

Ermüdungssicherheit imperfekter vorgespannter Ringflanschstöße in windbeanspruchten turmartigen Stahlbauten

Forschungsvorhaben DIBt-Gesch.Z. IV 12-5-16.104-912/99

Zusammenfassung

1 Problemstellung, Zielsetzung

Montagestöße von turmartigen, kreiszylindrisch oder konisch rohrförmigen Stahlbauten – z.B. Türme von Windenergieanlagen (WEA), Schornsteine, Maste – werden in der Regel als vorgespannte geschraubte Ringflanschverbindungen mit L-Querschnitt ausgebildet. Die abstehende Seite der Flansche befindet sich entweder innen (z.B. bei WEA-Türmen) oder außen (z.B. bei Schornsteinen). Bemessungskritisches Element dieser Stöße meist die infolge der Windbelastung hochgradig ermüdungsbeanspruchten hochfesten Schrauben.

Die in den Ermüdungssicherheitsnachweis der Schrauben einzuführende **Beanspruchbarkeit** ist die Wöhlerkurve der Zugspannungsschwingbreite $\Delta\sigma_R$ im Gewindequerschnitt. Sie ist bekannt. Dagegen stellt sich die **Beanspruchungsseite** des Nachweises, d.h. das einzuführende Kollektiv der Zugspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_S$, wesentlich komplexer dar. Das innere Kräftespiel der auf der Rohrbiegezugseite exzentrisch gezogenen vorgespannten L-Flanschverbindung ist bereits bei perfekter Ausführung hochgradig nichtlinear. Die perfekte Ausführung ist durch zwei planebene Flanschflächen charakterisiert, die gleichmäßig auf Druckkontakt gegeneinander gespannt werden. Geringfügige Abweichungen davon, d.h. geometrische Imperfektionen in Form von Flanschklaffungen vor dem Vorspannen, sind bei großen Rohrdurchmessern (z.B. 3 bis 5 m) baupraktisch unvermeidbar. Das innere Kräftespiel in der Flanschverbindung reagiert darauf sehr empfindlich. Das bedeutet, dass die Ermittlung des ermüdungswirksamen Beanspruchungskollektivs mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Um eine verlässliche Grundlage für die Bewertung der Imperfektionen aus der Sicht des Ermüdungssicherheitsnachweises zu bekommen, wurden experimentelle und numerische Untersuchungen im Fachgebiet Stahlbau der Universität Essen durchgeführt.

2 Experimentelle Untersuchungen

Es wurden vier großmaßstäbliche **Rohrbiegeversuche** (Vierpunktversuche) mit außenliegendem L-Ringflanschstoß im Bereich des konstanten Rohrbiegemomentes durchgeführt. Der Rohrdurchmesser betrug ca. 1 m; die Flansche waren Aufschweißflansche 90 x 35 mm und wurden mit 32 Schrauben M20-10.9 vorgespannt. Einer der vier Versuchskörper hatte einen perfekten Flanschstoß und diente als Referenzversuch. Die anderen drei hatten planmäßig imperfekt gefertigte Flanschstöße mit Winkelklaffung flanschseitig bzw. rohrseitig, beide über den gesamten Umfang, sowie mit Parallelklaffung über ein Viertel des Umfangs im Rohrbiegezugbereich. Alle Schrauben wurden trotz der zum Teil großen Neigung der Auflageflächen von bis zu 4% mit normalen HV-Scheiben eingebaut.

Von den Schrauben eines Flanschstoßes waren je neun im Biegezugbereich, eine in Höhe der Biegeullinie und eine im Biegedruckbereich als **Messschrauben** mit Dehnungsmessstreifen (DMS) bestückt. Zum Applizieren der DMS war der Schraubenschaft um 1,5mm abgedreht worden. Die gewählte Anordnung von je drei DMS erlaubte es, neben der mittleren (Normalkraft-) Dehnung auch die Biegedehnung im Schraubenschaft nach Größe und Richtung zu messen. Alle nicht mit DMS bestückten Schrauben der untersuchten Flanschstöße waren ebenfalls im Schaft-

bereich abgedreht, um ein gleichartiges Tragverhalten aller Schrauben zu gewährleisten. Die Messeinrichtungen umfassten neben den Messschrauben auch DMS an den Rohrschalen und induktive Wegaufnehmer zur Messung der Flanschklaffung auf der Rohrrinnenseite.

