

Strukturierte Zusammenfassung der Dissertation

Zum Vorspannkraft-Zeit-Verhalten gleitfest vorgespannter Verbindungen im Stahlbau unter zyklischer Belastung sowie der Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Maik Dörre

Einleitung

Branchenübergreifend stellt die Fügetechnik einen essentiellen Fertigungsschritt zur Herstellung des Endproduktes dar, da dieser Teilprozess die Qualität und Wirtschaftlichkeit nachhaltig beeinflusst. Dementsprechend umfangreich ist die Anforderungsliste, die an die Fügeverfahren gestellt wird und je nach Branche differieren kann. Im Stahlbau sind vor allem die Schweiß- und Schraubtechnik als dominierende Fügetechnologien zu betiteln. Dabei stellen vor allem die Wirtschaftlichkeit, der Vorbereitungsaufwand, die Zugänglichkeit, der Qualifikationsbedarf des Personals und der Korrosionsschutz branchenspezifische Anforderungen dar. Im Stahlbau werden geschraubte Verbindungen aufgrund ihrer Lösbarkeit, des geringen Qualifikationsbedarfs und des hohen Vorfertigungsgrades (Verbinden endbeschichteter Bauteile) daher vornehmlich bei Baustellenmontagen eingesetzt. Die Schraubverbindungen werden im Stahlbau nach DIN EN 1993-1-8 weiterführend in Kategorien eingeteilt, welche hinsichtlich der Hauptbeanspruchungsrichtung sowie in vorgespannte und nicht vorgespannte Verbindungen untergliedert werden. Vorgespannte Verbindungen sind erforderlich, wenn die Konstruktion „nicht vorwiegend ruhenden“ Belastungen ausgesetzt ist. Eine spezielle Ausführungsform der vorgespannten Verbindungen stellt die sog. gleitfest vorgespannte Verbindung (GV-Verbindung) dar, die im Maschinenbau den Regelfall darstellt. Aufgrund ihrer kraft-/reibschlüssigen Kraftübertragung wird die GV-Verbindung immer dann eingesetzt, wenn Schlupf und Verformung in den geschraubten Anschlüssen minimiert werden müssen. Durch die reibschlüssig-flächenförmige Kraftübertragung kann außerdem das Auftreten höherer Kerbspannungen in den Bauteilen verhindert werden, sodass bei ermüdungsbeanspruchten Verbindungen unterhalb der Gebrauchslast nahezu die Ermüdungsfestigkeit des ungelochten Grundwerkstoffes erreicht wird.

Ausgangssituation und Motivation

Zur Gewährleistung der Tragsicherheit bzw. Gebrauchstauglichkeit einer GV-Verbindung muss nach DIN EN 1090-2 ein definierter Anziehprozess ausgeführt werden und eine unter Umständen aufwendige Reibflächenvorbehandlung erfolgen. Dies stellt gegenüber den nicht vorgespannten Verbindungen einen erheblichen Mehraufwand dar. Dennoch sind diese Prozesse notwendig, um ein Mindestniveau der Vorspannkraft sowie eine definierte Haftreibungszahl vorzusehen und somit die Tragfähigkeit der Verbindung zu garantieren. Welchen Einfluss baustellenbedingte Umgebungseinflüsse, wie Beschädigungen und Bewitterung der Reiboberflächen, auf die Tragfähigkeit der Verbindung haben, ist dennoch weitestgehend ungeklärt. Weiterführend geht der Erhalt der Funktionsfähigkeit einer GV-Verbindung mit dem Erhalt der Vorspannkraft über die geplante Lebensdauer einher, welcher in den meisten Fällen mit regelmäßigem Wartungsaufwand verbunden ist. Das Nachspannen der Garnituren ist in den meisten Fällen die bevorzugte Methode, um das Mindestvorspannkraftniveau über die Lebensdauer der Konstruktion aufrecht zu erhalten. Diese Methodik ist jedoch dahingehend zu hinterfragen, dass die Witterungseinflüsse und die Setzerscheinungen den Schmierungszustand der Garnitur verändern. Der Prozess muss folglich undefiniert erfolgen. Außerdem ist festzuhalten, dass diverse Verbindungselemente (z. B. HRC-Garnituren, Schließringbolzen) sowie Anziehverfahren (z. B. Kombiniertes Vorspannverfahren) nicht bzw. nur eingeschränkt nachgespannt werden können. Zudem muss in Konstruktionen mit einer Vielzahl an Schraubenverbindungen ein Nachspannen aus wirtschaftlichen Gründen als nachteilig gegenüber anderen Fügeverfahren empfunden werden. Für den Anwender wäre es daher wünschenswert, das Vorspannkraft-Zeit-Verhalten durch empirisch, analytisch, experimentelle Untersuchungen beurteilen und bereits im Zuge der Bemessung berücksichtigen zu können.

