

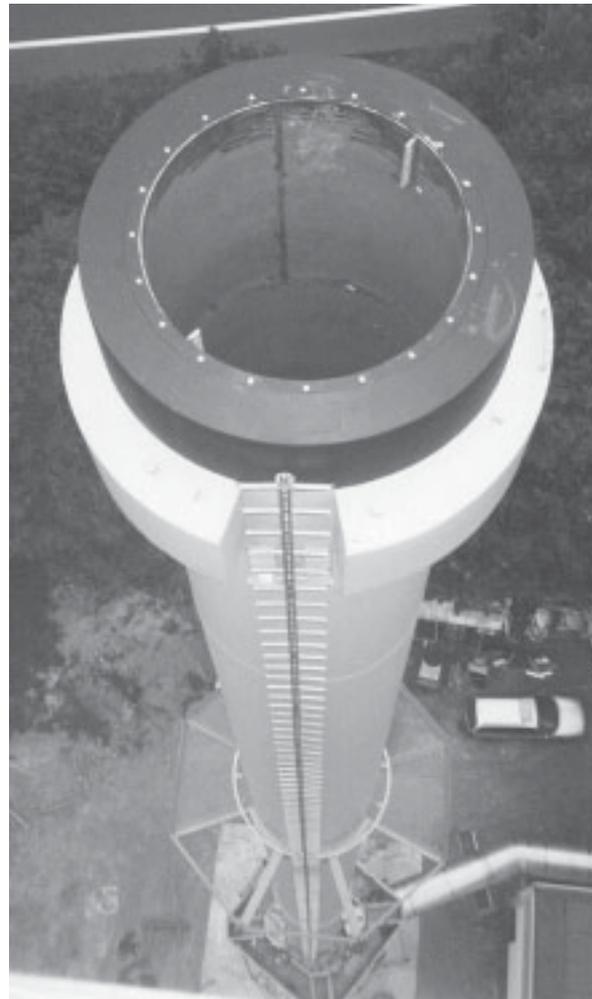
1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Montagestöße von turmartigen, kreiszylindrischen oder konischen Stahlbauten werden häufig als planmäßig vorgespannte geschraubte Ringflanschverbindungen ausgebildet. Neben den Tragrohren von Schornsteinen (Bild 1.1b) und Mastkonstruktionen finden diese Ringflanschstöße insbesondere in Rohrtürmen von Windenergieanlagen (WEA) häufige Anwendung (Bild 1.1a). Die Ringflansche sind meist einseitig als Flansche mit L-förmigem Querschnitt angeordnet, z.B. bei Windenergietürmen innenliegend (Bild 1.2a) oder bei Schornsteinen außenliegend (Bild 1.2b). Im Turmfußbereich kommen vermehrt auch Flansche mit T-förmiger Querschnittsgeometrie, d.h. mit beidseitig des Rohrmantels angeordneten Schraubenkreisen, zum Einsatz. Bemessungskritisches Element dieser Stöße sind in der Regel die Schrauben.



a)



b)

