

InSitu - Vorspannkraft großer Schrauben bei Windenergieanlagen

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann, Dipl.-Ing. Tim Rutkowski
Institut für Stahlbau; Universität Hannover

Zusammenfassung

Die Vorspannkraft von dynamisch beanspruchten, vorgespannten Schraubenverbindungen ist für den Ermüdungsnachweis von großem Einfluss. Schadensfälle und Ausführungsmängel in Verbindung mit zu geringen Vorspannkraften bei Flanschverschraubungen von Windenergieanlagen gaben Anlass, im Rahmen eines Forschungsvorhabens Schraubenvorspannkraften in großem Umfang zu messen. Der vorliegende Beitrag stellt die Methodik und den Stand der Messungen vor.

1. Einleitung

Vorgespannte Verbindungen mit hochfesten Schrauben sind weit verbreitet. Sie finden beispielsweise Anwendung in Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen (Abb. 1-1).

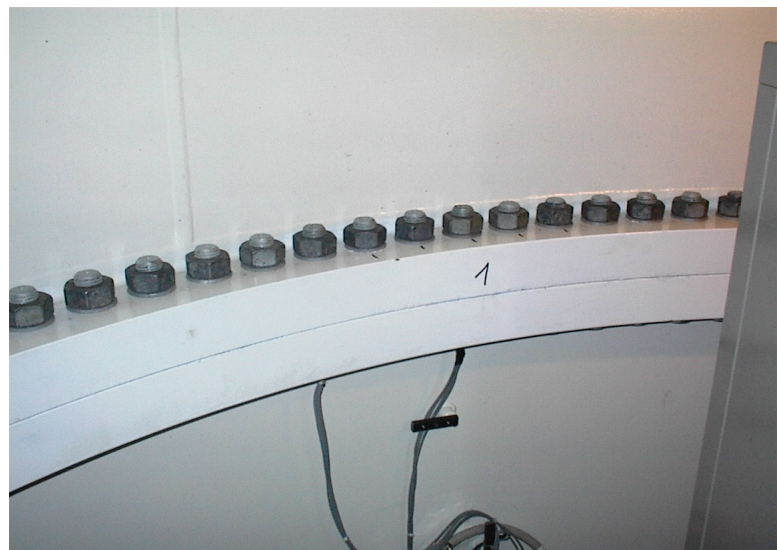
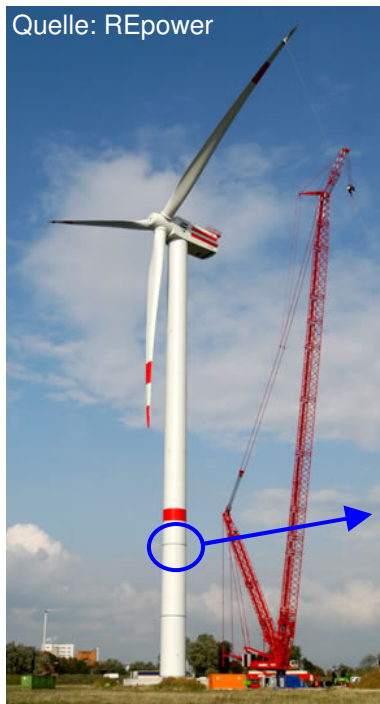


Abbildung 1-1: Windenergieanlage mit Ringflanschverbindung

In Verbindungen dieser Art ist der Verlauf der Schraubenkraft nichtlinear von der äußeren Belastung abhängig (Abb. 1-2). Da Windenergieanlagen stark dynamisch beansprucht sind, kommt diesem Phänomen eine große Bedeutung zu.