Zielstellung

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Ermittlung von Vorspannkraftverlusten in GV-Verbindungen sowie der Bewertung der Einflussgrößen vor dem Hintergrund einer praxisüblichen Ausführung und Beanspruchung der Verbindungen. Dazu werden die maßgebenden Einflussgrößen für Vorspannkraftverluste von GV-Verbindungen mit endbeschichteten Bauteilen untersucht, um die Ableitung von Berechnungsmodellen zur Abschätzung von Vorspannkraftverlusten über die Lebensdauer zu ermöglichen. Im Sinne der Übertragbarkeit werden die im Labor ermittelten Vorspannkraftverluste im Feldversuch validiert. Die generierten Ergebnisse dienen nachfolgend als Orientierungswerte für Vorspannkraftverluste auf Basis verschiedener Beanspruchungen für typische Beschichtungen.

Für abweichende Anschlusskonfigurationen und Beschichtungen wird eine wirtschaftliche Prüfprozedur zur Ermittlung von Vorspannkraftverlusten entwickelt sowie deren Auswertung bis hin zur Berücksichtigung in der Bemessung vereinheitlicht. Als Handlungsempfehlung werden außerdem stahlbaupraktische Maßnahmen konkludiert, um Vorspannkraftverluste reduzieren zu können. Zudem wird der Einfluss fertigungs- und witterungsbedingter Imperfektionen auf das Tragverhalten von GV-Verbindungen untersucht, damit eine wirtschaftliche Ausführung auch unter Baustellenbedingungen gewährleistet werden kann.

Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse sowie Erkenntnisse dieser Arbeit werden nachfolgend zusammengefasst:

1. Anhand von Langzeitversuchen zum Setzverhalten konnte gezeigt werden, dass die Vorspannkraftverluste unmittelbar nach der Montage am größten ausfallen und nach 72 h bereits stark abgeklungen sind, die Verluste jedoch über dieses Zeitintervall hinaus fortschreiten und über die Lebensdauer hinweg eine nicht zu vernachlässigende Größe darstellen. Innerhalb der ersten 48 h kann je nach Parameterkonfiguration davon ausgegangen werden, dass im Mittel 56 % der Setzkraftverluste abgeklungen sind. Darüber hinaus konnte für die geprüften Reibflächenvorbehandlungen bestätigt werden, dass eine hinreichend genaue Extrapolation der Vorspannkraftverluste auf die Lebensdauer nach Ablauf der ersten 48 h möglich ist.
2. Die Einwirkung schwingender Querkkräfte auf die Verbindung ließ für die meisten Reibflächenvorbehandlungen klare Tendenzen hinsichtlich der Einflussgrößen auf den Vorspannkraftverlust erkennen, wobei die zinkgespritzten Oberflächen aufgrund der Neigung zum Kaltverschweißen am besten abgeschnitten haben. Die Schwingversuche mit den übrigen Vorbehandlungen mit Grenzschwingspielzahlen von bis zu $1 \cdot 10^7$ LW wiesen ein ähnliches Verhalten wie die Setzkraftverluste auf, sodass eine hinreichend genaue Extrapolation der Vorspannkraftverluste infolge schwingender Beanspruchung nach entsprechender Datenfilterung bereits nach 500.000 LW, besser jedoch nach $1 \cdot 10^6$ LW erfolgen kann. Ein Einfluss der Belastungsfrequenz konnte bis 20 Hz nicht beobachtet werden. Der Haupteinflussfaktor auf die Vorspannkraftverluste ist die aufgebrachte Kraftschwingbreite, wobei sehr kleine Kraftschwingbreiten einen vernachlässigbar kleinen Einfluss aufzeigten. Bei großen Kraftschwingbreiten konnten im Rahmen der Untersuchungen hingegen Vorspannkraftverluste von bis zu 15 % verzeichnet werden. Das