Die Schrauben wurden bei stehender Anordnung der Versuchskörperrohre in der **Vorspannphase** unter sorgfältiger messtechnischer Kontrolle mit Drehmomentschlüssel vorgespannt. Bei den imperfekten Flanschstößen musste das iterativ erfolgen. Die mit dem Norm-Anziehmoment schließlich erreichten Normalkraftdehnungen stimmten im Mittel sehr gut mit dem Sollwert überein, bei einem Variationskoeffizienten von rd. 6%. In den winkelklaffenden Flanschstößen bauten sich die anfänglich großen Biegedehnungen der Schrauben im Verlaufe des Zusammenziehens der Flansche bis etwa auf das Niveau des perfekten Referenzstoßes ab. Beim parallelklaffenden Flanschstoß, der infolge der Membransteifigkeit der Rohrschale auch bei voller Vorspannung noch etwas klaffte, verblieben größere Biegedehnungen in den Schrauben. Der komplexe innere Beanspruchungszustand des parallelklaffenden Stoßes nach Abschluss des Vorspannens konnte mit Hilfe der Dehnungsmessungen an den Rohrschalen unmittelbar neben den Flanschen dokumentiert werden. Er ist durch Zugmembrankräfte und örtliche Biegemomente in der Schale innerhalb des klaffenden Umfangsbereiches und Druckmembrankräfte an seinen Rändern gekennzeichnet.

Zentraler Teil der Rohrbiegeversuche war eine ausführliche **Schwellbelastungsphase** mit einer Reihe von Belastungen auf immer höhere Last und jeweils anschließender Entlastung auf Null sowie mit zwischengeschalteten Schwelllastsequenzen mit je 100 Lastspielen auf unterschiedlichen Lastniveaus. Es handelte sich dabei nicht um „Dauerschwingversuche“ (diese wären mit vertretbarem Zeitaufwand nicht realisierbar gewesen), sondern um langsam gefahrene, wiederholte Belastungen – mit dem Ziel, die eventuellen inneren Umlagerungsvorgänge im vorgespannten Flanschstoß (Stichwort: Vorspannverluste) messtechnisch zu verfolgen. Dementsprechend wurden alle Messwerte in engen Last- bzw. Zeitintervallen aufgenommen.

Primäres Ergebnis der Schwellbelastungsphase sind **Funktionen der Schraubendehnungen** über der aufgetragenen Rohrbiegebelastung. Die mittleren (Normalkraft-) Schraubendehnungen zeigen den bekannten, progressiv nichtlinearen Verlauf, aber mit sehr deutlichem Einfluss der Flanschimperfektionen: Während die flanschseitige Winkelklaffung sich nicht negativ auswirkt, nehmen bei rohrseitiger Winkelklaffung und bei Parallelklaffung die Schraubenzugkräfte von Belastungsbeginn an stärker zu als beim perfekten Referenz-Flanschstoß, wobei die Parallelklaffung noch einmal viel ungünstiger ist als die rohrseitige Winkelklaffung. Ein von Belastungsbeginn an stärkerer Anstieg der Schraubenkraftfunktion hat bekanntlich zur Folge, dass auch die vielen Schwelllastspiele auf niedrigem und mittlerem Lastniveau (z.B. bei WEA's der Produktionsbetrieb bei niedrigen und mittleren Windgeschwindigkeiten) bereits ermüdungswirksame Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_S$ in den Schrauben erzeugen. Es lässt sich aus den Versuchsergebnissen auch belegen, dass bei imperfekten Flanschstößen selbst auf der Rohrbiegedruckseite noch signifikante Beiträge zum $\Delta\sigma_S$ -Kollektiv erzeugt werden. Die besonders ungünstigen Auswirkungen einer Parallelklaffung auf das innere Kräftespiel im Flanschstoß wird durch die in den Rohrschalen gemessenen Dehnungen unterstrichen: Die Zugmembrankräfte aus Rohrbiegung werden sehr ungleichmäßig übertragen, mit nur kleinen Beiträgen im klaffenden Umfangsbereich und Beanspruchungsspitzen an seinen Rändern – dort, wo die Vorspannung große Druckmembrankräfte erzeugt hatte. Die Folgen für die Ermüdungsbeanspruchung der Schweißnähte zwischen Rohrschale und Flansch liegen auf der Hand.

Die **Vorspannverluste** in den Schrauben infolge wiederholter Belastung erreichten erst nach Entlastungen von sehr hohen Laststufen mit ca. 90% Streckgrenzenausnutzung im Span-

nungsquerschnitt eine signifikante Größenordnung (ca. 10%). Die zwischengeschalteten Schwelllastsequenzen hatten dabei keinen nennenswerten Einfluss.

