

Zum Vorspannen von Stahlbauverschraubungen großer Abmessungen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Tim Rutkowski
Geboren am 12.01.1974 in Groß-Gerau

2012

Tag der mündlichen Prüfung: 11.03.2011
Referenten: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Prof. Dr.-Ing Jörg Lange

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Heft 28

Tim Rutkowski

**Zum Vorspannen von Stahlbauerschraubungen
großer Abmessungen**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2011

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Institut für Stahlbau
Appelstr. 9A
30167 Hannover

<http://www.stahlbau.uni-hannover.de>

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0759-6

ISSN 1617-8327

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover. Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Schaumann für die sehr gute Betreuung und Unterstützung beim Anfertigen der Arbeit.

Für die Übernahme des Zweitberichtes bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange.

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens „Messung von erzielten Vorspannkraften unter realen Montagebedingungen“ schuf die Anregung zur Erstellung der Dissertation. Mein Dank gilt daher dem Deutschen Institut für Bautechnik für die finanzielle Förderung des Projektes.

Um die umfangreichen Messungen von Schraubenvorspannkraften vornehmen zu können, war eine enge Zusammenarbeit mit Herstellerfirmen von Windenergieanlagen, Schrauben und Schraubensmontagegeräten nötig. Für die technische Diskussion, Anregung und die Unterstützung mit Sachmitteln möchte ich mich sehr herzlich bei folgenden Firmen und Personen bedanken:

- Herr Dr.-Ing. Christian Becker (ehemals GE Wind Energy GmbH)
- Herr Dr.-Ing. Alexander Jakubowski (ehemals Nordex AG)
- Herr Dr.-Ing. Marc Seidel und Herrn Stephan Schäfer (REpower AG)
- Herr Dr.-Ing. Uwe Hasselmann (Adolf Würth GmbH & Co. KG, ehemals August Friedberg GmbH)
- Herr Dr.-Ing. Volker Dünkel (Fuchs Schraubenwerk GmbH)
- Herr Joachim Weigel (Peiner Umformtechnik GmbH)
- Herr Herbert Kürten (Maschinenfabrik Wagner GmbH & Co. KG)
- Herr Patrick Junkers (Barbarino & Kilp GmbH)

Für die während der FE-Untersuchung von Schraubenverbindungen entstandene Diplomarbeit und die Unterstützung bei der Durchführung von Feldmessungen möchte ich mich sehr herzlich bei Herr Dipl.-Ing. Ulrich Knöll, Dipl.-Ing. Steffen Reiche, Dipl.-Ing. Arthur Brakowski, Dr.-Ing. Christian Keindorf und Dipl.-Ing. Hergen Knorr bedanken.

Herrn Karl-Heinz Hentschel möchte ich für sein großes Engagement bei der Vorbereitung und der Durchführung der Feld- und Labormessungen danken.

Allen Kollegen und Mitarbeitern am Institut möchte ich gemeinschaftlich für das hervorragende und angenehme Arbeitsklima und die fachliche Diskussion danken. Bei Herrn Dr.-Ing. Frithjof Marten möchte ich mich besonders für die kritische Durchsicht des Manuskriptes bedanken.

Zum Schluss möchte ich meiner Frau Julia danken. Durch ihr Verständnis und ihre Unterstützung hat sie einen Großteil zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Tim Rutkowski

Kurzfassung

Die Vorspannkraft von dynamisch axial beanspruchten Schraubenverbindungen ist sicherheitsrelevant für die Ermüdungsfestigkeit der Verbindung. In der Vergangenheit wurden häufig zu niedrige Vorspannkraften insbesondere bei Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen beobachtet, was jeweils nicht auf Setzungen zurückzuführen war. Es stellt sich daher die Frage, in wie weit bei der Montage von vorgespannten Schraubenverbindungen sichergestellt werden kann, dass die rechnerische Vorspannkraft auch tatsächlich erzielt wird.