- Spannungsverhältnis spielt gegenüber der Kraftschwingbreite eine eher untergeordnete Rolle.
3. Anhand des geprüften Mehrstufenkollektivs wurde festgestellt, dass trotz Stufensprüngen keine Reihenfolgeeffekte im Sinne der Betriebsfestigkeit gemessen werden konnten. Darüber hinaus kann aufgrund der Stufensprünge und der variierenden Lasten die Güte einer Extrapolation je nach Kollektivform nur mit ausreichend langer Endstufe gewährleistet werden. Im Vergleich mit den Einstufenkollektiven resultierten aus den Mehrstufenkollektiven jedoch keine höheren Vorspannkraftverluste, sodass eine konservative Abschätzung auf Basis von Einstufenkollektiven möglich ist.
 4. Darüber hinaus kann konstatiert werden, dass keine signifikante Beeinflussung der statischen Tragfähigkeit durch Ein- oder Mehrstufenkollektive aufgetreten ist. Teilweise konnten sogar leichte Steigerungen der statischen Tragfähigkeit (ca. + 10 %) gemessen werden. Es wird davon ausgegangen, dass dies auf Einebnungsvorgänge der Kontaktflächen unter schwingender Beanspruchung zurückzuführen ist, wobei dies stark von den jeweiligen Eigenschaften der Reibflächenvorbehandlung abhängt.
 5. Der Einfluss des Garniturtyps sowie des gewählten Korrosionsschutzes wurde anhand von Untersuchungen an geschliffenen Versuchskörpern ohne Trennfuge herausgearbeitet. Die Vorspannkraftverluste infolge Setzens fielen im Mittel bei feuerverzinkten HV-Garnituren mit ca. 10 % unabhängig vom Anziehverfahren am höchsten aus, da die summierte Schichtdicke und die Anzahl der Kontaktflächen ebenfalls am höchsten waren. Bei den vergütungsschwarzen HV-Garnituren konnte hingegen ein mittlerer Verlust von ca. 3 % bestimmt werden. Aus den mit Greenkote beschichteten HRC-Garnituren resultierte durch die geringere summierte Schichtdicke auch ein kleinerer Verlust von ca. 6,6 %. Die Schließringbolzen wiesen unter den beschichteten Garnituren mit ca. 5,5 % die geringsten Vorspannkraftverluste auf. Die Wahl des Verbindungselementes kann dementsprechend eine elementare Rolle bei der Bestimmung der Vorspannkraftverluste spielen, wenngleich sich bei den Versuchsserien mit praxisgerechten Reibflächenvorbehandlungen nur Tendenzen, nicht aber die Differenzen aus den Garniturversuchen abzeichneten.
 6. Die Unabhängigkeit der Vorspannkraftverluste vom Vorspannkraftniveau für unbeschichtete Bauteile nach Dinkel kann weitgehend bestätigt werden. Die Übertragbarkeit auf beschichtete Bauteile kann jedoch nicht bestätigt werden. Selbst wenn lediglich die Garnitur beschichtet ist, sind erhebliche Abhängigkeiten vom Vorspannkraftniveau zu verzeichnen. Über alle untersuchten Serien kann dennoch

- konstatiert werden, dass die relativen Vorspannkraftverluste weitgehend unabhängig vom Vorspannkraftniveau sind.
7. Je nach Art und Intensität der Imperfektion sowie Reibflächenvorbehandlung konnte eine Reduktion der Haftreibungszahl (im Vergleich zu den Referenzversuchen) von bis zu 28 % beobachtet werden, sodass der größte Teil der Tragfähigkeitseinbußen durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_M = 1,25$ abgedeckt ist. Dabei konnte kein Einfluss der untersuchten Imperfektionen auf die Kriechsensitivität der Reibflächenvorbehandlungen detektiert werden. Bei den ASI- und ESI-beschichteten Bauteilen konnten darüber hinaus ebenfalls keine Änderungen der Tragfähigkeit beobachtet werden. Die Aluminium gespritzten Bauteile reagierten lediglich sensitiv auf die Imperfektion „Alterung“. Die Beschichtung HDG + ASI hat sich als besonders anfällig erwiesen, da eine Reduktion der zügigen Tragfähigkeit bzgl. aller untersuchten Imperfektionen zu verzeichnen war. Dennoch konnten die Reibflächenklassen aus Tabelle 17 der DIN EN 1090-2 trotz Imperfektionen für alle Serien bestätigt werden.
 8. Die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen aus dem Labor auf die reale Anwendung ist nach Ansicht des Verfassers grundsätzlich gegeben, sofern die Randbedingungen auf die Anwendung abgestimmt sind. Trotz wesentlicher Diskrepanzen hinsichtlich der Einflussparameter betrug die Differenz der ermittelten Vorspannkraftverluste von Labor- und Feldversuch lediglich 4,6 %.
 9. Eine pauschale Messdauer für Feldversuche ist schwer zu definieren, da diese stark von der Anwendung und den während der Messzeit auftretenden Beanspruchungen abhängt. Die Extrapolationsansätze aus den Laborversuchen sind aber auch für den Feldversuch als valide Methodik anzusehen. Bezogen auf das Bauwerk „Windenergieanlage“ konnte daher die minimale Messdauer auf sechs Monate bei einem Temperaturunterschied von $\Delta T \geq 20 \text{ °C}$ festgelegt werden, da somit die Wahrscheinlichkeit steigt kritische Lasten auf der Einwirkungsseite berücksichtigen zu können.
 10. Auf Basis der Ergebnisse konnte eine vom Verfasser vorgeschlagene vereinheitlichte und modifizierte Verfahrensprüfung in Anlehnung an IEC 61400-6 entwickelt werden. Das Vorgehen wurde wesentlich detaillierter ausgeführt, sodass eine praxisgerechte Ableitung von Vorspannkraftverlusten ermöglicht wird, die gleichzeitig eine Verkürzung der Versuchsdauern gestattet. Zusätzlich wurden Maßnahmen zur Reduktion des Vorspannkraftverlustes vorgeschlagen und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit bewertet.