

Experimentelle und numerische Untersuchungen von Ringflanschverbindungen

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Dipl.-Ing. Marc Seidel
Universität Hannover, Institut für Stahlbau, Deutschland

KURZFASSUNG: In diesem Beitrag werden experimentelle und numerische Untersuchungen zu Ringflanschverbindungen in Türmen von Windenergieanlagen vorgestellt. Die Messungen wurden sowohl in Laborversuchen als auch in einer laufenden Windenergieanlage durchgeführt. Für beide Teile des Versuchsprogramms wird ein Überblick über die eingesetzte Meßtechnik gegeben. Das mit Hilfe dieser Versuche kalibrierte FE-Modell wird vorgestellt und in seinen Ergebnissen exemplarisch mit den Versuchen verglichen. Für die praktische Anwendung wird auf Näherungsmodelle eingegangen, mit denen die Schraubenbeanspruchung ohne aufwendige FE-Berechnung ermittelt werden kann. Die Ergebnisse der Berechnung des Gesamtsystems geben Aufschluß über mögliche Einflüsse im gesamten Ringflansch, die über die vereinfachte Modellierung nicht erfaßt werden können.

1 EINLEITUNG

Als Tragturm für Windenergieanlagen hat sich unter den gegebenen Rahmenbedingungen der stählerne Vollwandturm als wirtschaftlichste Bauweise etabliert. Die Türme werden je nach Höhe in zwei oder mehr Sektionen auf die Baustelle gebracht und dort über Ringflanschverbindungen miteinander verschraubt.

Die Ermittlung der Schraubenbeanspruchungen für die Nachweise der Grenztragfähigkeit und der Ermüdungsfestigkeit erfolgt üblicherweise am aus dem Gesamtsystem herausgeschnittenen Segment. Die in der Turmschale vorhandene Biegezugspannung wird zu einer Zugkraft integriert, die auf das Segment angesetzt wird. Diese als "Segmentansatz" bezeichnete Vorgehensweise wird in Abbildung 1 veranschaulicht.

Da es sich um eine vorgespannte Verbindung handelt, ist der Verlauf der Schraubenbeanspruchung über der Zugkraft im Mantelblech nichtlinear. Der qualitative Verlauf der Schraubenkraft ist in Abbildung 2 dargestellt, für das Biegemoment in der Schraube ergibt sich ein ähnliches Verhalten.

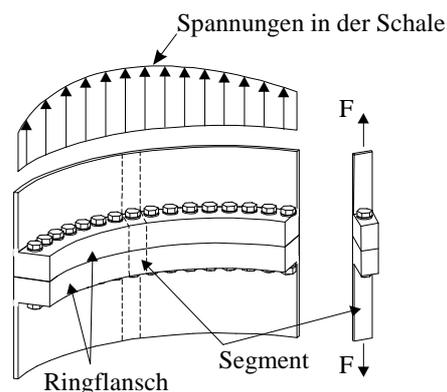
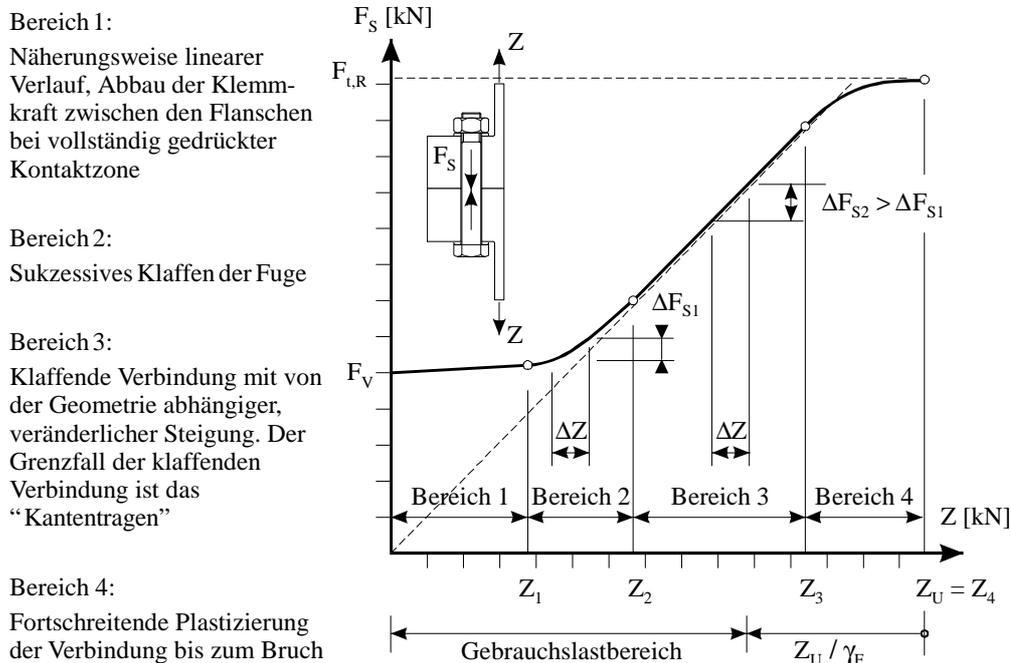