Nach der Schwellbelastungsphase folgte der jeweils abschließende **Traglastversuch**. Alle vier Flanschstöße versagten durch Gewindeabstreifen der Schrauben auf der Rohrbiegezugseite. Ein eindeutiger systematischer Einfluss der Flanschimperfektion auf die Traglast war nicht erkennbar.

3 Numerische Untersuchungen

Für die vergleichende Nachrechnung der Rohrbiegeversuche wurde ein **FE-Modell** aufgebaut. Dabei wurde besondere Sorgfalt auf die Modellierung der zentralen Kontaktproblematik verwendet, und zwar nicht nur für den Kontakt zwischen den beiden Berührflächen der Flansche, sondern auch zwischen den Unterlegscheiben (die ihrerseits starr mit dem Schraubenkopf bzw. der Mutter verbunden waren) und den Flanschoberflächen. Die Schrauben und die Flansche wurden mit Volumenelementen, die angrenzenden Rohrschalen mit isoparametrischen 4-knotigen Schalenelementen aufgebaut. Der Gewindebereich der Schrauben wurde als glatter Zylinder mit dem rechnerischen Spannungsquerschnitt beschrieben. Die Diskretisierung wurde mit Hilfe von Konvergenzvergleichen optimiert. Durch Ausnutzung der Symmetrie zur Lastebene entstand ein Halbrohrmodell, in das das konstante Rohrbiegemoment M_R als cosinusförmig über dem Umfang verteilte axiale Randlast an den Enden der Versuchskörperrohre (beidseitig 1 m vom untersuchten Flanschstoß entfernt) eingeleitet wurde. Diese Vorgehensweise war durch Vergleich mit einer kompletten FE-Modellierung des Vierpunktversuches abgesichert worden. Als Werkstoffeigenschaften wurden die gemessenen nichtlinearen Arbeitslinien des Schrauben-, Flansch- und Rohrmaterials eingeführt. Die gemessenen Flanschimperfektionen wurden angenähert durch rotationssymmetrische oder umfangsbezogen sinus-/cosinusförmige Klaffungen bzw. durch geeignete Überlagerungen davon modelliert. Das numerische Aufbringen der Vorspannung erfolgte mit Hilfe von wechselseitig wirkenden Knotenkräften am Schraubengewindeteil und an der Mutter. Nach dem Vorspannen wurden die entsprechenden Stellen gekoppelt und die Vorspannknotenkräfte gelöscht.

Dieses FE-Modell wurde **anhand der experimentellen Ergebnisse validiert**. Bei der Vorspannphase wird für die beiden winkelklaffenden Flanschstöße numerisch ein vollständiges Schließen der Klaffung vorhergesagt, während im Versuch eine geringe Restklaffung verblieben war. Beim parallelklaffenden Flanschstoß ist die Übereinstimmung zwischen simuliertem und experimentellem Vorspannverhalten besser. Für die Schwellbelastungsphase werden die Funktionen sämtlicher gemessener Schraubendehnungen über dem aufgebrauchten Rohrbiegemoment bis weit in den plastischen Bereich hinein mit den FE-simulierten Funktionen verglichen. Mit Ausnahme einiger Dehnungen bei den beiden winkelklaffenden Flanschstößen – als Folge der kleinen Diskrepanz beim Vorspannverhalten – ist die Übereinstimmung gut bis sehr gut. Auch das nichtlineare Aufziehen wird für alle drei imperfekten Flanschstöße numerisch gut wiedergegeben, so dass insgesamt das FE-Modell als ausreichend validiert gelten kann. Ergänzend wurden die Schraubenschnittgrößen F_S und M_S (für die es keine direkt vergleichbaren Messergebnisse gibt) durch Integration der Element-Knotenkräfte über den Schraubenquerschnitt berechnet. Sie stimmen sowohl bei stetig ansteigender als auch bei wiederholter Rohrbiegebelastung qualitativ gut mit den Versuchsbeobachtungen überein.

