
Strukturierte Zusammenfassung der Dissertation

Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von Verbindungen mit Schließringbolzen ohne Abrisstiel unter Berücksichtigung von Biegeeinflüssen

vorgelegt von

M.Sc. Mathias Schwarz

Einleitung

In vielen Produktionsabläufen ist das Fügen von Bauteilen sowie Baugruppen ein entscheidender Bearbeitungsschritt, der die Funktionalität und vor allem die Qualität des Endprodukts beeinflusst. Dementsprechend ist die Auswahl geeigneter Fügeverfahren von entscheidender Bedeutung. Hier gilt es, eine Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen, die die Qualität und die Wirtschaftlichkeit des Fügeverfahrens beeinflussen. Dazu zählen u. a. die Prozess- und Taktzeiten, die Prozessstabilität, die Vor- und Nachbereitungsschritte sowie die notwendigen Maßnahmen zur Qualitätssicherung. Ebenso der Bedarf an Zeit, Personal, Kompetenz und Investitionen für die Einführung eines Fügeverfahrens ist nicht zu vernachlässigen. Schrauben- und Schweißverbindungen stellen für die Einsatzpraxis im Stahl- und Maschinenbau nach wie vor die Fügetechnologie mit der größten Bedeutung dar. Aufgrund der Vorteile einer Verschraubung, wie die Anwendung endbeschichteter Bauteile, die Lösbarkeit etc. wird im Maschinenbau (z. B. Schienen- und Nutzfahrzeugbau) die Schraube-Mutter-Verbindung präferiert. Weiterhin ist das Verschrauben aufgrund des hohen Vorfertigungsgrades von Stahlbaukonstruktionen für die Baustellenmontage noch immer das dominierende Verfahren. Obwohl mit dieser etablierten Fügetechnologie qualitativ hochwertige Verbindungen realisiert werden können, ist deren Einsatz mit einigen signifikanten Nachteilen verbunden. Schraubenverbindungen (SV) neigen z. B. unter Betriebsbeanspruchung aufgrund verschiedener Ursachen zum Vorspannkraftverlust. Eine gewisse Montageunsicherheit beim drehmomentgesteuerten Anziehen kann zu einer unzureichenden Schraubenvorspannung führen. Setzungerscheinungen im Schraubengewinde und das zeitliche sukzessive Losdrehen der Schraube unter zyklischer Beanspruchung durch Relativbewegungen zwischen den Kontaktflächen bzw. durch „Atmen“ des Muttergewindes bei Axialkraftbeanspruchung erfordern i. d. R. Inspektionsintervalle bei geschraubten Verbindungen. Häufig führen diese Umstände allmählich zum Tragfähigkeitsverlust. Für Stahlbauten mit einem großen Anteil an Schwingbelastung, z. B. Türme für Windenergieanlagen (WEA) in Stahlbauweise, wird eine regelmäßige Inspektion der Schraubenvor-

spannkraft normativ vereinbart. So muss z. B. innerhalb des ersten halben Jahres nach der Errichtung der WEA und der Montage der SV eine Überprüfung der Schraubenvorspannkraft erfolgen. Anschließend muss diese in regelmäßigen Zeitintervallen einer Sicht- und Lockerungskontrolle unterzogen werden. Eine Alternative zu den klassischen SV bietet die Schließringbolzentechnologie. Sie gewinnt immer mehr an Bedeutung im modernen Stahl-, Verbund- und Maschinenbau. Aufgrund der günstigeren Kerbwirkung durch eine „weichere“ Rillengeometrie, dem damit verbundenen größeren Spannungsquerschnitt bei gleichem Nenndurchmesser und den geringeren Streuungen der eingebrachten Montagevorspannkraft wurde das Potential zur Tragfähigkeitssteigerung im Vergleich zur klassischen SV in früheren Arbeiten aufgezeigt. Damit verbunden sind Kosteneinsparungen durch konstruktive Anpassungen. Dazu zählen eine Verringerung der erforderlichen Nenndurchmesser und die damit einhergehende Reduzierung der Bauteilabmessungen. Darüber hinaus sind Einsparungen in der Fertigung und Montage sowie Kostenreduzierungen für Wartung und Unterhaltung von Konstruktionen im Stahl- und Maschinenbau möglich. Anwendungen finden SRB-Systeme in verschiedensten Bereichen des Stahl- und Maschinenbaus. Neben dem Einsatz in WEA werden SRB-Systeme z. B. in Unterkonstruktionen von Sonnenkraftwerken, Sattelkupplungen von Lastkraftwagen sowie Drehgestelllaufwerken von Schienenfahrzeugen eingesetzt.

