

Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Marc Seidel

geboren am 20.10.1970 in Flensburg

2001

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Prof. Dr.-Ing. Herbert Schmidt

Tag der Promotion: 02.05.2001

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Universität Hannover

Heft 20

Marc Seidel

**Zur Bemessung geschraubter
Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Seidel, Marc:

Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen/
Marc Seidel.

Aachen : Shaker, 2001

(Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Universität Hannover ; Bd. 20)

Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-8911-4

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Institut für Stahlbau

Appelstr. 9A

30167 Hannover

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

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8911-4

ISSN 1617-8327

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Universität Hannover. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann für die Unterstützung meiner Arbeit und die durch ihn geschaffenen hervorragenden Arbeitsbedingungen. Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Herbert Schmidt.

Das Projekt „Ermüdungsbeanspruchung geschraubter Ringflanschverbindungen bei Windenergieanlagen“, innerhalb dessen große Teile dieser Dissertation entstanden sind, war nur durch die Unterstützung vieler Personen und Firmen möglich. Mein ausdrücklicher Dank gilt

- der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF) für die Förderung des Forschungsvorhabens sowie Herrn Dipl.-Ing. Dietmar Goericke vom Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM) für die Unterstützung während des Antragsverfahrens und die interessierte Begleitung des Vorhabens;
- der Firma Pfeleiderer Infrastrukturtechnik GmbH für die Lieferung von Probekörpern sowie für die Unterstützung bei der Ausrüstung der Meßtürme; insbesondere danke ich Herrn Dipl.-Ing. Michael Klußmann, der stets ein kompetenter Gesprächspartner bei der Diskussion fachlicher Fragen sowie der Vorbereitung der Messungen war und durch sein Engagement maßgeblich zum reibungslosen Gelingen der experimentellen Untersuchungen „In Situ“ beigetragen hat;
- Dr.-Ing. Uwe Hasselmann und Hugo Berkel von der Firma August Friedberg GmbH für die kostenlose Bereitstellung und Bearbeitung der Meßschrauben sowie die hilfreichen fachlichen Hinweise;
- Dr.-Ing. Andreas Reuter, Dipl.-Ing. Markus Becker und Dipl.-Ing. Thomas Siebers von der Enron Wind GmbH (früher: Tacke Windenergie) für die Unterstützung der In-Situ-Versuche sowie die Bereitstellung von Datenmaterial zu der untersuchten Anlage;
- Roger Ludgen und Lothar Schulze-Damitz von der Firma Windwärts für die Erlaubnis zu den Messungen an ihrer Windenergieanlage;
- Dr.-Ing. Herbert Siebold und Herrn Kopitz von Krupp Stahlbau Hannover für die langfristige Bereitstellung des Vorspanngeräts;
- Dipl.-Ing. Henry Seifert vom Deutschen Windenergie-Institut (DEWI) für die Bereitstellung von Belastungsdaten zur Ermüdungsberechnung;
- Dipl.-Ing. Dietmar A. Wolf von der Siegthalerfabrik GmbH für die Erläuterungen zur Flanschherstellung;
- Dr.-Ing. Thorsten Wanzek für die Bereitstellung seiner Versuchsdaten in elektronischer Form;
- den Teilnehmern des begleitenden Arbeitskreises zum Forschungsvorhaben für ihre Diskussionsbeiträge und das Interesse, das sie dieser Arbeit entgegen gebracht haben.

Insbesondere bei den Firmen Pfeleiderer Infrastrukturtechnik GmbH und Enron Wind GmbH waren noch viele weitere Personen an dem Erfolg dieser Arbeit beteiligt. Ihnen allen sei herzlich gedankt, auch wenn namentlich nicht alle erwähnt werden.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit besteht in den experimentellen Untersuchungen. Für die fruchtbaren Diskussionen im Vorfeld der Versuche, den Einfallsreichtum bei der Lösung der vielen praktischen Probleme und die außergewöhnlich gewissenhafte Durchführung der Versuchsvorbereitung danke ich besonders Herrn Karl-Heinz Hentschel. Herr Axel Rehse vom Institut für Massivbau hat sich über die Institutsgrenzen hinweg mit großem Einsatz an der Ent-

wicklung der Meßmethodik und der praktischen Durchführung beteiligt, wofür ich auch ihm herzlich danke.

Im Rahmen dieser Dissertation sind etliche Diplomarbeiten entstanden. Den Diplomanden danke ich für ihren Arbeitseinsatz, ihre Diskussionsbereitschaft und die vielen Anregungen, die aus ihren Arbeiten entstanden sind. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Fabian Wilke, der als studentische Hilfskraft und in seiner Diplomarbeit entscheidend zur erfolgreichen Durchführung der ersten Segmentversuche beigetragen hat, sowie Herrn Dipl.-Ing. Lars Bolze, dessen Programm *Dehn_RFS* ein unentbehrliches Hilfsmittel bei der Auswertung der Meßdaten war. Eine Aufstellung aller entstandenen Diplomarbeiten ist im Literaturverzeichnis enthalten.

