

Zur Ermüdungsfestigkeit hochfester großer Schrauben

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. Frithjof Marten
Geboren am 29.08.1974 in Hamburg

2009

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald
Tag der Promotion: 14.08.2009

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Heft 24

Frithjof Marten

Zur Ermüdungsfestigkeit hochfester großer Schrauben

Shaker Verlag
Aachen 2009

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., 2009

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Institut für Stahlbau

Appelstr. 9A

30167 Hannover

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

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8748-1

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

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Zeit als Assistent am Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover. Mein erster Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Schaumann, der mich bei der Anfertigung dieser Arbeit betreut und die Erstberichterstattung übernommen hat. Die fachlichen und auch fachübergreifenden Gespräche mit ihm waren für mich von großem Wert. Für die Möglichkeit, mich zum Ende meiner Institutszeit ausschließlich auf diese Arbeit konzentrieren zu können, schulde ich Professor Schaumann ebenfalls großen Dank.

Für die Übernahme des Zweitgutachtens, die intensive Diskussion sowie die Hinweise zur Endfassung möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Vormwald herzlich bedanken.

Die Grundlage für die vorliegende Arbeit bildeten zwei Forschungsvorhaben: Das Projekt „Experimentelle Ermittlung von Wöhlerlinien großer Schrauben“ wurde von dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) in Berlin sowie den Schraubenherstellern August Friedberg, Fuchs Schraubenwerk, Peiner Umformtechnik und Zerbst Schraubenwerk finanziert. Das Verbund-Projekt „Ermüdungsfestigkeit hochfester Schrauben großer Abmessungen“ wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert. *Die Projektkoordination des zweiten Vorhabens oblag der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) in Hagen.* Für die finanzielle Förderung der Forschungsvorhaben sei hier herzlich gedankt.

Im Rahmen der beiden Forschungsvorhaben wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Die nachfolgenden Unternehmen haben diese durch die Bereitstellung von Versuchsaufbauten beziehungsweise Probenmaterial maßgeblich unterstützt, wofür ich Ihnen ganz herzlich danken möchte:

- Stahlbaufirmen Eiffel Deutschland Stahltechnologie und SIAG Schaaf Industrie für die Fertigung von Lagerkonstruktionen beziehungsweise von Flanschsegmenten.
- Schraubenhersteller August Friedberg, Fuchs Schraubenwerk, Peiner Umformtechnik und Zerbst Schraubenwerk für die Bereitstellung von Probenmaterial.

In Bezug auf die Schraubenhersteller gilt mein besonderer Dank den Herren Dr.-Ing. Volker Dünkel, Dr.-Ing. Uwe Hasselmann, Bruno Schliwa und Joachim Weigel, die mir mit fachlichem Rat zur Seite standen.

Teile dieser Arbeit beschäftigen sich mit der Anwendbarkeit des Kerbdehnungskonzepts auf hochvorgespannte Schraubenverbindungen. In diesem Zusammenhang bedanke ich ganz herzlich bei Professor Dr.-Ing. Timm Seeger für sein offenes Ohr und seine große Hilfsbereitschaft bei aufgetretenen Fragen zu dem Konzept.

Einen großen Dank möchte ich meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für die gute Zusammenarbeit aussprechen. Das angenehme Arbeitsklima sowie die stete Diskussionsbereitschaft bei fachlichen Fragestellungen haben mir oft geholfen. Insbesondere möchte ich mich bei meinem ehemaligen Kollegen Herrn Tim Rutkowski bedanken; sein umfangreiches Wissen, welches er jederzeit bereitwillig an mich weitergab, war für mich nicht nur zu Beginn meiner Forschungen von unschätzbarem Wert. Meinem Kollegen Herrn Stephan Lochte-Holtgreven möchte ich für die vielen gewinnbringenden fachlichen Diskussionen gerade zum Ende meiner Arbeit sowie für seine sorg-

fältige Korrektur der Erstfassung ebenfalls gesondert danken. Im Hinblick auf die äußerst gewissenhafte Vorbereitung und Durchführung der Versuchsreihen schulde ich den Herren Karl-Heinz Hentschel und Björn Vortmann großen Dank für ihren fortwährenden Einsatz.