Abbildung 1 Segmentansatz



Das komplexe nichtlineare Tragverhalten der exzentrisch gezogenen Verbindung sowie die hochdynamische Belastung der Windenergieanlagen mit mehr als 10^9 Lastspielen in 20 Jahren Lebensdauer erfordern abgesicherte Berechnungsmethoden zur Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und der Ermüdung. Zum Vergleich mit vereinfachten Berechnungsmodellen wurden experimentelle Untersuchungen an einer laufenden Windenergieanlage sowie an Bauteilausschnitten (Segmenten) im Labor durchgeführt. Zur Ergänzung des untersuchten Parameterbereiches wurde ein anhand der Versuche kalibriertes FE-Modell verwendet.

2 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Ziel der experimentellen Untersuchungen war es, die Beanspruchung der Schraube durch Normalkraft und Biegemoment in Abhängigkeit von der äußeren Belastung zu ermitteln. Nachfolgend wird die dazu verwendete Meßtechnik beschrieben.

Als Meßgrößen wurden im Labor die Dehnungen der Schraube, die Verformung des Flanschpaares über einen Wegaufnehmer zur Spaltmessung, teils Dehnungen am Flansch sowie die Daten der Prüfmaschine erfaßt. Im Feldversuch wurden ebenfalls die Dehnungen der Schraube, Dehnungen in der Turmwandung sowie aussagekräftige Daten der Betriebsführung der WEA gemessen (Leistung, Windgeschwindigkeit, Umdrehungszahl und Drehwinkel der Gondel auf dem Turm).

2.1 Spezielle Meßmethodik zur Ermittlung der Schraubenbeanspruchung

Die Versuche wurden mit Schraubengarnituren M30 und M36 nach DIN 6914ff durchgeführt, die von der Firma August Friedberg GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Auf dem Schraubenschaft wurden Dehnungsmeßstreifen (DMS) appliziert, um aus den Dehnungen die Beanspruchungen ermitteln zu können. Da eine Berührung zwischen den installierten DMS und dem Flansch vermieden werden mußte, wurden die Schrauben im mittleren Bereich auf einen reduzierten Durchmesser abgedreht. Zur Führung der Kabel wurde eine schräge Bohrung $d = 4\text{mm}$ vom Schraubenkopf zum reduzierten Querschnitt gesetzt. Alternative Kabelführungen, z.B. durch eine Nut in der Berührungsebene der Flansche, konnten nicht gewählt werden, da die Versuchsbedingungen im Labor möglichst unverändert auch bei den Versuchen an laufenden Windenergieanlagen übernommen werden sollten. Dort ist wegen des Montagevorganges nur eine Kabelführung durch den Schraubenkopf möglich. Die Beeinflussung der Meßergebnisse durch die verringerte Steifigkeit infolge des reduzierten Meßquerschnitts der Schraube ist gering. Im Laborversuch kann diese direkt in der Vergleichsrechnung berücksichtigt werden, im Feldversuch erhält die Schraube eine im Verhältnis der Steifigkeiten geringere Beanspruchung im Vergleich zu den Nachbarschrauben.