Dazu wurden in großem Umfang Schraubenkraftmessungen bei der Montage von Stahlrohtürmen von Windenergieanlagen durchgeführt. Es stellte sich dabei heraus, dass trotz der Sicherstellung von normgerechten Montagedrehmomenten und Reibungszahlen der Schraubengarnituren unterschiedliche Vorspannkraftniveaus erzielt werden. Aufzeichnungen des Drehmoment-Vorspannkraftverlaufes deuten darauf hin, dass nicht allein das maximale Drehmoment bei der Schraubenmontage ausschlaggebend für die Vorspannkraft ist, sondern dass auch die Dauer und Geschwindigkeit der Verschraubung die Vorspannkraft beeinflussen können.

FE-Untersuchungen zum Einfluss von geometrischen Imperfektionen der Verschraubungen zeigen, dass nur geringe Auswirkungen auf das erzielbare Vorspannkraftniveau vorliegen. Für Querkräfte, die beim Anziehen von Schraubenverbindungen durch exzentrische Abstützung erzeugt werden, wird die Auswirkung auf die Schraubenvorspannkraft quantifiziert und ein Ingenieurmodell zur Abschätzung des Einflusses entwickelt.

Mit einem mechanischen Modell zur Berechnung des Verschraubungsvorgangs im Zeitbereich ist es möglich, die Vorspannkraft für einen zeitlich veränderlichen Drehmomentverlauf bei nicht konstanten Reibungszahlen zu berechnen, wobei Simulation von vermessenen Verschraubungsvorgängen nur dann nachzubilden sind, wenn keine konstanten sondern veränderliche Reibungszahlen angesetzt werden.

Eine Literaturstudie zu Einflussfaktoren auf Reibzahlen für MoS₂ geschmierte Kontakte und Schraubenverbindungen bestätigt, dass generell vielfältige Einflussparameter auf die Reibzahl vorhanden sind und nur in Ausnahmefällen Coulombsche Reibung angenommen werden kann. Eine detaillierte Auswertung der messtechnisch begleiteten Verschraubungen zeigt ebenfalls nicht konstante Reibzahlen im Verlauf der beobachteten Anziehvorgänge.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Auslegung von Schraubenverbindungen anhand des statischen Gleichgewichts beim drehmomentgesteuerten Anziehen nicht immer hinreichend ist, um exakte Vorhersagen über die erzielbare Vorspannkraft treffen zu können. Mit dem entwickelten Modell zur Simulation des Anziehvorgangs können genaue Aussagen über die Schraubenvorspannkraft getroffen werden, wenn genaue Daten über die Reibverhältnisse im Kontaktbereich der Schraubenverbindungen vorliegen.

Vereinfachte Versuche zur direkten Identifizierung der Reibeigenschaften in HV-Verbindungen zeigen einen nicht konstanten Verlauf der Reibzahl, wobei weitere Versuche nötig sind, um die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Reibzahl zu quantifizieren.

Abstract

The bolt pretension force is relevant for the fatigue strength of bolted connections exposed to axial fatigue loads. Bolt pretension forces in ring flange connections which were lower than the rated value were observed on various occasions in the past. In these cases the lack of bolt pretension was not a result of compression set.

Therefore the question arises if the present process of bolt installation is suitable to secure adequate bolt pretension forces. A large number of measurements of bolt pretension forces in ring flanges of wind turbines were done to find out.

It turned out that different levels of pretension forces occur even though the bolt installation torque and the bolt lubrication were found to be accurate.

Collateral measurements of the installation torque / nut rotation angle relationship were carried out during bolt installation. The results indicate that not only the maximum installation torque but also the absolute duration and installation speed have an impact on the achievable bolt pretension force.

Several investigations were done on the basis of a detailed FE-model of a high strength bolt connection. The results showed only negligible impact of geometric imperfections of the connection on the resulting bolt pretension, whereas transverse forces caused by eccentric support of the installation tool lead to a reduction of the bolt pretension. An engineering model was established to quantify the impact of transverse forces on the bolt pretension.

Based on the results of the FE-calculations, a simplified mechanical model of the bolt connection was established. The model allows for simulating the installation process of bolts in the time domain in consideration of non-constant friction coefficients and time variable installation torque. It turned out that observed bolt tightening processes can only be reproduced if the basic condition of constant friction coefficients is dropped and variable friction coefficients are assumed.

A literature study on the influence factors on the friction coefficients of MoS₂ coated friction surfaces and bolt connections confirms the existence of multiple effects on the friction coefficient in general and that the coulomb friction law fits only in the exceptional case.