Bild 1.1 (a) Windenergieanlage, (b) Schornstein

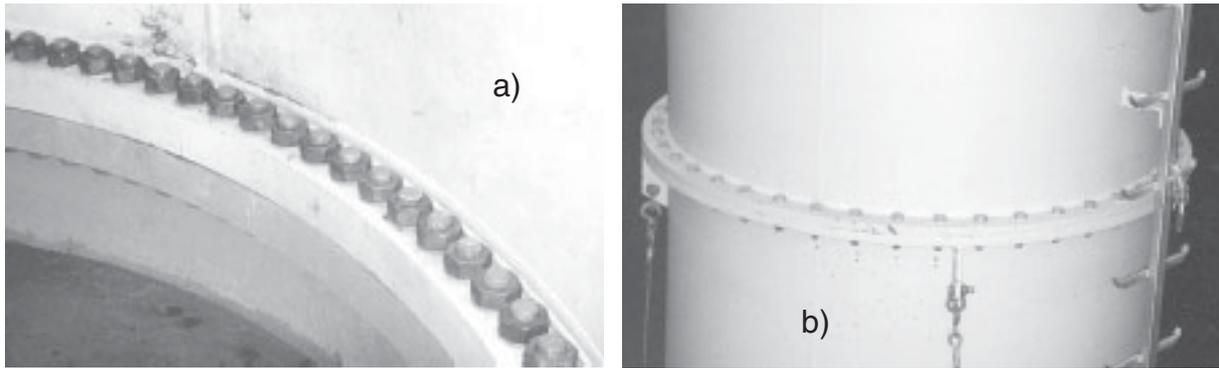


Bild 1.2 (a) innenliegender L-Ringflanschstoß am WEA-Turmfuß,
(b) außenliegender L-Ringflanschstoß in ca. 24m Schornsteinhöhe

Die „Beanspruchungsfunktion“ der Schraubenkraft F_S in Abhängigkeit vom Turmrohrbiegemoment M_R weist auf der Rohrbiegezugseite einen nichtlinearen Verlauf auf (Bild 1.3b), der prinzipiell in vier Abschnitte unterteilt werden kann: Abschnitt 1 beschreibt den voll vorgespannten Zustand; die gesamte Kontaktfläche weist Druckspannungen auf, die bei wachsendem Rohrbiegemoment abgebaut werden. Bei weiter steigendem Rohrbiegemoment beginnt der Flanschstoß vom Rohrmantelbereich her sukzessive aufzuklaffen (Abschnitt 2). Die verbleibende resultierende Druckkontaktkraft wandert in Richtung der Flanschseite (L-Stoß) bzw. Flanschanten (T-Stoß), bis theoretisch reines „Kantentragen“ einsetzt oder die Flansche gar keinen Kontakt mehr aufweisen. Die Beanspruchungsfunktion verläuft hierbei mit praktisch linearer Steigung (Abschnitt 3). Schließlich setzen im Abschnitt 4 plastische

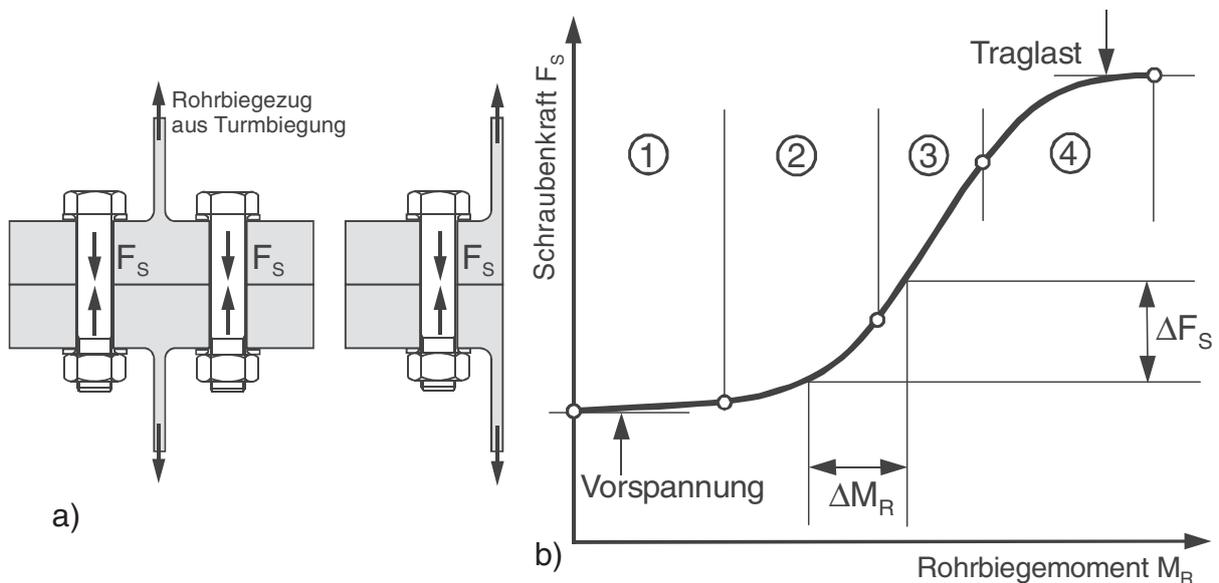


Bild 1.3 Schraubenkraft-Rohrbiegemoment-Funktion in einem vorgespannten Flanschstoß (schematisch)

Verformungen ein, und der Flanschstoß erreicht seine Traglast. Bei einer dynamischen Beanspruchung in Form einer Rohrbiegemomentenschwingbreite ΔM_R ergibt sich in Abhängigkeit vom Funktionsverlauf die ermüdungswirksame Schwingbreite der Schraubenkraft ΔF_S .