Als wissenschaftliche Hilfskräfte waren mir besonders die Herren cand.-ing. Christian Bartels, Dipl.-Ing. Christian Hühne, cand.-ing. Jan Koppelman, Dipl.-Ing. Patric Kleineidam und cand.-ing. Tim Rutkowski eine große Hilfe, auch ihnen sei herzlich gedankt.

Einen nicht unerheblichen Anteil an dieser Arbeit haben auch meine Kollegen gehabt, ich danke ihnen für die hervorragende Arbeitsatmosphäre am Institut und die fachliche sowie moralische Unterstützung.

Für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts und die hilfreichen Diskussionen danke ich Dr.-Ing. Uwe Hasselmann und Dipl.-Ing. Michael Klußmann.

Last, but not least, danke ich meiner Freundin Birte Rössel, die mir den privaten Rahmen für diese Arbeit geschaffen hat.

Hannover, den 2. Mai 2001

Marc Seidel

Kurzfassung

In den zurückliegenden Jahren hat die Windenergiebranche weltweit einen bemerkenswerten Aufschwung erlebt, mit dem eine stetige Vergrößerung der Leistung der Anlagen und damit einhergehend auch der Türme verbunden war. Heute sind Anlagen mit einer Leistung bis zu 4500 kW in Planung, die Turmhöhe liegt hierbei deutlich über 100m.

Die vorherrschende Bauweise für Türme von Windenergieanlagen sind Stahlrohtürme, die in mehreren Sektionen auf die Baustelle gebracht und dort mittels geschraubter Verbindungen errichtet werden. Hierbei kommen fast ausschließlich Ringflanschverbindungen zum Einsatz, bei denen die Achse der kraftübertragenden Schrauben exzentrisch zur Turmschale liegt. Durch die großen Turmhöhen steigt insbesondere die dynamische Beanspruchung der Anlage, so daß sich ein deutlicher Bedarf an verfeinerten Berechnungsmethoden für die Auslegung ergeben hat.

In dieser Arbeit wird auf der Grundlage von experimentellen und numerischen Untersuchungen eine Weiterentwicklung der bekannten Bemessungsmethoden vorgenommen. Die experimentellen Untersuchungen wurden dabei sowohl an Bauteilausschnitten im Labor als auch an einer Windenergieanlage im Betrieb durchgeführt.

Aus der Analyse des Tragverhaltens wird ein iteratives Näherungsverfahren entwickelt, mit dem die Beanspruchung der Schrauben in Abhängigkeit der äußeren Belastung ermittelt werden kann. Gegenüber bekannten Berechnungsverfahren bietet das Verfahren den Vorteil einer genaueren Beschreibung des nichtlinearen Beanspruchungsverlaufes und erlaubt zudem die Bestimmung der Biegebeanspruchung in der Schraube.

Die Durchführung des Ermüdungsfestigkeitsnachweises für die kombinierte Beanspruchung aus Normalkraft und Biegemoment erfordert die Kenntnis der Ermüdungsfestigkeitskennwerte. Anhand einer Auswertung von Versuchsergebnissen aus der Literatur wird eine Einstufung der zentrisch beanspruchten Schraube in die Kerbgruppe 50 begründet. Für die exzentrische Beanspruchung wird in Abhängigkeit der Biegeanteile der Beanspruchung eine Interpolation zwischen Kerbgruppe 50 für die rein zentrische und Kerbgruppe 71 für die reine Biegebeanspruchung vorgeschlagen und durch Auswertung vorhandener Versuchsergebnisse abgesichert. Für die speziellen Belastungsverhältnisse von Windenergieanlagen wird gezeigt, welchen Einfluß die Berücksichtigung der Mittelwerte der Beanspruchungen haben kann. Im Zusammenhang mit dem iterativen Näherungsverfahren wird ein einfacher Nachweis für gering beanspruchte Verbindungen vorgeschlagen.

Da die Vorspannkraft der Schraube einen erheblichen Einfluß auf die Lebensdauer der Verbindung hat, werden Untersuchungen zum Verlust an Vorspannkraft infolge von Setzvorgängen und plastischer Dehnungen in Flansch oder Schraube angestellt. Es zeigt sich, daß die Vorspannkraftverluste durch Setzvorgänge in beachtenswerter Größenordnung liegen, sich aber einem Grenzwert annähern und deshalb nicht zum Versagen der Verbindung führen, wenn sie in geeigneter Weise rechnerisch oder durch Wartungsvorgänge berücksichtigt werden. Zur Verhinderung nicht zulässiger plastischer Dehnungen werden Näherungsverfahren eingeführt.