Non constant friction coefficients could also be determined by a detailed analysis of the results from the conducted measurement campaigns.

The research done on the tightening process of bolts reveals that the design of bolt connections based on the static equilibrium during the torque driven tightening is not sufficient for the prediction of the bolt pretension in general.

By means of the developed simulation model describing the tightening process, bolt pretension forces can be determined if accurate data for the friction coefficients are provided.

Basic tests to determine the friction properties at high strength pre-stressed bolt connections display a non constant characteristic of the friction coefficient whereas additional test are essential to quantify various influence factors on the friction coefficients.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Wissensstand	3
2.1	Zugbeanspruchte L-Flanschverschraubungen.....	3
2.2	Steifigkeitsverhältnisse	6
2.3	Beanspruchung während der Schraubenmontage	8
2.4	Montageverfahren	13
2.5	Vorspannkraftverluste	18
2.6	Sicherstellung der Montagevorspannkraft	19
3	Auswahl des Messverfahrens	21
3.1	Allgemeines	21
3.2	Messungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS).....	21
3.3	Messungen mit Ultraschall.....	22
3.4	Mechanische Längenmessung.....	25
3.5	Optische Messverfahren.....	26
3.6	Auswahl Messverfahren.....	26
3.7	Funktion des mechanischen Messverfahrens.....	28
3.8	Validierung des Messverfahrens	30
3.9	Fehlerabschätzung.....	33
4	Messungen	34
4.1	Vorbemerkungen.....	34
4.2	Montageablauf von WEA-Türmen	34
4.3	Montagegeräte.....	35
4.4	Messkampagne 1 (Elektroschrauber).....	36
4.4.1	Messresultate.....	39
4.5	Messkampagne 2 (Hydraulikschrauber)	46
4.5.1	Messresultate.....	48
4.5.2	Bewertung der Resultate	51
4.6	Vergleich der Reibbeiwerte (Messkampagne 3).....	52
4.7	Messkampagne 4 (Vergleich von Verschraubungsgeräten).....	55
4.7.1	Messresultate.....	56

4.8	Messkampagne 5.....	61
4.8.1	Messresultate.....	62
4.8.2	Bewertung der Resultate	63
4.8.3	Messung der Reibzahlen der Schrauben aus Kampagne 5	64
4.9	Messungen mit Dehnungsmessstreifen.....	67
5	FE-Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Vorspannkraft.....	71
5.1	Allgemeines	71
5.2	Existierende FE-Modelle zur Schraubenberechnung.....	73
5.3	Erstellung des FE-Modells.....	75
5.4	Berechnungsergebnisse.....	78
5.4.1	Schraube ohne Imperfektionen	78
5.4.2	Einfluss von Querkräften	79
5.4.3	Einfluss von Biegemomenten quer zur Schraubenachse	83
5.4.4	Weitere mögliche Einflussfaktoren.....	85
5.4.5	Schlussfolgerungen	86
6	Einfluss der Reibung	87
6.1	Allgemeines	87
6.2	Allgemeine Drehmoment - Vorspannkraftbeziehung	87
6.3	Reibmodelle	94
6.4	Numerische Simulation von Anziehvorgängen	98
6.5	Schlussfolgerungen	104
7	Direkte Messung von Reibeigenschaften	105
7.1	Messaufbau	105
7.2	Versuchsergebnisse.....	111
7.3	Schlussfolgerungen und Bewertung der Ergebnisse.....	112
8	Umsetzung, Bewertung und Empfehlungen.....	114
8.1	Schraubenmontage mit schnell laufenden Montagewerkzeugen.....	114
8.1.1	Versuche.....	114
8.1.2	Schlussfolgerungen	117
8.2	Montagevorschriften für Ringflanschverbindungen.....	118
8.3	Wartung der Schraubenverbindungen.....	119

8.4	Lagerung von HV-Garnituren.....	119
8.5	Prüfung von Schraubenverbindungen.....	120
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
9.1	Zusammenfassung.....	121
9.2	Ausblick.....	122
10	Literatur.....	123
10.1	Monographien, Handbücher, Aufsätze.....	123
10.2	Normen und Richtlinien.....	129