Meiner damaligen studentischen Hilfskraft, Diplomandin und jetzigen Kollegin Frau Stefanie Stepeler möchte ich für ihre geleisteten wissenschaftlichen Tätigkeiten danken. Insbesondere ihre Studien- und Diplomarbeit zu den lokalen Konzepten waren mir für diese Arbeit eine große Hilfe. Den Herren Timo Rogge und Rasmus Eichstädt sei ebenfalls für ihren Einsatz als studentische Hilfskräfte gedankt.

Zum Schluss möchte ich meiner Freundin Heike Wittneben für ihre Geduld und ihr Verständnis danken, die sie gerade in der Endphase meiner Arbeit aufbringen musste. Nicht zuletzt ihre moralische Unterstützung hat einen großen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Frithjof Marten

Kurzfassung

HV-Schrauben großer Durchmesser werden vorwiegend in den Ringflanschverbindungen großer und leistungsstarker Windenergieanlagen (WEA) eingesetzt. Da es sich hierbei um hochdynamisch beanspruchte Bauwerke handelt, kommt dem Ermüdungsnachweis aller Komponenten eine besondere Bedeutung zu. Die bestehenden normativen Regelungen im Bauwesen sind im Hinblick auf Schrauben großer Durchmesser versuchs- und versuchstechnisch nicht abgesichert. Das Ermüdungsverhalten hochfester Schrauben großer Durchmesser ist bislang sowohl experimentell als auch analytisch weitgehend unerforscht.

In dieser Arbeit werden Untersuchungen zu der Ermüdungsfestigkeit großer Schrauben auf experimenteller, analytischer und numerischer Ebene durchgeführt. Der experimentelle Teil der Arbeit beinhaltet Schwingversuche sowie Eigenspannungsmessungen an HV-Schrauben M48. Es wird eine vollständige Wöhlerlinie unter Axialbeanspruchung erzeugt und der maßgebenden Wöhlerlinie nach DIN EN 1993-1 gegenüber gestellt. Hierdurch werden die normativen Regelungen versuchs- und versuchstechnisch auf größere Schraubendurchmesser erweitert. Über die Eigenspannungsmessungen soll ermittelt werden, inwieweit ermüdungsrelevante Druckeigenspannungen im Kerbgrund des Gewindes schlussvergüteter Schrauben vorliegen. Die Messungen werden an Probekörpern aus verschiedenen Stadien der Herstellung durchgeführt, um den Einfluss einzelner Prozessschritte auf die Entwicklung fertigungsinduzierter Eigenspannungen zu erfassen.

Im analytischen und numerischen Teil der Arbeit werden zunächst allgemeine Untersuchungen an numerischen Schraubenverbindungsmodellen durchgeführt. Der Einfluss verschiedener Geometrie- und Kerbformparameter auf die Kerbwirkungszahl im ersten tragenden Gewindegang wird erfasst. Ziel dieser Untersuchungen ist die Ermittlung eines geeigneten FE-Systems für die weiteren Untersuchungen.

Die Ermüdungsfestigkeit von Schrauben sinkt aufgrund des Größeneinflusses mit zunehmendem Durchmesser. Der empirisch bestimmte Zusammenhang zwischen Durchmesser und Dauerfestigkeit nach der VDI-Richtlinie 2230 wird numerisch mithilfe der Kerbwirkungszahl abgebildet. Über geometrisch ähnliche FE-Modelle wird darüber hinaus der spannungsmechanische Größeneinfluss gesondert betrachtet.

Schwingversuche an hoch vorgespannten Schrauben großer Durchmesser stellen hinsichtlich der Prüflasten und -frequenzen hohe Anforderungen an die Prüftechnik. Daher wird das Kerbdehnungskonzept, welches unabhängig von Bauteilversuchen ist, auf seine Anwendbarkeit bei hoch vorgespannten Schrauben untersucht. Die Auswirkung der Eingangsparameter und ausgewählter Berechnungsschritte werden im Rahmen von Variationsrechnungen bewertet. Die Abhängigkeit des zyklischen Werkstoffverhaltens von der Mittelspannung wird im Hinblick auf die Berechnungsergebnisse untersucht. Abschließend werden experimentell ermittelte Dauerfestigkeiten verschiedener Schraubendurchmesser mit Ergebnissen nach dem Kerbdehnungskonzept verglichen.