Während bei Tragrohren von Schornsteinen und Masten deren dynamische Belastung im wesentlichen von winderregten Schwingungen verursacht wird, tritt bei WEA-Türmen aufgrund des Anlagenbetriebs eine noch weit intensivere Ermüdungsbeanspruchung auf. Ihre Ringflanschstöße werden demnach bemessungstechnisch hochgradig ausgenutzt, d.h. die Tragreserven werden voll ausgeschöpft.

1.2 Problemstellung

Die Erfassung der Schraubenbeanspruchungsfunktion bei perfekter Flanschgeometrie, d.h. bei zwei ideal planebenen Flanschkontaktflächen im Montagezustand, planparallelen Flanschoberflächen sowie idealer Schraubengeometrie, war bereits Gegenstand zahlreicher experimenteller und theoretischer Untersuchungen, wie in den Unterkap.2.3 und 2.4 ausgeführt. Insbesondere die bisher verwendeten Berechnungsmodelle wurden auf der Basis perfekter Flanschstöße entwickelt. Die Schraubenbeanspruchungsfunktion und damit die ermüdungsrelevanten Schwingbreiten der Schrauben sind aber wegen des komplex nichtlinearen inneren Kräftespiels sensibel gegenüber Abweichungen von der perfekten Struktur. Solche „geometrischen Imperfektionen“ in Form von Flanschklaffungen vor dem Vorspannen sind bei großen Zylinderdurchmessern baupraktisch unvermeidbar. Es fehlen bisher ausreichend gesicherte Kenntnisse zur quantitativen Bewertung des Einflusses dieser Imperfektionen auf die Ermüdungssicherheit der Schrauben. Es ist jedoch offensichtlich, dass bei zahlreichen WEA-Türmen diese Imperfektionsproblematik, die eine deutliche Reduktion der Lebensdauer gegenüber dem planmäßigen Wert von 20 Jahren zur Folge hat, vorliegt (siehe Abs.2.2.2).

Diese Einflüsse könnten mittels umfassender Ermüdungsversuche an kompletten Ringflanschstößen erforscht werden. Solche Versuche sind jedoch bei einer den baupraktischen Abmessungen vergleichbaren Dimensionierung mit den variierenden Imperfektionsformen und Klaffungswerten kostenmäßig kaum realisierbar. Stattdessen soll in dieser Arbeit ein experimentell validiertes numerisches Simulationsmodell entwickelt werden, mit dem die angesprochenen Parameter variiert und ihre Einflüsse auf das innere Kräftespiel der Flanschstöße erforscht werden können. Die Ergebnisse sollen dann, so weit möglich, in praktische Empfehlungen zur ermüdungssicheren Bemessung umgesetzt werden.

1.3 Zusammenfassender Überblick

Die Struktur dieser Arbeit folgt der Reihenfolge Grundlagen, experimentelle Untersuchungen, numerische Simulationen und weiterführende Betrachtungen. Demnach wird in **Kapitel 2** zunächst ein zusammenfassender Überblick über den derzeitigen Wissensstand hinsichtlich der Herstellung von Rohrtürmen und Ringflanschen gegeben. Die Bemessungsgrundlagen zum Nachweis der Tragsicherheit und der Ermüdungssicherheit der Schrauben werden eingehend erläutert, ebenso wie die bisher veröffentlichten experimentellen und theoretischen Untersuchungen zu dieser Thematik.

Kapitel 3 befasst sich mit den eigenen experimentellen Untersuchungen an geometrisch perfekten Einschrauben-Flanschsegmenten, die als Vorversuche insbesondere zur Erprobung der Dehnungsmessung an den Schrauben und zur Ermittlung der Vorspannverluste unter wiederholter Be- und Entlastung dienten. Sie bilden einen Teil der Grundlagen für die den Kern dieser Arbeit darstellenden großmaßstäblichen Rohrbiegeversuche.