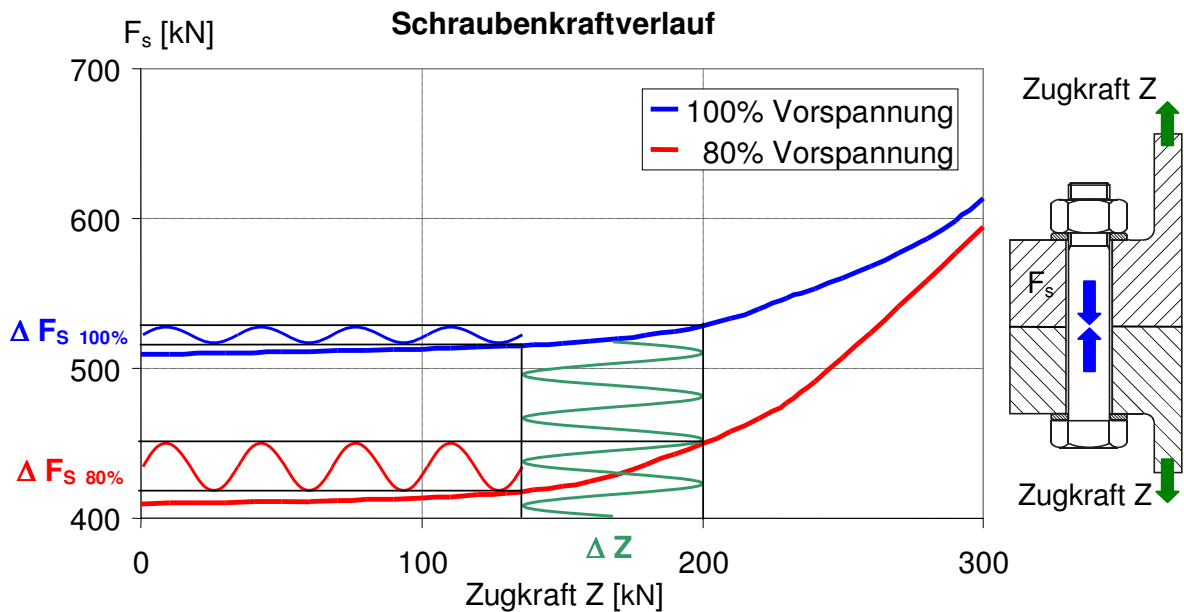


Abbildung 1-2: Schraubenkraftverlauf im Ringflansch in Abhängigkeit der äußeren Belastung für verschiedene Vorspannkraft

Eine zu geringe Vorspannkraft kann zu vergrößerten Spannungsschwingweiten und damit zu größeren Schädigungen der Schraube führen. Bei abgeschlossenen Untersuchungen des Institutes für Stahlbau [1] wurden Vorspannkraft von HV-Schrauben in Windenergieanlagen gemessen, welche teilweise unterhalb der Mindestvorspannkraft nach DIN 18800-7 [2] lagen. Die Abweichungen waren jeweils montagebedingt und nicht auf Setzungsvorgänge der Verbindung zurückzuführen.

Daher stellte sich die Frage, ob die übliche Montagepraxis Fehlerquellen enthält. Im Verlauf eines aktuellen Forschungsvorhabens werden während der Montage von Windenergieanlagen die resultierenden Vorspannkraft von HV-Schrauben der Abmessungen M 36 und M 48 gemessen. Mögliche Einflussparameter auf die Schraubenvorspannkraft wie das Montagedrehmoment und die Beschichtungsdicken der Flansche werden dabei ebenfalls registriert, um auf mögliche Fehlerquellen schließen zu können.

2. Messverfahren

Um die Schraubenvorspannkraft zu messen, war zunächst ein geeignetes Messverfahren zu entwickeln. Übliche Verfahren zur Schraubenkraftbestimmung sind die Messung mit Dehnungsmessstreifen, Ultraschallmessungen und mechanische Längenmessungen, wobei alle Verfahren die Schraubenkraft indirekt über die Dehnungen bzw. Längenänderung bestimmen. Die von Seidel [3] und Jakubowski [4] verwendete DMS-Methode bietet den Vorteil, neben der Schraubenkraft auch Biege- und Torsionsmomente zu erfassen zu können. Nachteil des Verfahrens sind die hohen Kosten, da jede einzelne Schraube aufwändig präpariert werden muss.

Bei einem angestrebten Umfang von 500 bis 1000 Schrauben, wird die Schraubenkraftmessung mit DMS nur vereinzelt zu Kontrollzwecken vorgenommen.