Die Ergebnisse in dieser Arbeit zeigen, dass das Kerbdehnungskonzept prinzipiell zur Berechnung der Dauerfestigkeit hochvorgespannter schwarzer Schrauben geeignet ist. Der korrekten Berücksichtigung der hohen Zugmittelspannung kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu.

Abstract

High strength bolts with large diameters are mainly used in ring flange connections of large and powerful wind turbines. As those turbines are characterized by high dynamic loads the fatigue assessment becomes essential for all components. The regulations in existing standards are not validated for bolts with large diameters. The fatigue behaviour for such bolts has not been investigated experimentally or analytically so far.

This work deals with the fatigue resistance of large bolts. Therefore, tests as well as numerical and analytical calculations are carried out. The experimental part includes fatigue tests with axial loading and residual stress measurements for high strength bolts M48. By comparing the developed S/N-curve based on the fatigue tests to that according to DIN EN 1993-1 the normative regulations are validated for larger diameters. The residual stress measurements deal with the question whether there are compressive residual stresses in the thread root of bolts which have been heat treated after the forming process. The measurements are carried out with specimens from different production phases to take into account the influence of single fabrication steps regarding the stress development.

The analytical and numerical part of this work starts with general numerical investigations regarding bolted connections. The effect of different geometric parameters is analysed with reference to the stress concentration factor in the first thread pitch connected to the nut. The aim of these studies is to verify a highly detailed FE-model for further investigations.

The fatigue resistance of bolts decreases with increasing diameter because of the size effect. The empirically determined correlation between the diameter and the fatigue strength according to VDI-guideline 2230 is represented numerically with the fatigue notch factor. The geometric size effect can be examined separately by using geometrically equivalent scaled FE-models.

Fatigue tests for highly prestressed bolts with large diameters impose great demands on the testing facilities. As the notch strain concept is independent from component tests the applicability of this concept is investigated in respect to large bolts. The effects of input parameters and selected calculation methods on the analytical results are evaluated by parametric studies. Furthermore, the dependency of the cyclic material behaviour on different mean stresses is discussed. In the last step the fatigue strength of different bolt diameters determined by tests is compared to results gained from the notch strain concept.

The results of this work show that the notch strain concept is generally applicable on highly prestressed black bolts. In this context it is important to consider the high tensile mean stresses properly.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Schrauben großer Abmessungen in der Windenergie	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Vorgehen	3
2	Stand der Forschung und der Technik	4
2.1	Normative Situation	4
2.1.1	DIN EN 1993-1-9 (EC 3)	4
2.1.2	VDI-Richtlinie 2230 (VDI 2230)	5
2.1.3	Normenvergleich	6
2.2	Konzepte für Nachweise gegen Werkstoffermüdung	8
2.2.1	Nennspannungskonzept	8
2.2.2	Örtliches Konzept	8
2.2.3	Rissfortschrittskonzept	9
2.2.4	Strukturspannungskonzept	9
2.3	Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten von Schrauben	10
2.3.1	Material	11
2.3.2	Kerbgeometrie	12
2.3.3	Mittelspannung	16
2.3.4	Reibung	18
2.3.5	Eigenstressungen	18
2.3.6	Größeneinfluss	21
2.3.7	Prüffrequenz	28
2.3.8	Modellierung von Schraubenverbindungen	29
2.4	Erkenntnisse	30
3	Schwingversuche	31
3.1	Chargeneinfluss	31
3.2	Probekörper	31
3.3	Randbedingungen der Prüfung	32
3.3.1	Prüfmaschine und -frequenz	32
3.3.2	Mittellast	32