Die vom Verfasser durchgeführten großmaßstäblichen Rohrbiegeversuche an insgesamt sechs Prüfkörpern mit variierten, planmäßig eingebauten, elementaren Imperfektionen werden in **Kapitel 4** detailliert beschrieben. Der Versuchsablauf wurde unterteilt in Vorspannphase, Belastungsphase mit wiederholten Be- und Entlastungen und abschließenden Traglastversuch. Die umfangreiche Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse bilden einen Hauptteil dieses Kapitels. Sie liefern u.a. die Beanspruchungen der Schrauben und der Rohrschale in Abhängigkeit von der jeweiligen Imperfektionsform.

Zur vergleichenden numerischen Simulation der Rohrbiegeversuche wird in **Kapitel 5** ein zur Lasteinleitungsebene symmetrisch aufgebautes FE-Modell des gesamten Ringflanschstoßes mit angrenzenden Rohrschalen aufgebaut und auf Basis der Versuchsergebnisse validiert. Um der zentralen Kontaktproblematik Rechnung zu tragen, werden Kontaktelemente implementiert. Die Werkstoffeigenschaften entsprechen den aus den Materialzugversuchen gewonnenen Kennwerten. Die Ergebnisse der kontakt- und materialspezifisch nichtlinearen Berechnung können direkt mit den Versuchsergebnissen verglichen werden.

Zur weiterführenden Untersuchung des Imperfektionseinflusses auf die Beanspruchung der Schrauben und Rohrschalen werden in **Kapitel 6** umfangreiche Parameterstudien mit dem validierten FE-Modell an Flanschstoßen mit baupraktischen Abmessungen durchgeführt. Auf Basis der berechneten Schraubenbeanspruchungen und von typischen Rainflowmatrizen der Turmrohrbiegemomente zweier unter-

schiedlicher Windenergieanlagen werden Ermüdungsschädigungsberechnungen durchgeführt. Sie dienen dazu, die Parameter Klaffungsgröße und Imperfektionsform quantitativ zu beurteilen.

Um die rechenzeitintensiven Simulationen mit dem validierten FE-Modell der gesamten Ringflansch-Rohrschale-Struktur zu vermeiden, wird in **Kapitel 7** ein Weg aufgezeigt, wie das Berechnungsmodell auf ein äquivalentes FE-Segmentmodell reduziert werden kann. Dazu werden numerisch und analytisch die linear-elastischen, rotationssymmetrischen und nicht-rotationssymmetrischen Verformungscharakteristika der Ringflanschkonstruktionen aufgearbeitet. Die Ergebnisse dienen zur Definition linearer Ersatzfedersteifigkeiten, mit denen am reduzierten FE-Segmentmodell die dreidimensionale Tragwirkung der Ringflansch-Rohrschale-Struktur näherungsweise erfasst werden kann. Die hiermit ermittelten Schraubenbeanspruchungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des kompletten FE-Modells. Um darüber hinaus ein noch einfacheres Verfahren zur näherungsweisen Bestimmung der Schraubenbeanspruchung unter Imperfektionseinfluss zur Verfügung stellen zu können, wird das vereinfachte Berechnungsmodell nach VDI-Ri2230 unter Verwendung der Ersatzfedersteifigkeiten derart modifiziert, dass eine ausreichend gute Annäherung an die reale Schraubenkraftfunktion erzielt wird.

In **Kapitel 8** werden Überlegungen zur baupraktischen Umsetzung der Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen angestellt. Hierzu werden die einschlägigen vereinfachten praktischen Berechnungsmodelle anhand der Versuchsergebnisse und der numerischen Ergebnisse der Parameterstudie in Kap.6 überprüft und Aussagen zu deren Gültigkeit bei imperfekten Ringflanschstößen getroffen. Darüber hinaus werden Empfehlungen für die Vorgehensweise beim Nachweis der Ermüdungssicherheit und zur kostengünstigen Klaffungssanierung mit Hilfe von Futterblechen gegeben.