

Zum Ermüdungsverhalten von Stumpfnahverbindungen bei sehr hohen Lastwechselzahlen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Stefanie Steppeler
geboren am 19. März 1983 in Gütersloh

2014

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael Vormwald

Tag der Promotion: 23. Januar 2014

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Heft 32

Stefanie Steppeler

**Zum Ermüdungsverhalten von Stumpfnahverbindungen
bei sehr hohen Lastwechselzahlen**

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2014

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Institut für Stahlbau
Appelstr. 9A
30167 Hannover

<http://www.stahlbau.uni-hannover.de>

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2880-5

ISSN 1617-8327

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Stahlbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Schaumann, der mich bei der Anfertigung dieser Arbeit betreut und die Erstberichterstattung übernommen hat. Die fachlichen und fachübergreifenden Gespräche waren für mich von äußerst großem Wert. Sein Engagement und sein großes Interesse an meiner Arbeit haben mir wichtige Impulse gegeben und die Durchführung der Arbeit in einem hervorragenden Umfeld ermöglicht.

Für die Übernahme des Korreferates danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Vormwald ganz herzlich. Sein entgegengebrachtes Interesse an meiner Arbeit und seine Diskussionsbereitschaft haben wichtige Anregungen gegeben. Ebenfalls sei Herrn Professor Dr.-Ing. Ludger Lohaus für das Mitwirken in der Promotionskommission sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Martin Achmus für die Übernahme des Vorsitzes herzlich gedankt.

Die Grundlage der vorliegenden Arbeit bilden die Untersuchungen im Rahmen des NTH-Top-Down-Projektverbundes „Strategien und Methoden des Life-Cycle-Engineerings für Ingenieurbauwerke und Gebäude“ (Teilprojekt 3 „Integrierende Modellierungs-, Monitoring- und Bewertungsmethoden für mechanische Degradation und Ermüdung“), das von der Niedersächsisch Technischen Hochschule (NTH) gefördert wurde. Für die finanzielle Unterstützung bedanke ich mich herzlich.

Einen großen Dank möchte ich all meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Stahlbau für die sehr gute Zusammenarbeit aussprechen. Das äußerst angenehme Arbeitsklima sowie die stete Diskussionsbereitschaft bei fachlichen Fragestellungen haben mir sehr geholfen. Insbesondere bedanke ich mich bei Mareike Collmann und Malte Gottschalk für die vielen gewinnbringenden Gespräche und ihre beständige Unterstützung. Bei Beiden möchte ich mich auch ganz herzlich für die kritische und sorgfältige Durchsicht dieser Arbeit bedanken.

Für die außerordentlich gewissenhafte Vorbereitung und tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen danke ich den Herren Karl-Heinz Hentschel und Christian Fricke für ihren Einsatz. Desweiteren gilt Herrn Dr.-Ing. Attila Alt mein besonderer Dank für die kontinuierliche Diskussionsbereitschaft und Unterstützung im Bezug auf die Prüfvorrichtung.

Weiterhin möchte ich mich bei den wissenschaftlichen Hilfskräften am Institut für Stahlbau für die tatkräftige Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen sowie den umfangreichen Auswertungen bedanken. Zudem gilt mein Dank den Studentinnen und Studenten, deren Abschlussarbeiten für mich eine große Unterstützung waren. An dieser Stelle sei besonders den Herren Matthias Bode und Robert Lee Gates sowie Frau Laura Marie Wagner gedankt.

Der abschließende Dank gilt Gerko sowie meiner Familie und meinen Freunden, die mir stets Rückhalt gegeben haben und durch ihre große Geduld und Unterstützung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Stefanie Steppeler

Kurzfassung

Hochdynamisch beanspruchte Bauteile und Konstruktionen sind während ihrer Lebensdauer vielfach mehr als 10^9 Lastwechseln ausgesetzt. Daher kommt dem Ermüdungsverhalten von Konstruktionselementen wie Schweißverbindungen im Hinblick auf eine sichere Betriebszeit und eine wirtschaftliche Bemessung eine besondere Bedeutung zu. In gültigen Regelwerken basiert die Bemessung von Stahlkonstruktionen gegen Ermüdung auf experimentell ermittelten Wöhlerlinien. Ab dem Abknickpunkt wird üblicherweise von einer Dauerfestigkeit ausgegangen. Allerdings ist der Verlauf der Ermüdungsfestigkeitskurven in diesem Bereich nicht abschließend geklärt. Die Existenz einer Dauerfestigkeit wird prinzipiell in Frage gestellt. Ermüdungsversuche an Schweißverbindungen mit mehr als 10^7 Lastwechseln sind bisher aufgrund eingeschränkter Möglichkeiten in der Versuchsführung nur begrenzt verfügbar.