Für die Wahl der Anordnung der Dehnungsmeßstreifen (DMS) waren folgende Kriterien ausschlaggebend:

1. Der Spannungszustand im Schraubenschaft sollte eindeutig bestimmt werden können. Hierzu ist die Beschreibung einer aus drei Punkten bestehenden Meßebene erforderlich, so daß drei Meßstellen im Abstand von 120° auf dem Umfang anordnet wurden.
2. Die Messung sollte temperaturkompensiert erfolgen, um eine Verfälschung der Meßergebnisse durch Temperaturschwankungen im Feldversuch zu vermeiden. Diese Bedingung wurde durch die Wahl von Vollbrücken erfüllt.
3. Durch die Wahl der Vollbrückenschaltung findet zudem keine gegenseitige Beeinflussung der Messungen von Normalspannungen infolge Zug und Biegung sowie Schubspannungen infolge Torsion statt [1].

Ergänzend zu den drei Meßstellen, mit denen die Längsdehnungen gemessen wurden, wurde eine Vollbrücke zur Ermittlung der Torsionsdehnungen verwendet. Aus der Messung des Torsionsmomentes während des Anziehvorgangs kann z.B. auf die Reibungsbeiwerte von Gewinde und Schraubenkopf geschlossen werden. Diese Möglichkeit ist wichtig, um die Plausibilität der gemessenen Vorspannkraften prüfen zu können.

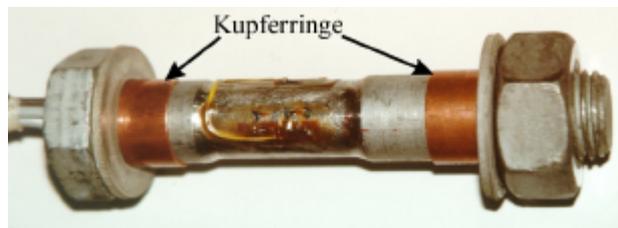


Abbildung 3 Meßschraube M30

Abbildung 3 zeigt eine fertige Meßschraube M30. Die Kupferringe wurden im Laborversuch als zusätzliche Zentrierhilfe eingesetzt.

Die gewählte Ausstattung der Schrauben ist zwar sehr aufwendig, da für die Vollbrücken ein hoher Verkabelungsaufwand entsteht und alleine die Materialkosten für die DMS etwa 300,-DM pro Schraube betragen, dafür ist die Information über die Beanspruchung der Schraube sehr aussagekräftig.

2.2 Laborversuche

Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau im Labor. Ein Flanschsegment, das aus einem Originalringflansch einer serienmäßig produzierten Windenergieanlage herausgetrennt wurde, wurde in die servohydraulische Prüfmaschine eingespannt und mit Zugkräften bis zu 530 kN (im Traglastversuch) belastet. Die Daten der Prüfmaschine (Prüfkraft und Kolbenweg) wurden ebenso wie die Ausgangssignale der Dehnungsmessstreifen auf der Schraube mit Hilfe eines digitalen Meßverstärkers Spider-8 aufgezeichnet.

Insgesamt wurden vier Flanschsegmente unterschiedlicher Abmessungen untersucht. Zwei Versuchsflansche entsprachen dabei Originalbauteilen, zwei weitere Versuchsflansche wurden durch Variation der Dicke aus diesen herausgearbeitet. Durch die dünnen Flansche 3 und 4 (siehe Abbildung 5) sollte der untersuchte Parameterbereich in Richtung biegeweicher Flansche erweitert werden, da die Originalflansche 1 und 2 als „dicke“ Flansche einzustufen waren.