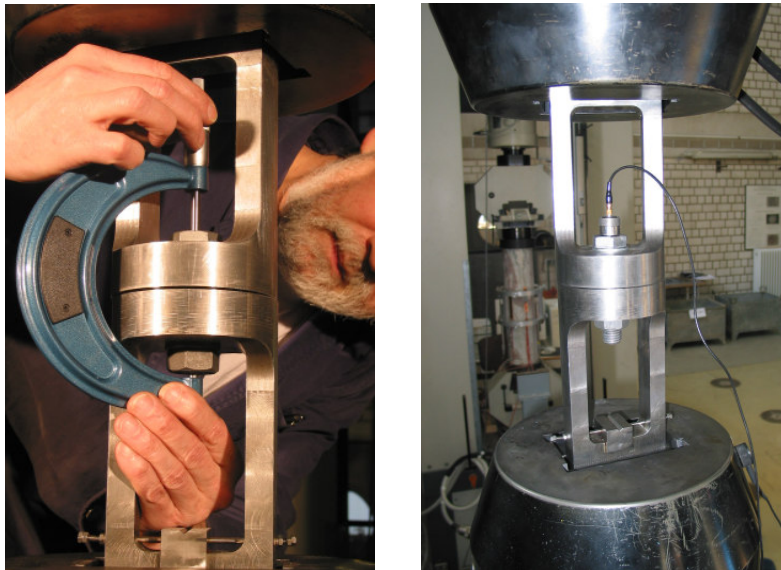


Abbildung 2-1: Messung mit Bügelmessschraube und Ultraschallverfahren

Zur Auswahl der geeigneten Messmethode wurden Vergleichsmessungen vorgenommen. Dabei wurde die sich ergebende Längenänderung einer zugbeanspruchten Schraube mit Hilfe einer Bügelmessschraube mit ebenen Messflächen und einem Ultraschallgerät gemessen (Abb. 2-1). Kopf und Kuppe der Schraube waren dazu plan bearbeitet worden. Abbildung 2-2 zeigt die sich ergebenden Dehnungen. Beide Messverfahren weisen vergleichbare Genauigkeiten auf.

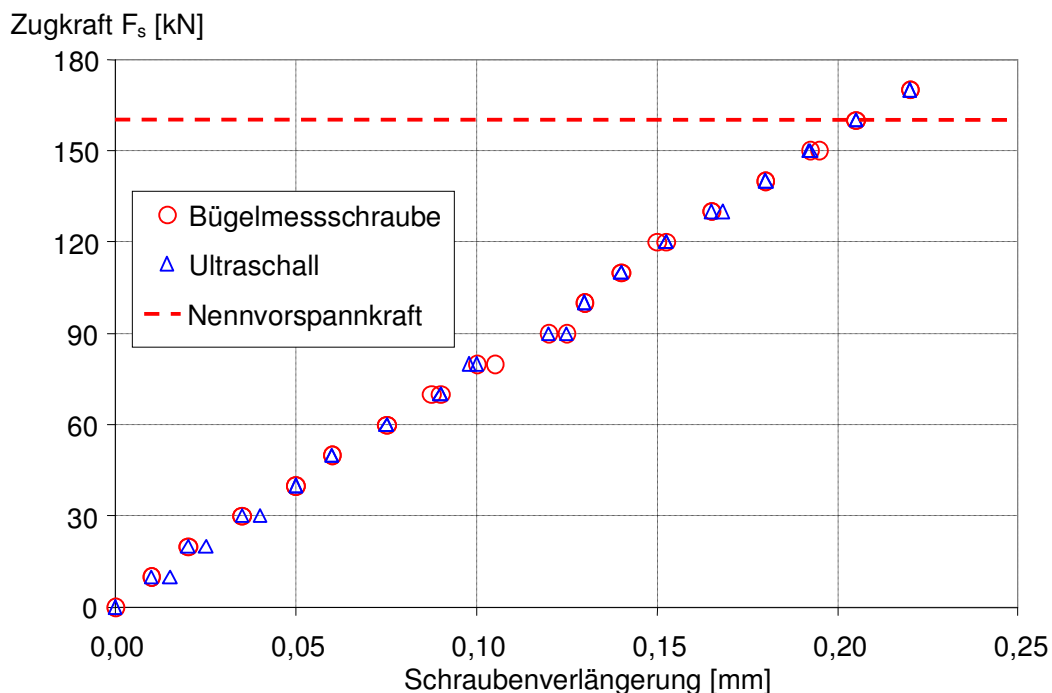


Abbildung 2-2: Kraft-Verschiebungskurve M20 x 100

Für die Feldmessungen wurde schließlich die mechanische Messung mit einer Bügelmessschraube bevorzugt, wobei das Messwerkzeug auf die Anforderungen der Feldmessungen angepasst wurde. Dazu wurde für die zu vermessenden Flanschverschraubungen mit HV-Garnituren der Nennlänge zwischen 200 und 300 mm eine Bügelmessschraube mit entsprechender Messlänge angefertigt. Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wurden die Messflächen kugelförmig gestaltet und die Messschrauben mit kegelförmigen Zentrierbohrungen versehen (Abb. 2-3). Auf diese Weise wird ein Kugel-Kegel-Kontakt hergestellt, bei dem der Einfluss von Imperfektionen der Verbindung, wie etwa Kopf-Schiefstellungen, vermindert und eine gute Reproduzierbarkeit erreicht wird.