In dieser Arbeit wird das Ermüdungsverhalten einer axial beanspruchten Stumpfnahverbindung aus Stahl bei konstanter Spannungsschwingbreite bis zu sehr hohen Lastwechselzahlen untersucht. Hierbei stehen die Weiterentwicklung der Prüftechnik, um Ermüdungsversuche in einem akzeptablen Zeitraum zu realisieren, sowie die Ausweitung der experimentellen Untersuchungen, die einen Beitrag zur Klärung der Fragestellung des Vorliegens einer Dauerfestigkeit leisten, im Vordergrund.

In einer hochfrequenten Prüfvorrichtung werden Ermüdungsversuche bis $5 \cdot 10^8$ Lastwechsel in einem akzeptablen Zeitraum realisiert. Neben der Untersuchung zeitlich veränderlicher Messgrößen während des Versuchs werden die optimierte Vorspannvorrichtung sowie die um eine frequenzabhängige Sollwertvorgabe erweiterte Regelung der Prüfvorrichtung vorgestellt. Zudem wird ein Kriterium zur Auswertung der Anrisschwingenspielzahl definiert und die Größe dieses Anrisses untersucht.

Im Zeitfestigkeits- und Übergangsbereich werden Schwingversuche durchgeführt, um den Einfluss von Prüffrequenz und Mittelspannung auf die Ermüdungsfestigkeit zu untersuchen. Dabei zeigt sich kein signifikanter Einfluss der Prüffrequenz, wobei die Ergebnisse keine einheitliche Aussage zulassen. Der Einfluss einer erhöhten Mittelspannung ist im Zeitfestigkeitsbereich in Form einer flacheren Wöhlerlinie zu erkennen. Der Vergleich der Ergebnisse mit der normierten Auswertung von Versuchen aus der Literatur wird vorgenommen. Die Einstufung des Konstruktionsdetails in die entsprechende Kerbfallklasse gemäß Eurocode 3 wird annähernd bestätigt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass bei der untersuchten Schweißverbindung von einer Dauerfestigkeit auszugehen ist, da weder späte Brüche noch eine Änderung des Schädigungsmechanismus festgestellt wurden. Zudem zeigen Durchläufer in der erneuten Prüfung keine eindeutigen Hinweise auf eine Vorschädigung.

Abstract

Components and structures under significant dynamic loading must often endure more than 10^9 load cycles during their design life. In consequence, the fatigue behaviour of constructional elements such as welded joints becomes relevant ensuring secure service life and cost-effective design. In the regulations governing steel structures, the fatigue strength curves are established from fatigue tests. Below a certain cyclic stress, a fatigue limit has usually been assumed. However, the behaviour of the fatigue strength curve in this area is a topic of ongoing research. The existence of a fatigue limit is put into question in principal. In the case of welded joints, the experimental data beyond 10^7 load cycles has not been extensively available until now, mainly due to the limitations of testing procedures.

This work examines the fatigue behaviour of an axially loaded butt weld under constant amplitude loading up to very high cycles. The focus lies on technical advances of fatigue testing, which allow for the realisation of experiments within reasonable time frames, as well as on making a contribution to clarify the question of the existence of a fatigue limit for welded steel joints by way of experimental results.

An acceptable period of testing time needed to reach $5 \cdot 10^8$ load cycles is realised by employing a high frequency testing device. Besides the investigation of time dependent data gathered during the test, the optimized preload device and the controller, which was extended by a frequency dependent setpoint setting, are presented.