Für den Nachweis der Grenztragfähigkeit wird ein verbessertes Berechnungsmodell für mitteldicke Flansche entwickelt. Das Modell wird an numerischen Untersuchungen und eigenen sowie fremden Traglastversuchen überprüft. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung, so daß in bestimmten Abmessungsbereichen mit dem neuen Vorschlag eine deutliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann.

Ergänzende Untersuchungen zum Systemtragverhalten und zum Einfluß der Ringflanschverbindung auf die Beulsicherheit runden die Untersuchungen ab. Für den praktischen Einsatz der Berechnungsmethoden werden Bemessungs- und Ablaufdiagramme bereitgestellt und durch ein umfangreiches Berechnungsbeispiel illustriert.

Abstract

Within the last years, the use of wind energy has undergone a remarkable increase in popularity. This was combined with a steady enlargement of capacity of the wind turbines and increasing tower heights. Turbines with a capacity of up to 4500 kW and tower heights exceeding 100m are currently being planned.

Towers for wind turbines are usually manufactured as tubular steel towers. They are brought to the building site in two or three sections. The sections are connected to each other by bolted ring flange connections. The eccentric position of the bolts in this type of connection leads to a complex load-carrying behaviour, which requires elaborate calculation methods in order to obtain a safe and economic design that is capable of bearing the high dynamic loads.

This work contributes to the development of new calculation methods on the basis of experimental and numerical investigations. The experiments were carried out with parts of original ring flanges in the laboratory as well as in an operating wind turbine.

Starting from the analysis of the load-carrying behaviour, an iterative calculation method is proposed that allows the calculation of the bolt's stresses in dependency of the external loads. Compared to older calculation methods, the new proposal attains a better approximation of the non-linear behaviour with the additional advantage that values for both normal and bending stresses are obtained.

The fatigue assessment for the combined state of stress requires the knowledge of fatigue resistance details. Based on test results of other authors, a classification of axially loaded bolts in detail category 50 acc. to Eurocode 3 is justified. An enhanced approach is suggested for the eccentric loading, using a linear interpolation between detail category 50 for axial and detail category 71 for bending stresses. The analysis of additional test results shows that this is a conservative approach. As the loading of wind turbines is rather complex, the influence of this special situation is shown. A simple design method is proposed for connections with a low load level.

As the pretension in the bolts has a significant influence on the predicted lifetime of the connection, investigations on the loss of pretension because of settlement and plasticity are conducted. It is shown that the loss of pretension resulting from settlement is remarkable but not hazardous. It can be taken into consideration in the calculation or by means of prescribed retightening procedures. To avoid plastic deformations in the flange or in the bolt, approximation procedures are introduced.

A new method to calculate the carrying capacity of flanges in the medium thickness range is also proposed. The method is validated with numerical investigations and test results. A good agreement can be shown so that a considerable economic improvement is obtained for a specific thickness range.

Additional investigations deal with the system carrying behaviour and the influence of ring flanges on the buckling strength of tubular towers. The application of the new calculation methods is illustrated by flow charts and an example calculation.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung.....	V
Bezeichnungen.....	VII

Allgemeines

1 Herstellung von Flanschverbindungen.....	1
1.1 Herstellungsmethoden	1
1.2 Empfehlungen zur Ausführung nach Eurocode 3, Teil 3-2.....	2
1.3 Flanschvarianten und Herstellungskosten.....	3
1.4 Beschichtungen.....	5
1.5 Schrauben	5
2 Bemessung von Ringflanschverbindungen – Stand des Wissens.....	7
2.1 Ermittlung der Schraubenbeanspruchung im Bereich des elastischen Tragverhaltens.....	9
2.2 Ermüdungsfestigkeitsnachweis.....	15
2.3 Zeit- und lastabhängiges Verhalten.....	18
2.4 Nachweis der Grenztragfähigkeit.....	21
2.5 Tragverhalten des Gesamtsystems.....	24

Experimentelle und numerische Untersuchungen

3 Experimentelle Untersuchung von Flanschverbindungen.....	25
3.1 Meßmethodik zur Ermittlung der Schraubenbeanspruchung.....	25
3.2 Laborversuche.....	28
3.3 Feldversuche.....	33
3.4 Datenreduktion	39
3.5 Meßunsicherheit	39
3.6 Ergebnisse.....	40
4 Untersuchung von Flanschverbindungen mit Hilfe der FE-Methode.....	41
4.1 Modellierung der Kontaktzonen.....	41
4.2 Modellierung der Schraube.....	43
4.3 Modellierung des Flansches	47
4.4 Geometrische Nichtlinearität.....	50
4.5 Nichtlineare Lösung und Konvergenz.....	50
4.6 Einfluß der Randbedingungen.....	52
4.7 Einspannwirkung der Schale	52
4.8 Modellierung des Gesamtsystems	53
4.9 Validierung des FE-Modells im Betriebslastbereich.....	54
4.10 Validierung des FE-Modells im Traglastbereich.....	60
4.11 Ergebnisse.....	63

