DMS festgelegt und eine Messeinrichtung konstruiert. In einer ersten Testmessung wurden anschließend die Ergebnisse aus /1/ bestätigt. Im Unterschied zur vorangegangenen Messung ist mit einer geringeren Streuung, sowie mit einer höheren elektrischen Empfindlichkeit zu rechnen. Dieses Ergebnis soll durch weitere Versuche abgesichert werden und als allgemeingültiges, quasi rückwirkungsfreies Messverfahren etabliert werden.

Literatur

- /1/ Hofmann, S.: Möglichkeiten zum Erfassen der Schraubenvorspannung mit Dehnungsmessstreifen, Institutsmittteilung Nr. 39, IMW Clausthal 2014
- /2/ Norm DIN EN ISO 4014 Juni 2011. Sechskantschrauben mit Schaft; Produktklassen A und B
- /3/ Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH: Dehnungsmessstreifen - Vollendete Präzision von HBM. Darmstadt, 2015. - Produktkatalog