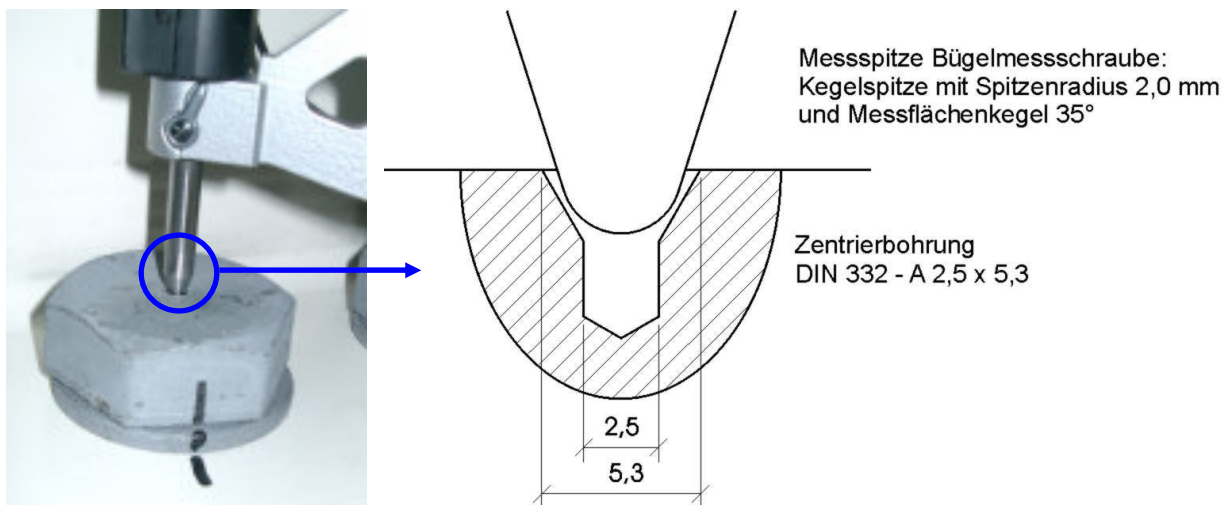


Abbildung 2-3: Messspitze an HV-Schraube M 36

Die sich beim Anziehen der Schraube einstellende Dehnung wird mit der Bügelmessschraube gemessen. Sie ergibt sich aus der Differenz der Schraubenlänge im unbelasteten (l_0) und im montierten Zustand (l_1). Die Ausgangslänge der Schraube im unbelasteten Zustand wird durch wiederholtes Vermessen der Schraube im Labor vor ihrem Einbau bestimmt. Aus der sich ergebenden Längenänderung Δl kann bei bekannter Schraubensteifigkeit auf die Vorspannkraft F_s geschlossen werden:

$$F_s = k_s \cdot \Delta l = k_s \cdot (l_1 - l_0)$$

Die Schraubensteifigkeit k_s wird stellvertretend für alle Schrauben einer Charge an einer Stichprobe ermittelt. Dazu werden die Schrauben in einer Prüfmaschine axial belastet und die sich einstellenden Dehnungen gemessen. Die Dehnsteifigkeit k_s der Schraube wird dann aus den Messergebnissen durch eine Regressionsgerade ermittelt. Die Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen eines mit Hilfe von Literaturwerten validierten FE-Modells der Schraube ist sehr gut. Es treten dabei auch nur sehr geringe Schwankungen der Schraubensteifigkeit, innerhalb einer Charge auf (Abb. 2-4).