3.3.3	Prüfverfahren	33
3.3.4	Abbruchkriterium	35
3.4	Versuchsergebnisse und Auswertung	36
3.4.1	Übergangsbereich zur Dauerfestigkeit (ÜGB)	36
3.4.2	Zeitfestigkeitsbereiche (ZFB)	37
3.4.3	Diskussion der verschiedenen Bruchorte	42
3.4.4	Quantilwöhlerlinien	44
3.5	Vergleich mit Norm	47
3.6	Erkenntnisse	48
4	Eigenspannungen	50
4.1	Messungen	50
4.1.1	Verfahren zur Eigenspannungsbestimmung	50
4.1.2	Probekörper	51
4.1.3	Messsystem	52
4.1.4	Temperatureinfluss	53
4.1.5	Versuchsdurchführung	54
4.1.6	Messergebnisse und Eigenspannungsverläufe	55
4.2	Erkenntnisse	61
5	Untersuchungen zur Wahl des FE-Modells	62
5.1	Gewindesteigung (2D-/3D-Modell)	62
5.1.1	Modellbeschreibung	62
5.1.2	Ergebnisvergleich	65
5.2	Lagerungseinfluss	66
5.2.1	Systemvarianten	66
5.2.2	Ergebnisvergleich	67
5.3	Flankenüberdeckung	69
5.3.1	Oberes Abmaß A_0 der Schraube:	70
5.3.2	Gewindeausbildung der Mutter:	70
5.4	Reibungszahl	71
5.5	Erkenntnisse	72
6	Größeneinfluss und Kerbwirkungszahl	74

6.1	Vergleich VDI 2230 mit Kerbwirkungszahl.....	74
6.2	Spannungsmechanischer Anteil am Größeneinfluss	75
6.3	Erkenntnisse.....	79
7	Ermüdungsberechnungen nach dem Kerbdehnungskonzept	80
7.1	Sensitivitätsstudien	82
7.1.1	Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve	82
7.1.2	Bauteilfließkurve (BFK)	84
7.1.3	Kerbformzahl.....	87
7.1.4	Mittelspannung	88
7.1.5	Mehraxialer Spannungszustand	94
7.1.6	Größeneinfluss	95
7.2	Vergleich zwischen Berechnung und Versuchsergebnissen	97
7.2.1	Vergleichsberechnungen mit P_{SWT} -Parameter	97
7.2.2	Einfluss einer Mitteldehnung auf die zyklischen Werkstoffkennwerte	102
7.2.3	Vergleichsberechnung mit anderem Schädigungsparameter.....	104
7.3	Erkenntnisse.....	107
8	Zusammenfassung und Ausblick	108
8.1	Zusammenfassung	108
8.2	Ausblick.....	110
9	Anhänge	112
9.1	Anhang A.....	112
9.2	Anhang B.....	117
9.3	Anhang C.....	125
9.4	Anhang D.....	127
9.5	Anhang E.....	129
10	Verzeichnisse.....	131
10.1	Abbildungsverzeichnis.....	131
10.2	Tabellenverzeichnis	134
11	Literatur.....	136
11.1	Monographien, Handbücher und Aufsätze	136
11.2	Normen und Richtlinien.....	141

Bezeichnungen

Lateinische Buchstaben

a	Risslänge oder -tiefe
A	Fläche
A_{sp}	Spannungsquerschnitt
A_o	Oberes Abmaß
b	Wöhlerlinienexponent bezüglich der Spannungen
c	Wöhlerlinienexponent bezüglich der plastischen Dehnungen
C	Werkstoffkonstante nach Paris
d	Schaftdurchmesser
d_{Stufe}	Stufensprung für das Treppenstufenverfahren
D	Schädigung
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft, allgemein
$F_{0,2}$	Schraubenkraft an der 0,2%-Dehngrenze
F_a	Kraftamplitude
F_A	Kraftamplitude bei Dauerfestigkeit nach DIN 969
ΔF_{all}	Differenz der Kraftamplituden bei der Prüfung im Übergangsbereich nach DIN 969
F_m	Mittellast
F_{Sm}	Mittlere Schraubenkraft
F_V	Vorspannkraft
k	Wöhlerliniensteigung
k_s	Abminderungsfaktor für den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit zur Berücksichtigung der Größenabhängigkeit
K'	Verfestigungskoeffizient
K_f	Kerbwirkungszahl
K_t	Kerbformzahl
ΔK	Zyklische Spannungsintensität
ΔK_c	Kritische zyklische Spannungsintensitätsfaktor
ΔK_{th}	Dauerfestigkeitsschwellwert
L	Probekörperlänge