Ausgangssituation und Motivation

Die Bemessung von SRB-Verbindungen kann auf Basis des DVS/EFB Merkblattes 3435-2 i. A. an die DIN EN 1993-1-8 und -9 (Eurocode 3) sowie an die Richtlinie VDI 2230 – Blatt 1 erfolgen. In diesem Merkblatt sind jedoch lediglich Rechenregeln für rein axialkraftbeanspruchten oder rein querkraftbeanspruchten Verbindungen mit SRB-Systemen enthalten. Für die heutige Windenergietechnik gilt, dass ab einer Nabenhöhe von 100 Metern die Windernte mit jedem Meter um 0,5 – 1 % steigt. Dementsprechend werden seitens der Anlagenhersteller Anstrengungen unternommen Türme mit großen Nabenhöhen (> 140 m) vor allem für Schwachwindstandorte wirtschaftlich zu bemessen, zu errichten und zu betreiben. Die Vergrößerung der Nabenhöhe eines Turms hat zur Folge, dass höhere Extrem- und Betriebslasten auf die Bauteile mit ihren unterschiedlichen Konstruktionsdetails (u. a. Verbindungselemente, Flanschbleche) einwirken und diese den Stand halten müssen. Neben klassischen Stahlrohrtürmen stellen aufgespreizte Turmkonstruktionen, wie z. B. Gittermasttürme, Hybridtürme oder längsgeteilte Stahlsegmenttürme, eine technische Alternative dar. Der Einsatz von SRB-Systemen ist an die bauaufsichtliche Verwendbarkeit geknüpft. Die im DVS/EFB Merkblatt 3435-2 bereitgestellten Bemessungsregeln greifen die Vorgehensweise nach dem Eurocode 3

auf. Die in diesen Anwendungen gezeigten Anschlüsse sind hauptsächlich auf Querkraft beansprucht. Nichtsdestotrotz kommen neben diesen aufgeführten alternativen Turmkonzepten immer noch die klassischen Stahlrohrtürme zum Einsatz. Hier werden die einzelnen Turmsektionen mithilfe von Ringflanschen (L-Flansch) und hochfesten Stahlbauschrauben System HV (Schraube/Mutter EN 14399-4-HV bzw. DASt-Richtlinie 021) im On- und Offshore-Bereich kraftschlüssig verbunden. Eine Vielzahl der in der Praxis auftretenden Anwendungsfälle lassen sich nicht den Grundfällen reine Axialkraft (zentrisch) oder reine Querkraft zuordnen, sondern sind durch exzentrische Axialkraft beansprucht. In der Regel wird das mechanische Fügeelement konstruktionsbedingt einer Exzentrizität ausgesetzt. Neben der Zugbeanspruchung wird das Fügeelement dabei zusätzlicher Biegebeanspruchung ausgesetzt. Der Einsatz von exzentrisch beanspruchten Verbindungen mit SRB-Systemen in tragenden und damit oft sicherheitsrelevanten Strukturen stellt Konstruktions- und Berechnungsingenieure bis heute vor Herausforderungen. Es fehlt an analytischen Bemessungsregeln und numerischen Modellen zur sicheren Auslegung exzentrisch beanspruchter SRB-Systeme. Für den Verfasser stellt sich die Frage, wie eine Weiterentwicklung der Berechnungsregeln bei exzentrischer Belastung erfolgen kann, die den geforderten Sicherheitsaspekten Rechnung trägt. Weiterhin unbefriedigend sind die Erkenntnisse zu Größen- und Randschichteinflüssen auf die Dauerhaltbarkeit von SRB-Systemen.

Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit leitet sich in erster Linie daraus ab, die Bemessungsregeln für die SRB-Technologie weiter zu entwickeln. Neben der Beurteilung der Schwingfestigkeit unter zentrischer Beanspruchung soll insbesondere die bei exzentrischem Lastangriff sowohl analytisch als auch mithilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) sicher zu bestimmen sein. Aus Sicht des Verfassers sind systematisch experimentelle und numerische Untersuchungen zur Charakterisierung des Tragverhaltens unter zügiger und zyklischer Belastung unumgänglich. Nur auf dieser Basis kann der Einfluss der Exzentrizität und die damit verbundene zusätzliche Biegebeanspruchung auf das SRB-System beurteilt werden. Der Zusammenhang zwischen äußerer Belastung am Bauteilflansch und innerer Beanspruchung des Verbindungselementes auf Normalspannung infolge Zugkraft und Biegemoment muss betrachtet werden. Die Charakterisierung der SRB-Kraft- und der SRB-Biegemomenten-Funktion sowie dem Verhältnis von SRB-Normal- zur Biegespannung soll anhand der für wichtig erachteten Einflussgrößen abgeleitet werden. Der Verfasser beschreitet hierbei den Weg vergleichende Untersuchungen mit klassischen Schrauben anzustellen. Damit lassen sich Diskrepanzen und Analogien zu praxisrelevanten Stahl- und Maschinenbauschrauben herausstellen. Auf Grundlage der aus den experimentellen

und numerischen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse sollen gezielt Bemessungsansätze i. A. an den Eurocode 3 (Normreihe EN 1993) und die VDI Richtlinie 2230 – Blatt 1 abgeleitet werden. Diese Ansätze sollen den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) und der Ermüdungsfestigkeit (FLS) für stahlbauliche Anwendungen und den Nachweis der Dauerfestigkeit für maschinenbauliche Anwendungen unter Einwirkung einer exzentrischen Zugkraft ermöglichen. Hierbei muss die Kenntnis über den maßgebenden Versagensmodus vorliegen. Gegenstand der Untersuchungen dieser Arbeit sind SRB-Systeme aus Kohlenstoffstahl der Nenndurchmesser M16, M20 und M36. Die Erkenntnisse dieser Arbeit sollen in Form eines Bemessungsvorschlags zur Aufnahme in das DVS/EFB Merkblatt 3435-2 aufbereitet werden. Neben den Untersuchungen zum exzentrischen Tragverhalten wird mit dieser Arbeit das Ziel verfolgt eine systematische Beurteilung der Schwingfestigkeit von SRB-Systemen unter Berücksichtigung von möglichen Größen- und Randschichteinflüssen anhand experimenteller Untersuchungen zu ermöglichen. Mithilfe dieser zusätzlichen Erkenntnisse soll der Kerbfallkatalog des DVS/EFB Merkblattes 3435-2 bis einschließlich des Nenndurchmessers M36 erweitert und bislang ausstehende Aussagen über den Einfluss typischer Beschichtungssysteme für SRB-Systeme für stahl- und maschinenbautypische Anwendungen dargelegt werden.

Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen hauptsächlich an exzentrisch axialkraftbeanspruchten SRB-Systemen angestrengt und bewertet. Hintergrund dieser Untersuchungen war die Ableitung eines Bemessungsansatzes, welcher einen Nachweis für SRB-Systeme im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) sowie im Grenzzustand der Ermüdung (FLS), wie es bereits für SV Stand der Technik ist, ermöglicht. Die Bemessungskonzepte für SV i. V. m. der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen, der DIN 18088-3 und der IEC 61400-6 für stahlbautypische Anwendungen sowie i. V. m. der VDI 2230 – Blatt 1 für maschinenbauliche Anwendungen dienten bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen als Grundlage. Der erarbeitete Bemessungsansatz erweitert den bestehenden Anwendungsbereich des DVS / EFB Merkblattes 3435-2 für den Stahl- und Maschinenbau. Außerdem stellt der Ansatz potentiellen Anwendern der SRB-Technologie Bemessungsregeln für vorwiegend ruhende bzw. statisch zugbeanspruchte SRB-Verbindungen sowie für nicht vorwiegend ruhende bzw. schwingend zugbeanspruchte SRB-Verbindungen im Sinne der DIN EN 1993-1-8 und -9 sowie der VDI 2230 – Blatt 1 unter der Berücksichtigung von Biegeinflüssen zur Verfügung.

Die in der Ausgangssituation und Motivation vorgestellten Entwicklungsdefizite konnten größtenteils ausgeräumt werden. Die wesentlichen Ergebnisse sowie Erkenntnisse dieser Arbeit werden nachfolgend zusammengefasst:

1. Für die SRB-Systeme (Typ C) des Nenndurchmesserbereiches $M12 \leq d \leq M36$ wurde ein Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C = 71 \text{ N/mm}^2$ (Kerbfallklasse 71) gefunden. Dementsprechend kann für diesen Durchmesserbereich kein Größeneinfluss ausgemacht werden. Die genannte Kerbfallklasse dient als Ergänzung bzw. Erweiterung für die Ausführungen im DVS/EFB Merkblatt 3435-2 i. V. m. der DIN EN 1993-1-9. Gleichzeitig wird für maschinenbauliche Anwendungen von SRB-Systemen (Typ C) eine Anpassung der Spannungsamplitude der Dauerhaltbarkeit $\sigma_A = 35,5 \text{ N/mm}^2$ für den Nenndurchmesserbereich $M12 < d \leq M36$ empfohlen.
2. Weiterhin wird auf Basis der geprüften Versuchsumfänge ein negativer Randschichteinfluss für feuer- und sherard-verzinkte SRB-Systeme ermittelt. Dementsprechend wird für diese Beschichtungssysteme eine Abminderung des jeweiligen Bezugswertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ um den Faktor k_G vorgeschlagen. Auch für den Bereich Maschinenbau erfolgt eine Reduzierung der Spannungsamplitude der Dauerhaltbarkeit bei Verwendung von feuer- oder sherardverzinkten SRB-Systemen (Typ C) um den Faktor k_G .
3. Auf Basis quasi-statischer Zugversuche an vorgespannten SRB-Systemen (Typ C) in L-flanschverbindungen unter Berücksichtigung von Biegeinflüssen wurde ein Versagen durch Abstreifen des SR festgestellt. Als charakteristisches Versagensbild bei zyklisch beanspruchten SRB-Systemen (Typ C) unter der Berücksichtigung von Biegeinflüssen wurde grundsätzlich der Bruch im ersten tragenden Rillengang beobachtet.
 - a. Eine Übertragung der Bemessungsregeln für die SV im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) nach DIN 18088-3 bzw. IEC 61400-6 auf SRB-Systeme (Typ C) in Form der plastischen Tragfähigkeiten ist praktikabel und wird empfohlen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die rechnerische Ermittlung der plastischen Tragfähigkeit des SRB-Systems $F_{t,Rd}$ die aus dem DVS/EFB Merkblatt 3435-2 bekannten Zusammenhänge anzuwenden sind. Außerdem ist zu beachten, dass die Bemessungsregeln für die in den Normen DIN 18088-3 bzw. IEC 61400-6 vorgegebenen Geometrieverhältnissen gelten.
 - b. Eine Übertragung der Bemessungsregeln für SV im Grenzzustand der Ermüdung (FLS) nach DIN 18088-3 bzw. IEC 61400-6 auf SRB-Systeme (Typ C) ist praktikabel und wird ebenfalls empfohlen. In diesem Zusammenhang konnte sowohl mit