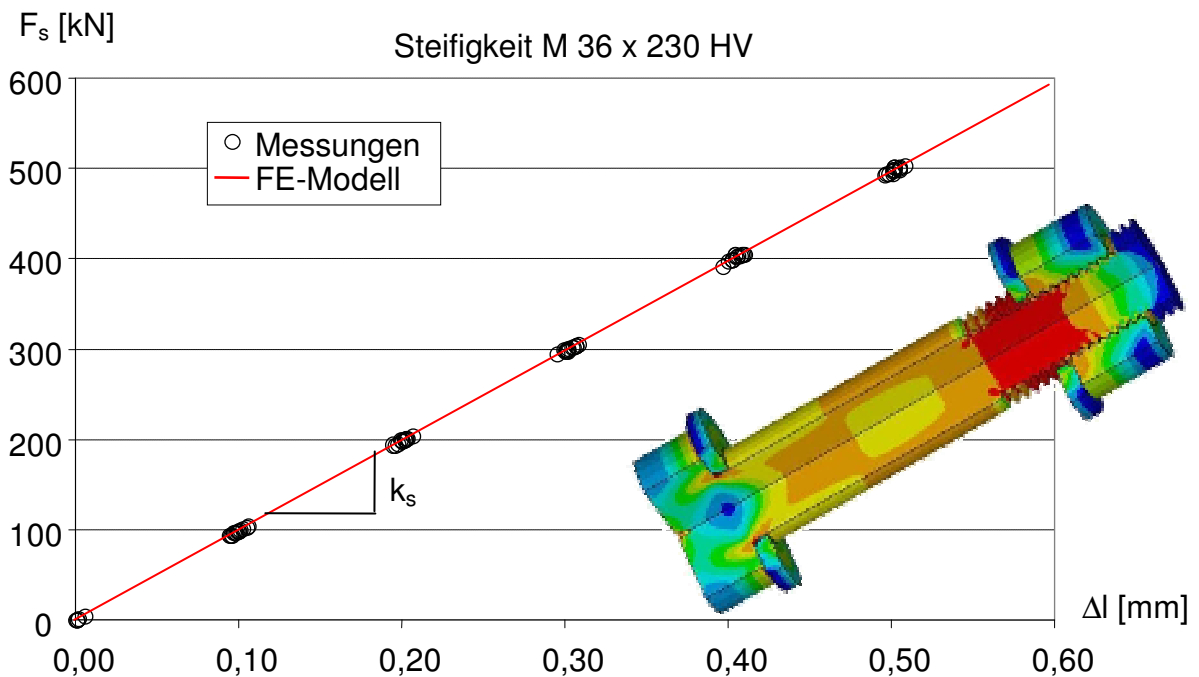


Abbildung 2-4: Schraubensteifigkeit k_s aus Messungen an verschiedenen Schrauben und FE-Berechnung

Für den Fall von Vorspannkraften, die zu plastischen Dehnungen innerhalb der Schraube führen, kann statt des linearen Verhaltens der Schraube eine nichtlineare Kraft-Verschiebungsfunktion der Vorspannkraftberechnung zu Grunde gelegt werden:

$$F_s = f(\Delta l)$$

Die Funktion $f(\Delta l)$ verläuft für kleine Dehnungen linear und kann durch ein Polynom angenähert werden.

Temperaturen, die von den Laborbedingungen abweichen, führen zu thermischen Dehnungen der Schraube und der zu verbindenden Bauteile. Wenn Schraube und Klemmpaket einheitlich erwärmt oder abgekühlt werden, wovon bei massiven Ringflanschen ausgegangen werden kann, führt dies jedoch nicht zu einer Änderung der Vorspannkraft. Diese Tatsache muss bei den Messungen berücksichtigt werden. Bei Längenmessungen eines Stahl-Endmaßes wurde der Einfluss von einheitlichen Temperaturänderungen für Messmittel und Probekörper untersucht. Abbildung 2-5 zeigt die aus Temperaturänderungen resultierende Längenänderung der Schrauben im Vergleich zur Dehnung durch Vorspannen.

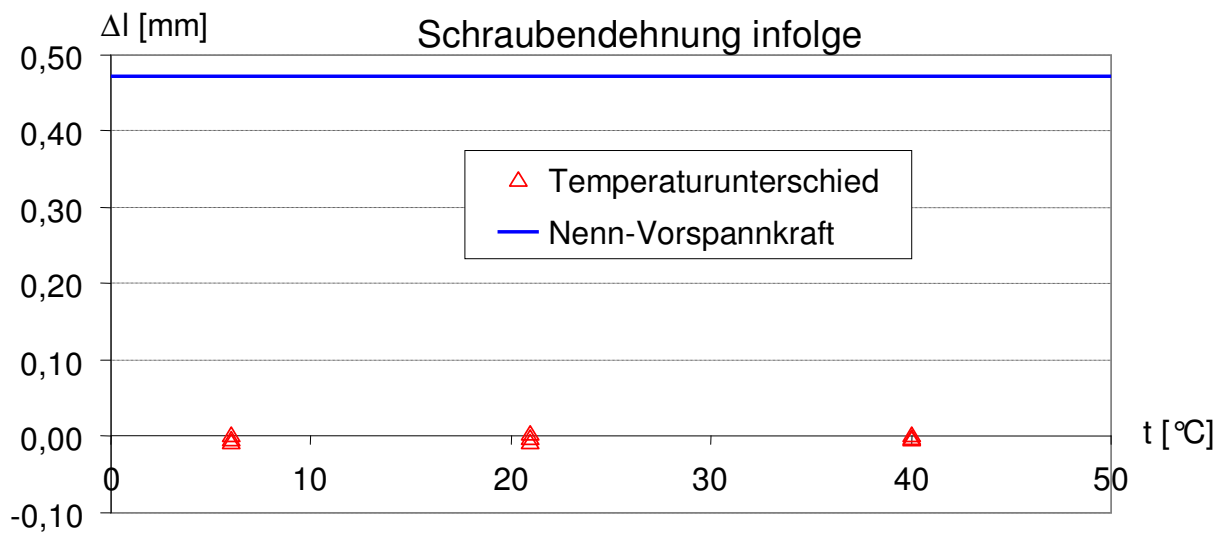


Abbildung 2-5: Längenänderung infolge Vorspannkraft und Temperatureinwirkung

Es zeigt sich kein nennenswerter Einfluss von gleichmäßiger Erwärmung auf das Messergebnis. Dies ist auch nicht zu erwarten, da es sich beim Herstellungsmaterial der Schraube und Bügelmessschraube jeweils um Stahl handelt, für den ein einheitlicher Wärmeausdehnungskoeffizient α_t angenommen werden kann. Temperaturdehnungen treten daher sowohl bei den zu vermessenden Schrauben als auch bei der Bügelmessschraube in gleichem Maße auf und haben auf das Messergebnis keinen Einfluss. Um Fehler aus Temperaturdifferenzen zwischen Messmittel und Probekörper zu verhindern, wird während der Feldmessungen die unterschiedliche Temperatur von Messwerkzeug ($\Theta_{\text{Bügel}}$) und zu vermessender Schraube (Θ_{Schraube}) aufgezeichnet und der daraus entstehende Fehler rechnerisch berücksichtigt:

$$F_s = k_s \cdot \left[\Delta l - \alpha_t \cdot (\Theta_{\text{Schraube}} - \Theta_{\text{Bügel}}) \cdot l_0 \right]$$

Die Aufnahme der Messwerte erfolgt durch einen Messrechner, der eine sofortige optische Kontrolle der gemessenen Vorspannkraft ermöglicht, wodurch grobe Messfehler verhindert werden (Abb. 2-6).



Abbildung 2-6: Messrechner mit Bügelmessschraube und Temperaturerfassung

3. Labormessungen

Der bei der Montage sicherzustellenden Nennvorspannkraft von HV-Verbindungen liegen verschiedene Qualitätsmerkmale der Garnituren und der Montagewerkzeuge zu Grunde. Bei Anwendung des Drehmomentverfahrens nach [2] wird die Garnitur durch Anziehen der Mutter mit einem definierten Montagedrehmoment vorgespannt. Die Reibbeiwerte der Schmierung werden dabei von den Herstellern so eingestellt, dass bei vorgegebenem Montagedrehmoment die Mindestvorspannkraft sicher erreicht wird. Maßgebliche Einflussfaktoren auf die Schraubenvorspannkraft sind daher die Reibverhältnisse der Garnituren und das Montagedrehmoment. Weitere Parameter wie Beschichtungsdicken oder Schnittigkeit des Klemmpaketes wirken sich erst durch Setzungsvorgänge aus und haben kaum Auswirkung auf die im direkten Anschluss an die Montage gemessene Vorspannkraft.

Im Vorfeld der Feldmessungen werden daher die Reibbeiwerte der HV-Garnituren verifiziert. Dazu wird eine Stichprobe der für die Messungen präparierten Schraubencharge im Anziehprüfstand mit dem entsprechenden Montagedrehmoment angezogen und die erreichte Vorspannkraft F_s gemessen.

Für die geprüften Chargen der Abmessung M 36 ergaben sich folgende Resultate:

Charge		1	2
Probenumfang [St.]		13	10
Vorspannkraft F_s	Mittelwert [kN]	573	608
	Maximaler Wert [kN]	674	720
	Minimaler Wert [kN]	433	492
	Standardabweichung [kN]	74	69

Tabelle 3-1: Verifizierung Reibbeiwerte

Die der Tabelle 3-1 zugrunde liegenden Schrauben sind gegenüber dem Lieferzustand zur Vorbereitung der Vorspannkraftmessungen bearbeitet worden. Sie sind daher nicht repräsentativ für den von den Schraubenherstellern garantierten Auslieferungszustand.

4. InSitu-Messungen

Für die Feldmessungen werden HV-Schrauben durch Herstellerfirmen werksseitig mit Zentrierbohrungen für die Vorspannkraftmessung versehen. Beim Einbau der Schrauben wird weitestgehend das übliche Vorgehen des betreffenden Windenergieanlagenherstellers beibehalten. Das bedeutet, dass Montagevorschriften und Werkzeug für die Messkampagne übernommen werden. Zur Registrierung des auf die Verbindung aufgebrauchten Montagedrehmomentes und

des dabei erreichten Drehwinkels werden jedoch zusätzliche Dokumentations- und Messgeräte verwendet, die auf das jeweilige Montagewerkzeug abgestimmt sind. Nach Einbau der Messschrauben mit begleitender Schraubkraftmessung erfolgt die messtechnische Begleitung der ersten planmäßigen Wartung der Schraubverbindungen. Die dabei auf die Schraubverbindungen entsprechend den jeweiligen Wartungsanweisungen aufgetragenen Drehmomente und Winkel werden dabei ebenso gemessen wie der setzungsbedingte Rückgang der Vorspannkraft und der nach der Wartung vorhandene Wert der Schraubenvorspannung.