m	Exponent in Rissfortschrittsgesetzen
n	Vorhandene Schwingspielzahl
n'	Zyklischer Verfestigungsexponent
n_{σ}	Stützziffer
n_{γ^*}	Stützziffer nach Siebel und Stieler
n_p	Makroskopische Stützziffer
N	Ertragbare Schwingspielzahl, allgemein
N_{Abbruch}	Abbruchkriterium bei Schwingversuchen
N_B	Schwingspielzahl bis zum Bruch
N_C	Zu $\Delta\sigma_C$ gehörige Schwingspielzahl nach EN 1993-1-9
N_D	Schwingspielzahl bei Dauerbelastung nach VDI 2230
N_K	Schwingspielzahl am Abknickpunkt zur Dauerfestigkeit
N_Z	Ertragbare Schwingspielzahl bei Belastung im Zeitfestigkeitsbereich nach VDI 2230
p_f	Schätzwert für die Bruchwahrscheinlichkeit im Zeitfestigkeitsbereich
$p_{\bar{u}}$	Überlebenswahrscheinlichkeit
P	Gewindesteigung
P_m	Schädigungsparameter nach Narberhaus
P_{SWT}	Schädigungsparameter nach Smith, Watson, Topper
r	Probekörperradius
R_e, R_e	Nenn- beziehungsweise örtliches Dehnungsverhältnis
R_m	Zugfestigkeit des Werkstoffs
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze des Werkstoffs (Streckgrenze)
R_S, R_{σ}	Nenn- beziehungsweise örtliches Spannungsverhältnis
s	Standardabweichung
s_g	Gleitschichtbreite
S	Nennspannung, allgemein
S_m	Nennmittelspannung
S_o	Nennoberspannung
T	Temperatur
ΔT	Temperaturdifferenz

x_i	Merkmal einer Stichprobe
\bar{x}	Arithmetischer Mittelwert der Stichprobe
\bar{x}_G	Geometrischer Mittelwert der Stichprobe
z	Anzahl Versuche

Griechische Buchstaben

α_T	Temperaturausdehnungskoeffizient
γ	Teilsicherheitsbeiwert
ε_a	Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,e}$	Elastischer Anteil der Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,p}$	Plastischer Anteil der Dehnungsamplitude
ε_f'	Zyklischer Duktilitätskoeffizient
ε_L	Dehnung in Axialrichtung
ε_T	Dehnung in Tangentialrichtung
μ	Reibungszahl
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite
σ_a	Spannungsamplitude
$\sigma_{a,D}$	Dauerfestigkeitsamplitude
σ_A	Nennspannungsamplitude bei Dauerfestigkeit nach DIN 969
σ_{ASV}	Nennspannungsamplitude der Dauerhaltbarkeit schlussvergüteter Schrauben nach VDI 2230
σ_{ASG}	Nennspannungsamplitude der Dauerhaltbarkeit schlussgerollter Schrauben nach VDI 2230
σ_{AZSV}	Nennspannungsamplitude der Zeitfestigkeit schlussvergüteter Schrauben nach VDI 2230
σ_{AZSG}	Nennspannungsamplitude der Zeitfestigkeit schlussgerollter Schrauben nach VDI 2230
$\Delta\sigma_C$	Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit bei $N_C = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen nach EN 1993-1-9 (Nennspannung)
$\Delta\sigma_{C, red}$	Reduzierter Bezugswert für die Ermüdungsfestigkeit nach EN 1993-1-9 (Nennspannung)

σ_e	Elastischer Anteil der Spannung
$\sigma_{es,L}$	Eigenspannung in Axialrichtung
$\sigma_{es,T}$	Eigenspannung in Tangentialrichtung
$\sigma_{es,R}$	Eigenspannung in Radialrichtung
σ_f'	Schwingfestigkeitskoeffizient
χ^*	Bezogenes Spannungsgefälle