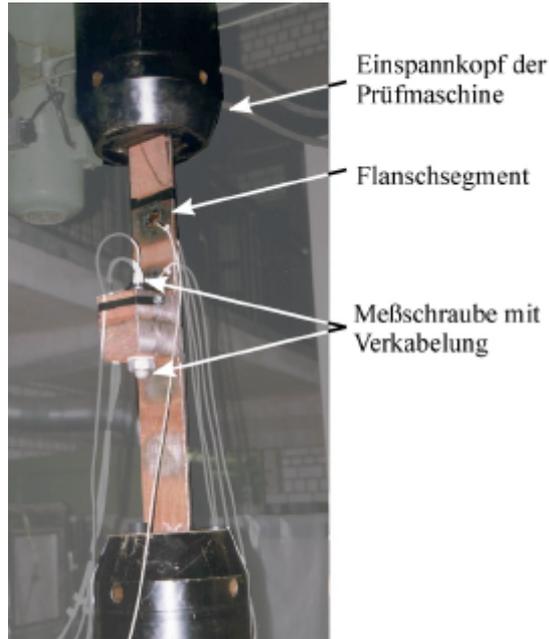


Abbildung 4 Segmentversuch im Labor

Die Auswertung der Meßdaten der Schraube erfolgte mit Hilfe eines am Institut entwickelten Excel-Programms, das aus den Dehnungen am Schraubenschaft die Normalkraft, das Biegemoment sowie die Lage der elastischen Nulllinie ermittelt. Über die Richtung des in der Schraube vorhandenen Biegemomentes war eine sehr gute Möglichkeit zur Plausibilitätsprüfung der Meßergebnisse gegeben.

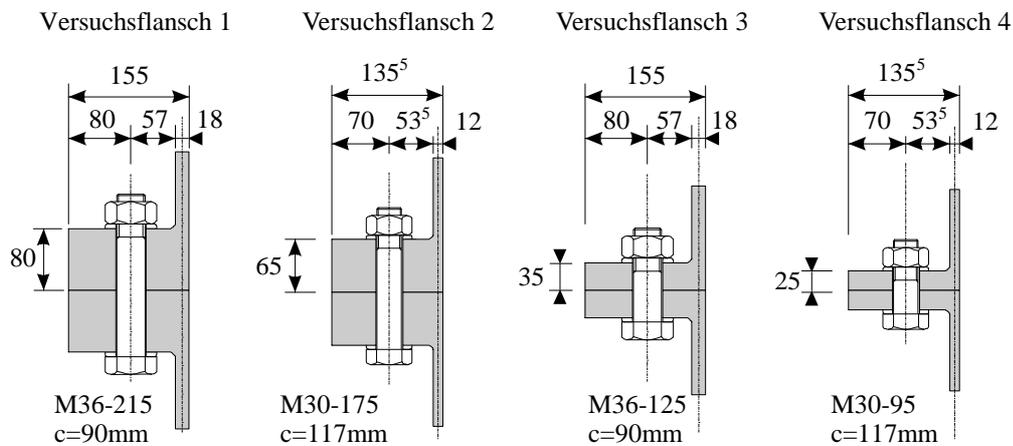


Abbildung 5 Übersicht über die Versuchsflansche

2.3 Feldversuche

Zum Vergleich mit den Laborversuchen wurden auch Messungen an einer laufenden Windenergieanlage durchgeführt. Zur Ermittlung der Spannungen in der Turmschale wurden DMS-Vollbrücken an der Innen- und der Außenseite der Turmschale verwendet. Es wurden vier Meßstellen auf dem Umfang verteilt, so daß über die jeweils gegenüberliegenden Meßstellen wiederum eine Plausibilitätskontrolle der Meßwerte möglich war. Im Gegensatz zu anderen Fragestellungen, z.B. der Ermittlung von Ermüdungslastkollektiven, war hier eine Online-Reduktion der Meßdaten nicht möglich, da jeweils zugeordnete Meßsignale aller Meßstellen erforderlich waren. Die Meßdaten lagen somit als Zeitreihen vor, Abbildung 6 zeigt dazu beispielhaft einen Ausschnitt aus der Messung. Dargestellt ist die aus den Dehnungswerten an der Turmwand berechnete Zugkraft pro Segment sowie die aus den Dehnungswerten am Schraubenschaft ermittelte Schraubkraft an der gleichen Meßstelle. Es ist erkennbar, daß sich äußere Zugkraft und Schraubkraft synchron zueinander verändern, infolge der Vorspannung der Verbindung ist die Variation der Schraubkraft aber deutlich geringer als die der äußeren Zugkraft.