Da die Errichtung einer Windenergieanlage normalerweise unter einem gewissen Zeitdruck erfolgt, muss bei den Messungen darauf Rücksicht genommen werden, so dass sich die Fertigstellung des Turmes nicht unverhältnismäßig verzögert. Die untersuchten Schraubverbindungen eines kompletten Ringflansches, wurden daher zunächst mit einem Schlagschrauber provisorisch angezogen, bevor in weiteren Arbeitsschritten das volle Montagedrehmoment aufgebracht wurde. Die Schraubkraftmessung erfolgt direkt im Anschluss an den Vorspannvorgang, bevor die benachbarte Schraube angezogen wird. Dadurch ergibt sich eine unvermeidliche Verzögerung der Schraubkraftmessung nach dem Anziehen in der Größenordnung von < 1 Minute, in denen bereits Setzungs Vorgänge stattfinden können. Aufeinander folgende Mehrfachmessungen zeigen dann aber keinen großen Vorspannkraftabfall mehr. Eine Beeinflussung der Vorspannkraft einer Schraube durch das Anziehen von benachbarten Schrauben ist durch die direkte Schraubkraftmessung nach einem Anziehvorgang ausgeschlossen.

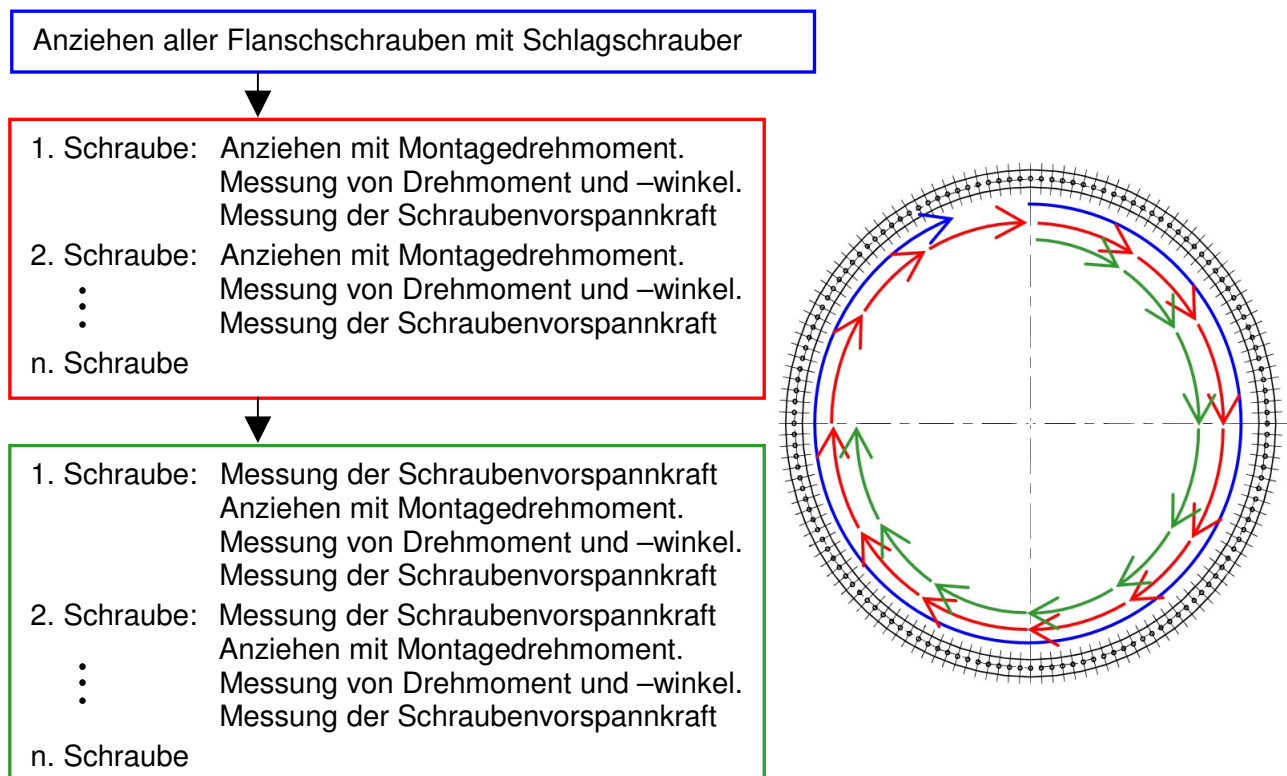


Abbildung 4-1: Tätigkeitsplan Schraubenmontage / Vorspannkraftmessung am Ringflansch

Ob die das volle Montagedrehmoment direkt aufgebracht wird, oder ob die Schrauben zunächst weniger stark angezogen werden, wird unterschiedlich gehandhabt. Davon abhängig ist, ob der zweite Umlauf, in Abb. 4-1 grün dargestellt, komplett durchgeführt wird, oder ob nur die ersten Schrauben noch einmal nachgezogen werden.