Bezeichnungen

Lateinische Buchstaben

d	Schaft- / Nenndurchmesser des Schraubenschaftes
d_2	Flankendurchmesser des Schraubengewindes
d_3	Kerndurchmesser des Schraubengewindes
d_a	Außendurchmesser Auflage
d_i	Innendurchmesser Auflage
d_h	Lochdurchmesser
d_w	Durchmesser der Auflage
e_h	Vertikaler Hebelarm der Abstützung (in Schraubenachse)
e_v	Horizontaler Hebelarm der Abstützung (quer zur Schraubenachse)
h	Schmierfilmdicke
l	Schaftlänge der Schraube
l_0	Ausgangs- beziehungsweise Gesamtlänge der Schraube
l_{Gew}	freie Gewindelänge
l_K	Klemmlänge
Δl_S	Verlängerung der Schraube
Δl_D	Stauchung des Klemmpaketes
p	Wahrscheinlichkeit oder Druck
r_a	Außenradius Auflage
r_i	Innenradius Auflage
t	Zeit
t_0	Ultraschall-Laufzeit Schraube unbelastet
t_1	Ultraschall-Laufzeit Schraube angezogen
v	Geschwindigkeit, Schallgeschwindigkeit
v_ε	Schallgeschwindigkeit bei belasteter Schraube
A	Fläche der Auflage
A_{d3}	Kernquerschnitt der Schraube
A_N	Schaftquerschnitt der Schraube
A_S	Spannungsquerschnitt der Schraube
C_S	Axialsteifigkeit der Schraube
C_D	Axialsteifigkeit des Klemmpaketes
C_{SD}	Steifigkeit des Schraubfalls
C_{Kopf}	Axialsteifigkeit des Schraubenkopfes
C_{Schaft}	Axialsteifigkeit des Schraubenschaftes
$C_{\text{freies Gewinde}}$	Axialsteifigkeit des freien belasteten Gewindes
$C_{\text{eingeschraubtes Gewinde}}$	Axialsteifigkeit des eingeschraubten Gewindes
C_{Mutter}	Axialsteifigkeit der Mutter
D_{KM}	Reibungsdurchmesser der Auflage

E	Elastizitätsmodul
F_N	Schrauben-Nennvorspannkraft oder Normalkraft auf Gewindeflanke
F'_N	Axialkomponente der Normalkraft auf Gewindeflanke
F_R	Reibkraft
F_{Rad}	Querkraftkomponente der Normalkraft auf Gewindeflanke
F_S	Schrauben-Zugkraft
F_{UG}	Umfangskraft im Gewinde
F_V	Schraubenvorspannkraft
F_{VR}	Rest-Vorspannkraft
$F'_{V,S}$	Zugkraft in der Schraube
$F'_{V,D}$	Druckkraft im Klemmpaket
M_A	Anziehdrehmoment
M_F	Fügemoment
M_{GR}	Anziehdrehmoment
M_{GSt}	Nutzmoment
M_{KR}	Moment in der Auflage
M_T	Torsionsmoment der Schraube
M_G	Gewindemoment
W_T	Torsionswiderstandsmoment des Gewindes
P	Gewindesteigung
V	Querkraft
Z	äußere Zugkraft
Z_D	Abnahme der Druckkraft im Klemmpaket
Z_S	Zusatz-Zugkraft in der Schraube

Griechische Buchstaben:

α	Gewindeflankenwinkel
α'	Gewindeflankenwinkel in Richtung von F_N
α_T	Temperaturausdehnungskoeffizient
η	Viskosität
μ	Mittelwert oder Reibungskoeffizient
μ_G	Reibungskoeffizient des Gewindes
μ_K	Reibungskoeffizient der Auflage
μ_{ges}	Gesamt-Reibungskoeffizient der Schraube
ρ	Reibungswinkel
σ	Standardabweichung
σ_V	Vergleichsspannung
σ_Z	Zugspannung
τ_T	Torsionsspannung

Θ_{Schraube}	Temperatur der Schraube
$\Theta_{\text{Bügel}}$	Temperatur der Bügelmessschraube
$\Delta\Theta$	Temperaturdifferenz
φ	Kegelwinkel der Lastausbreitung oder Winkel der Gewindesteigung oder Drehwinkel der Mutter