Um die anfallende Meßdatenmenge zu reduzieren, wurde eine von der Windgeschwindigkeit abhängige, dynamisch angepaßte Meßrate zwischen 1/60 und 10 Hz verwendet. So konnte gewährleistet werden, daß hohe Beanspruchungen mit guter Genauigkeit erfaßt wurden, ohne daß in Zeiten niedriger Beanspruchungen unnötig Meßwerte aufgezeichnet wurden. Innerhalb der achtmonatigen Meßkampagne sind in den 32 Kanälen dennoch etwa 10 GB Daten angefallen.

Ergänzt wurde die Belastungsmessung durch eine Ebenheitsvermessung des Flansches, um einen Eindruck von den unvermeidlichen Abweichungen von der Sollgeometrie zu erhalten, sowie die Messung der Schichtdicken des Korrosionsschutzes. Letztere waren insbesondere deshalb von Bedeutung, da auch der Vorspannkraftabfall infolge Setzung verfolgt werden sollte. Dieser ist maßgeblich von der Art der verwendeten Beschichtung sowie der vorliegenden Schichtdicke abhängig.

Experimentelle und numerische Untersuchungen von Ringflanschverbindungen

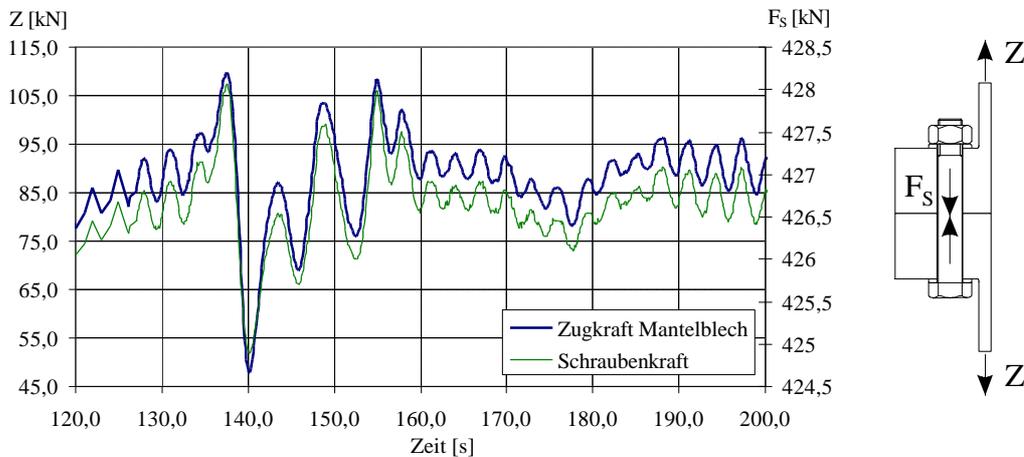


Abbildung 6 Beispiel für eine Zeitreihe der aus den Meßdaten ermittelten Zugkraft pro Flanschsegment (linke Ordinate) sowie der Schraubenkraft (rechte Ordinate)

3 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

Da die Untersuchung von Flanschverbindungen aus Aufwandsgründen nicht ausschließlich experimentell erfolgen kann, wurde zur Ergänzung und Plausibilitätsprüfung der Versuche ein FE-Modell verwendet. Das Modell wird über den Vergleich mit den Versuchsergebnissen verifiziert. Die Ergebnisse der FE-Berechnung können dann zur Überprüfung von Näherungsverfahren eingesetzt werden.

3.1 FE-Modellbildung

Zum Vergleich mit den Versuchsergebnissen wurden verschiedene dreidimensionale FE-Modelle verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der Modelle ist [1] zu entnehmen, eine zusammenfassende Darstellung insbesondere der Modellierung der Schraube ist in [3] veröffentlicht worden.