5. Erkenntnisse und Ausblick

Als Resultate der bereits durchgeführten Feldmessungen, bei denen ca. 600 Schrauben eingebaut wurden, können genannt werden:

Die Schraubenkraftermittlung mittels einer Bügelmessschraube mit elektronischer Dokumentation der Messergebnisse hat sich als baustellengeeignetes Verfahren bewährt. Die vermessenen Schrauben erfahren bei Nennvorspannkraft eine Längenzunahme von etwa 0,5 mm auf. Damit liegt die Messunsicherheit des angewendeten Verfahrens zur Schraubenkraftbestimmung bei weniger als 5%.

Die verwendeten Anziehwerkzeuge erreichen das voreingestellte Montagedrehmoment mit nur geringen Schwankungen. Die gemessenen Genauigkeiten der verwendeten Geräte entsprechen den der Literatur entnommenen Werte für Elektro- und Hydraulikschrauber [5].

Die Höhe der gemessenen Vorspannkraft variiert zum Teil recht stark. Zur Bestimmung der Ursachen dieser Abweichungen wird bei den noch ausstehenden Feldmessungen verstärkt auf die Besonderheiten und Abweichungen der verschiedenen Montagedetails wie Anziehgerät oder Schraubenspezifikationen eingegangen.

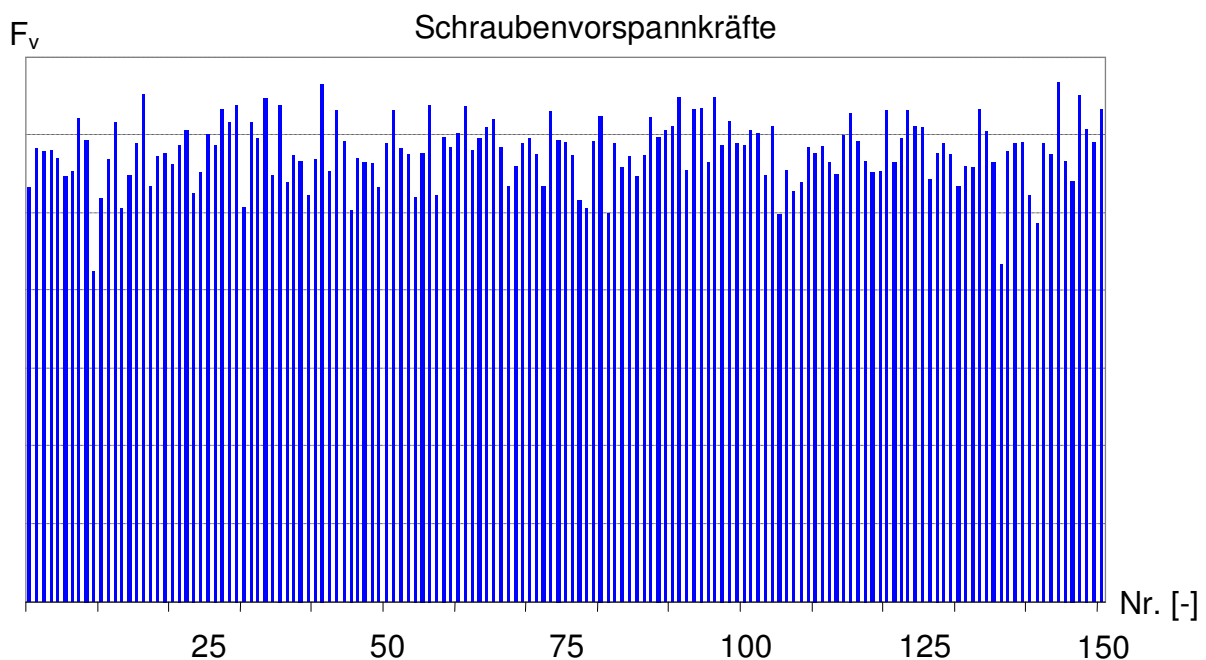


Abbildung 5-1: Gemessene Vorspannkräfte

Literatur

- [1] Schaumann, P.; Seidel, M.: Ermüdung von Ringflanschverbindungen, Abschlussbericht zum Vorhaben Nr. 240, Forschungshefte des Forschungskuratoriums Maschinenbau e. V., Heft 268, 2002
- [2] DIN 18800, Teil 7: Stahlbauten – Ausführung und Herstellerqualifikation, September 2002
- [3] Seidel, M.: Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen. Schriftenreihe Institut für Stahlbau (Heft 20). Aachen: Shaker-Verlag 2001.
- [4] Jakubowski, A.: Ermüdungssichere Bemessung geschraubter Ringflanschstöße in turmartigen Stahlbauten unter besonderer Berücksichtigung von Flanschimperfektionen. Cuvillier Verlag, Göttingen 2003
- [5] VDI Bericht 1735: Innovative Sensoren und Systeme in der automatisierten Schraubtechnik, Düsseldorf 2002