experimentellen als auch numerischen Untersuchungen nachgewiesen werden, dass der trilineare Ansatz nach SCHMIDT/NEUPER die SRB-Kraftfunktion $F_S = f(Z)$ unter gewissen Voraussetzungen hinreichend charakterisiert. So sind die SRB-Nachgiebigkeit δ_{SRB} entweder mithilfe des DVS/EFB Merkblattes 3435-2 analytisch oder mithilfe des parametrisierten Modells numerisch zu ermitteln, um die jeweiligen SRB-Kraftfunktionen $F_S = f(Z)$ auf der Beanspruchungsseite ohne Berücksichtigung von Biegeeinflüssen bestimmen zu können.

- c. Der Ermüdungsnachweis nach Verfahren 1 für SV kann auf SRB-Systeme (Typ C) übertragen werden. Auf der Beanspruchungsseite wird zunächst auf Grundlage des trilinearen Modells nach SCHMIDT/NEUPER die SRB-Kraftfunktion $F_S = f(Z)$ analytisch bestimmt. Die dafür notwendige SRB-Nachgiebigkeit δ_{SRB} wird entweder analytisch oder numerisch bestimmt. Die Vorspannkraft $F_{p,C,SRB}$ wird entweder mithilfe des DSV/EFB Merkblattes 3435-2 allgemeingültig bestimmt oder systemspezifisch einer allgemeingültigen bauaufsichtlichen Zulassung entnommen. Auf der Beanspruchbarkeitsseite wird die experimentell ermittelte Kerbfallklasse 40* mit dem Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C = 45 \text{ N/mm}^2$ vorgeschlagen. Der Kerbfall berücksichtigt für SRB-Systeme (Typ C) den zusätzlichen Biegeeinfluss bei außermittigem Lastangriff.
4. Mithilfe der Vorgaben und den Modellklassen I bis IV von SV nach VDI 2230 – Blatt 2 konnte ein parametrisiertes FE-Modell für SRB-Systeme (Typ C) in L-Flanschverbindungen generiert werden, welches es dem Konstruktions- und Berechnungsingenieur ermöglicht, sekundäre Biegespannungen numerisch zu ermitteln.
 - a. Der Ermüdungsnachweis für exzentrisch beanspruchte SRB-Systeme (Typ C) kann demzufolge nach Verfahren 2 von SV auf SRB-Systeme (Typ C) übertragen werden. Auf Basis des parametrisierten L-Flanschmodells ist es möglich numerisch die jeweilige SRB-Kraftfunktion $F_S = f(Z)$ sowie SRB-Biegemomentfunktion $M_S = f(Z)$ zu ermitteln. Damit wird mithilfe der numerisch bestimmten Belastungsfunktionen der Biegeeinfluss auf der Seite der SRB-Beanspruchung berücksichtigt. Abschließend kann der Ermüdungsnachweis gegen die experimentell abgeleitete Kerbfallklasse 71 (unter Berücksichtigung von Randschichteinflusses) geführt werden.
5. Es konnte eine Methode auf Grundlage der Schwingfestigkeitsuntersuchungen an exzentrisch beanspruchten SRB-Systemen zur Bestimmung einer Spannungsamplitude der Dau-

erhaltbarkeit $\sigma_{A,\text{exzentrisch}}$ entwickelt werden, die eine dauerfeste Auslegung von SRB-Systemen i. V. mit dem DVS/EFB Merkblatt 3435-2 i. A. an VDI 2230 – Blatt 1 vorschlägt. Diesbezüglich ist zunächst mithilfe des parametrisierten FE-Modells die Dauerschwingbeanspruchung des SRB-Systems σ_{ab} bei exzentrischer Verspannung und Belastung numerisch abzuleiten. Im Anschluss wird der Nachweis der Schwingfestigkeit gegen die Spannungsamplitude der Dauerhaltbarkeit $\sigma_{A,\text{exzentrisch}} = 22,5 \text{ N/mm}^2$ für SRB-Systeme (Typ C) des Nenndurchmesserbereiches $M12 \leq d \leq M36$ geführt.