Neben einem dreidimensionalen Modell des Flanschsegments (Abbildung 7) wurde ein aufwendiges Modell des Gesamtsystems erstellt. Da der Einsatz von Volumenelementen im gesamten Modell eine zu große Anzahl von Elementen erfordert hätte, wurden sog. Superelemente eingesetzt. Bei dieser Elementierungstechnik wird das Modell bereichsweise in einem der eigentlichen Berechnung vorgeschalteten Rechenlauf auf seine Steifigkeitsmatrix reduziert und als Matrixelement in die Steifigkeitsmatrix des Gesamtsystems integriert. Auf diesem Wege kann die Gesamtzahl der Elemente bei feiner Vernetzung stark reduziert werden. Die Steifigkeitsmatrix der Superelemente wird allerdings bei nichtlinearen, iterativen Berechnungen nicht neu aufgebaut. Es dürfen deshalb zumindest im Bereich der Superelemente keine nichtlinearen Effekte, z.B. Plastizierungen, auftreten.

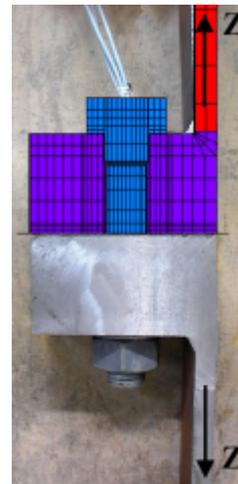


Abbildung 7 FE-Modell und Versuchsflansch 1

Für die Berechnung der Ermüdungsbeanspruchung im Gebrauchslastbereich stellt diese Einschränkung aber kein Problem dar, da hier ohnehin nur der elastische Bereich interessiert und geometrisch nichtlineare Effekte nicht relevant sind.

Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen Versuch und FE-Berechnung für den Versuchsflansch 1, dessen Abmessungen Abbildung 5 zu entnehmen sind. Die Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung ist gut, qualitativ ähnlich gute Ergebnisse wurden bei den anderen Versuchsflanschen erzielt.