Mit dem validierten FE-Modell wurde eine **numerische Parameterstudie** an zwei baupraktischen Ringflanschstößen aus dem Bereich der WEA-Türme durchgeführt. Die L-Flansche liegen innen, haben Durchmesser von 2,5 m und 3,5 m und sind mit 48xM30 bzw. 72xM36 vorgespannt. Beidseitig schließen 10 m lange Rohrschalen mit 10 bzw. 20 mm Wanddicke an. Um

trotz der größeren Anzahl der Schrauben deren Feinmodellierung beibehalten zu können, musste das Gesamtmodell auf ein 90°-Viertelrohrmodell reduziert werden; damit wird für den Fall einer Parallelklaffung mit größerer Erstreckungslänge (z.B. 90°) ein gewisser Fehler in Kauf genommen. Es wurden für beide Flanschstöße neben dem perfekten Referenzfall sieben bzw. acht Varianten durchgerechnet, vor allem parallelklaffende Flanschstöße mit unterschiedlichen Klaffungsmaßen zwischen 0,5 und 5 mm und Klaffungslängen von 45°, 60° und 90° des Umfangs im Rohrbiegebereich.

Der Vergleich der simulierten **Funktionen der Schraubennormalkraft- und Schraubenbiegespannungen** σ_m und σ_b im Spannungsquerschnitt über dem aufgetragenen Rohrbiegemoment M_R liefert klare Aussagen über den Einfluss der Flanschimperfektionen. Eine rohrseitige Winkelklaffung erweist sich selbst bei großem Klaffungsmaß als vergleichsweise unproblematisch (flanschseitige Winkelklaffungen wurden wegen ihrer erwiesenen günstigen Wirkung nicht in die Parameterstudie einbezogen.) Kritisch sind nur rohrseitige Teilbereichsklaffungen. Dabei ist die umfangsbezogene Erstreckungslänge neben dem Klaffungsmaß der zweite entscheidende Parameter: Je kürzer die Klaffung bei gleichem Klaffungsmaß, desto ungünstiger die Auswirkung.

Als weiteres Vergleichskriterium wurden für beide Flanschstöße für alle berechneten Varianten die **Ermüdungs-Schädigungssummen** der höchstbeanspruchten Schraube nach PALM-GREN/MINER berechnet. Dabei wurden zwei typische Rainflow-Matrizen für das Turmbiegemoment einer küstennahen und einer im Binnenland stehenden WEA zugrunde gelegt. Alternativ wurden jeweils die Schwingbreiten nur der Normalkraftspannung und der Summe aus Normalkraft- und Biegespannung im Spannungsquerschnitt berücksichtigt. Mit Hilfe der Schädigungssummen lassen sich die durch Vergleich der Schraubenbeanspruchungsfunktionen qualitativ gewonnenen Einsichten über den Einfluss der Imperfektionen quantifizieren. Ferner wird auch der Einfluss der Schraubenbiegung sichtbar, und die Leistungsfähigkeit vereinfachter Berechnungsmodelle kann überprüft werden.

4 Schlussfolgerungen für die Bemessungspraxis

Es wurden eine Reihe **unmittelbarer Erkenntnisse** aus den Untersuchungen zusammengestellt. Sie betreffen u.a. die permanente Schraubenbiegebeanspruchung nach dem Vorspannen, das komplexe innere Kräftespiel im Flanschstoß und in der angrenzenden Rohrschale bei rohrseitiger Teilbereichsklaffung, den nicht vorhandenen Einfluss der Flanschimperfektionen auf die Traglast des vorgespannten Stoßes und die Vorspannverluste infolge Mikroplastizierungen im Gewinde nach hohen Belastungen.

Für den konkreten **Ermüdungssicherheitsnachweis der Schrauben** werden Empfehlungen gegeben. Wichtigste Empfehlung ist, keinesfalls den Nachweis auf der Grundlage einer FE-Simulation des perfekten Flanschstoßes zu führen. Wenn eine genaue FE-Berechnung zugrunde gelegt werden soll, müssen Mindest-Imperfektionen eingebaut werden, die dann bei der Ausführung als Herstelltoleranzen beachtet werden; und es muss die Schraubenbiegung berücksichtigt werden. Das einfache Ingenieurmodell von PETERSEN erweist sich als gute Näherung zur impliziten Abdeckung der Schraubenbiegung und gewisser kleiner Flanschimperfektionen.

Aus diesen Erkenntnissen werden Vorschläge für **Herstelltoleranzen für Flanschstöße** entwickelt. Sie sind für Winkelklaffungen vergleichsweise großzügig, grenzen dagegen rohrseitige Teilbereichsklaffungen in Abhängigkeit von der umfangsbezogenen Erstreckungslänge relativ eng ein. Einige allgemeine Gedanken zur Sanierung imperfekter Flanschstöße schließen den Forschungsbericht ab.