Berechnung und Bemessung

5	Ermittlung der Schraubenbeanspruchung.....	65
5.1	Ableitung eines Rechenmodells zur Ermittlung der Beanspruchung.....	65
5.2	Abgrenzung des Rechenmodells.....	75
5.3	Verlauf der Schraubenkraftfunktion im Druckbereich.....	78
5.4	Vergleich der Berechnungsverfahren anhand von Beispielen.....	78
5.5	Zusammenfassende Bewertung der Berechnungsmodelle.....	81
5.6	Einfluß von Imperfektionen.....	82
5.7	Anmerkung zum Verformungsverhalten.....	84
5.8	Ergebnisse.....	84
6	Ermüdungsfestigkeitsnachweis.....	85
6.1	Versuchsergebnisse zur Ermüdungsfestigkeit.....	86
6.2	Vorschlag zur Behandlung der kombinierten Beanspruchung.....	91
6.3	Regelung im Windenergieanlagen-Bereich.....	97
6.4	Verwendung von Rainflow-Matrizen.....	99
6.5	Einfluß der Vorspannkraft auf die Schädigung.....	104
6.6	Vorschlag für einen Nachweis ohne Berechnung der Schraubenkraftfunktion.....	106
6.7	Vorschlag für weitere Versuche.....	106
6.8	Ergebnisse.....	108
7	Zeit- und lastabhängiges Verhalten.....	109
7.1	Vorspannkraft und -moment.....	109
7.2	Setzverhalten.....	111
7.3	Vorspannkraftverluste infolge lokaler Plastizierung im Flansch.....	120
7.4	Vorspannkraftverluste infolge lokaler Plastizierung in der Schraube.....	124
7.5	Ergebnisse.....	126
8	Nachweis der Grenztragfähigkeit.....	127
8.1	Ableitung eines verbesserten Berechnungsmodells für die Traglastberechnung.....	127
8.2	Fließmuster bei breiten Flanschen.....	133
8.3	Begrenzung der Tragfähigkeit durch Erschöpfung der Verformungsfähigkeit.....	133
8.4	Eigene Versuchsergebnisse.....	135
8.5	Vergleich der Bemessungswerte mit Versuchsergebnissen aus der Literatur.....	140
8.6	Beispiel (Parameterstudie).....	144
8.7	Ergebnisse.....	144
9	Tragverhalten des gesamten Ringflansches.....	145
9.1	Bewertung des Segmentansatzes zur Ermittlung der Beanspruchungen.....	145
9.2	Einfluß eines Winkelspaltes.....	146
9.3	Einfluß einer geringeren Vorspannkraft.....	150
9.4	Ergebnis der Messungen „In Situ“.....	151
9.5	Tragfähigkeit des Gesamtsystems.....	155
9.6	Ergebnisse.....	156
10	Bedeutung der Ringflanschverbindung für den Beulsicherheitsnachweis.....	157
10.1	Mindeststeifigkeit für axial beanspruchte Schalen.....	157
10.2	Mindeststeifigkeit für biegebeanspruchte Schalen.....	158
10.3	Einfluß des Winkelspaltes auf die Beulsicherheit.....	159
10.4	Ergebnisse.....	159

Schlußfolgerungen und Empfehlungen

11 Empfehlungen zur Ausbildung, Berechnung, Montage und Wartung.....	161
11.1 Geometrische Ausbildung	161
11.2 Berechnung.....	165
11.3 Montage und Wartung.....	166
11.4 Empfehlungen für weitere Versuche	166
12 Zusammenfassung und Ausblick.....	167
12.1 Zusammenfassung	167
12.2 Ausblick.....	169

Anhänge und Literatur

13 Anhänge.....	171
13.1 Anhang A – Ablaufdiagramme.....	171
13.2 Anhang B – Bemessungsbeispiel.....	180
13.3 Anhang C – Programme	193
13.4 Anhang D – Wichtige SchraubenKennwerte.....	196
13.5 Anhang E – Abmessungen der Versuchsschrauben.....	197
13.6 Anhang F – Materialkennwerte	198
14 Literatur	199
14.1 Normen und Richtlinien	199
14.2 Monographien, Handbücher und Aufsätze.....	200
14.3 Weitere Unterlagen.....	206
14.4 Eigene Veröffentlichungen zum Thema der Arbeit.....	206
14.5 Diplomarbeiten	207