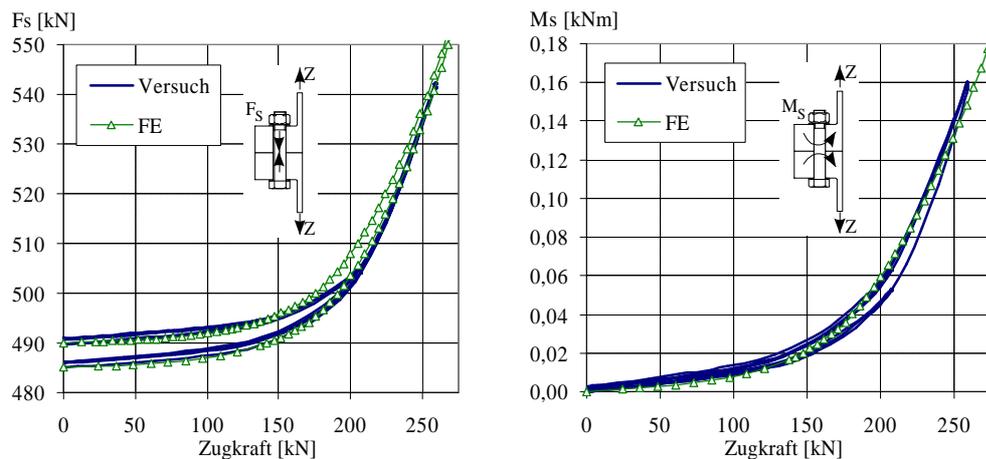


Abbildung 8 Vergleich zwischen Versuch und Berechnung für Versuchsflansch 1

3.2 Näherungsverfahren

Auch wenn in Baugenehmigungsverfahren FE-Berechnungen mit dreidimensionalen Modellen mittlerweile nicht mehr unüblich sind, sind zumindest für die Vorbemessung und für Vergleichsberechnungen einfachere Rechenmodelle erforderlich. Im Bereich Windenergieanlagen wurden in der Vergangenheit oft die Berechnungsvorschläge von Petersen [2] und Schmidt/Neuper [4] verwendet. Seidel [1] hat unlängst einen weiteren Vorschlag veröffentlicht, der neben einer besseren Approximation des nichtlinearen Verlaufes auch die Ermittlung der überlagerten Biegespannungen erlaubt. Abbildung 9 zeigt den Vergleich der drei Näherungsverfahren mit der FE-Berechnung für Versuchsflansch 1. Mit Hilfe der älteren Berechnungsvorschläge werden für die Schraubenkraft deutlich auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse errechnet, wenn auch bei hohen Zugkräften die Steigung der Schraubenkraftfunktion zumindest beim Verfahren von Petersen unterschätzt wird. Dies kann ggf. bei Lastspielen mit hoher Mittellast von Bedeutung sein, vgl. dazu Abbildung 2. An ein Näherungsverfahren ist demzufolge i.a. der Anspruch zu stellen, daß neben dem Absolutwert der Schraubenbeanspruchung auch die Steigung der Funktion in jedem Fall auf der sicheren Seite liegt. Für den vorliegenden Fall erfüllt das Näherungsverfahren nach [1] diese Anforderung für die Schraubenkraft, beim Biegemoment liegt bei höheren Zugkräften eine leichte Unterschätzung vor. Diese wird aber durch die dann zu groß ermittelten Schraubenkräfte ausgeglichen.

Experimentelle und numerische Untersuchungen von Ringflanschverbindungen

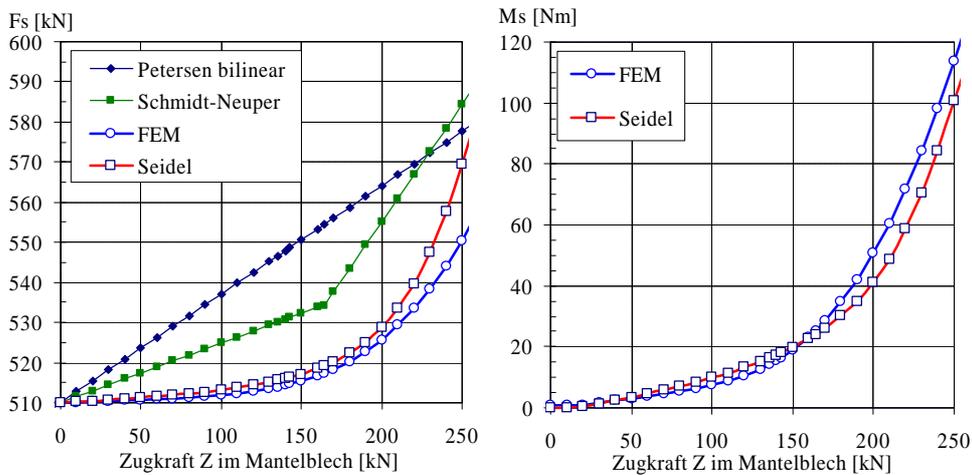


Abbildung 9 Vergleich zwischen FE-Berechnung und Näherungsverfahren

Die zusätzlich zur zentrischen Zugkraft auftretenden Biegemomente sind erheblich, im vorliegenden Fall sind die Zusatzspannungen $\Delta\sigma_N$ und $\Delta\sigma_M$ in gleicher Größenordnung. Es ist deshalb nicht vertretbar, die Biegespannungen beim Ermüdungsnachweis der Schraube zu vernachlässigen. Nach Eurocode 3, Teil 2 [5] kann dem Nachweis für die kombinierte Beanspruchung die Kerbgruppe 50* zugrunde gelegt werden.

3.3 Einflüsse der Gesamttragwirkung

Das FE-Modell des Gesamtsystems wurde verwendet, um verschiedene Einflüsse zu bewerten, die nicht am Segmentmodell erfaßt werden können. Zusammengefaßt können folgende Aussagen getroffen werden:

1. Im Bereich der Betriebslasten ergibt sich bei den im Windenergieanlagenbau üblichen Flanschen mit großen Durchmessern und vielen Schrauben kein Unterschied zwischen denen mit dem Segment- bzw. dem Gesamtmodell ermittelten Schraubenbeanspruchungen. Eine Umlagerung im Gesamtsystem tritt erst bei sehr großen äußeren Biegemomenten auf, die bereits in der Nähe des Traglastbereiches liegen.
2. Da die Systemtragwirkung die Verformungen des Gesamtsystems bestimmt, hat z.B. eine niedrigere Vorspannung einer Schraube so gut wie keine Auswirkungen auf ihre Zusatzbeanspruchungen infolge äußerer Last. Diese werden durch die Verformungen bestimmt, die die Schraube im Gesamtsystems erfährt und die weitgehend unabhängig von der lokalen Steifigkeit sind.
3. Ein gleichmäßig nach innen klaffender Winkelspalt wirkt sich auf die Schraubenbeanspruchung günstig aus.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Schrauben in exzentrisch gezogenen, vorgespannten Flanschverbindungen erhalten in Abhängigkeit von der äußeren Belastung eine nichtlinear ansteigende Beanspruchung in Form von zentrischer Zugkraft und überlagertem Biegemoment. Insbesondere für den Ermüdungsnachweis ist die Kenntnis der dem äußeren Belastungskollektiv zugeordneten Spannungsschwingbreiten in der Schraube wichtig. Zur experimentellen Ermittlung der Schraubenbeanspruchung wurde eine zwar aufwendige, dafür aber unter verschiedenen Aspekten sinnvolle Meßausstattung für Labor- und Feldversuche vorgestellt. Anhand des Vergleiches der Versuchsergebnisse mit numerisch ermittelten Werten konnte gezeigt werden, daß eine sehr gute Übereinstimmung von Experiment und Versuch erreichbar ist. Als Ergänzung zur aufwendigen FE-Berechnung wurde auf Näherungsverfahren eingegangen, mit deren Hilfe eine Abschätzung der Beanspruchung der Schraube vorgenommen werden kann. Infolge der in etwa gleicher Größenordnung auftretenden Normal- und Biegespannungen sollte hierbei nur auf Modelle zurückgegriffen werden, mit denen beide Anteile zutreffend erfaßt werden können.

Im Gesamtsystem können gegenüber dem Segmentmodell Einflüsse an Bedeutung gewinnen, die am herausgelösten Teilsystem nicht betrachtet werden können. Anhand eines aufwendigen FE-Modells des Gesamtsystems konnte gezeigt werden, daß die Ermittlung der Beanspruchungen beim perfekten System dennoch am Segmentmodell erfolgen kann.

Die Ergebnisse der Feldmessung befinden sich derzeit noch in der Auswertung. Die Meßkampagne an einer WEA ist abgeschlossen, die zweite läuft derzeit. Die Ergebnisse werden zum Jahresende im Forschungsbericht zum Projekt „Ermüdungsbeanspruchung geschraubter Ringflanschverbindungen bei Windenergieanlagen“ veröffentlicht.

5 LITERATUR

- [1] Seidel, M.: Zur Bemessung geschraubter Ringflanschverbindungen von Windenergieanlagen. Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau, Heft 20, Hannover, Diss. 2001.
- [2] Petersen, C.: Stahlbau, 3. Auflage Braunschweig: Wiesbaden: Vieweg 1997.
- [3] Schaumann, P.; Kleineidam, P.; Seidel, M.: Zur FE-Modellierung von Schraubenverbindungen. Stahlbau 70 (2001), S. 73-84.
- [4] Schmidt, H., Neuper, M.: Zum elastostatischen Tragverhalten exzentrisch gezogener L-Stöße mit vorgespannten Schrauben. Stahlbau 66 (1997), S. 163–168.
- [5] ENV 1993-2: Eurocode 3, Part 2: Steel Bridges. 1997.