High and very high cycle fatigue tests are conducted in order to investigate the influence of test frequency and mean stress on the fatigue strength. No significant influence of test frequency is observed, but the results do not allow for a consistent conclusion. The influence of increased mean stress is evident in the high cycle regime, resulting in a shallower fatigue strength curve. A comparison of the test results with normalised fatigue tests taken from literature is given. The classification of the constructional detail into the detail category according to Eurocode 3 is approximately confirmed.

The results of this work illustrate that the investigated welded joint shows a fatigue limit, as neither late cracks, nor a change in damage mechanism is detected. Furthermore, the repeated tests of specimens without failure indicate no precise evidence of pre-damage.

Schlagwörter

Schweißverbindungen, Stahl, Ermüdungsversuche, sehr hohe Lastwechselzahlen, Wöhlerlinie, Prüffrequenz, Spannungsverhältnis

Keywords

Welded joints, Steel, Fatigue tests, Very high cycle fatigue (VHCF), SN-curve, Test frequency, Stress ratio

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Lösungsweg	3
2	Stand der Forschung.....	5
2.1	Schädigung durch Ermüdung	5
2.2	Ermüdungsfestigkeitskurven metallischer Werkstoffe	6
2.3	Einflussgrößen auf die Ermüdungsfestigkeit	9
2.3.1	Kerbwirkung	11
2.3.2	Eigenstressungen	12
2.3.3	Schweißstressungen.....	13
2.3.4	Prüffrequenz	16
2.4	Ermüdungsversuche an Schweißverbindungen aus Stahl	18
2.5	Normative Regelungen und Empfehlungen.....	25
2.5.1	Eurocode 3	25
2.5.2	Empfehlungen des IIW.....	27
2.5.3	Empfehlungen von Sonsino	29
2.6	Prüftechniken im Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen	30
2.7	Fazit im Hinblick auf die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit	31
3	Herstellung der Probekörper und Charakterisierung des Ausgangszustandes .	33
3.1	Werkstoff	33
3.2	Nahtvorbereitung und Schweißverfahren	34
3.3	Geometrie der Probekörper.....	35
3.4	Temperaturmessungen	36
3.5	Lokale Schweißnahtgeometrie	40
3.5.1	Aufnahme der lokalen Schweißnahtgeometrie	41
3.5.2	Auswertung der lokalen Nahtgeometrieparameter.....	42
3.5.3	Ermittlung der Kerbformzahl K_t	46

3.6	Zugversuche.....	52
3.7	Metallographische Untersuchung	53
3.8	Härtemessung	54
3.9	Zusammenfassung und Erkenntnisse	56
4	Weiterentwicklung der Prüftechnik	59
4.1	Aufbau und Funktionsprinzip	59
4.2	Versuchsablauf und Weiterentwicklungen.....	61
4.2.1	Vorspannvorgang des Probekörpers	61
4.2.2	Festlegung von Prüfkraftamplitude und Abbruchkriterien	62
4.2.3	Start des Versuchs und Aufzeichnung der Messdaten	63
4.2.4	Weiterentwicklungen der Prüfvorrichtung	63
4.3	Zeitlich veränderliche Messgrößen.....	64
4.3.1	Prüffrequenz f	65
4.3.2	Prüfkraftamplitude F_a	67
4.3.3	Vorspannkraft F_v	69
4.4	Kriterium zur Ermittlung der Anrisschwingenspielzahl N_A	75
4.5	Untersuchung zur Größe des vorliegenden Anrisses	76
4.5.1	Vorgehen	76
4.5.2	Ergebnisse.....	80
4.6	Kalibrierung	83
4.6.1	Statische Kalibrierung	84
4.6.2	Dynamische Kalibrierung	85
4.7	Zusammenfassung und Erkenntnisse	91
5	Ermüdungsversuche.....	93
5.1	Versuchsdurchführung	93
5.2	Versuchsprogramm	94
5.3	Versuchsauswertung	96
5.3.1	Untersuchung des Zeitfestigkeitsbereichs	96
5.3.2	Untersuchung des Übergangsbereichs.....	97

5.3.3	Erneute Prüfung von Durchläufern.....	100
5.4	Beurteilung der Versuchsbedingungen.....	101
5.4.1	Soll- und Istwerte von Kraftamplitude und Vorspannkraft	101
5.4.2	Vorspannkraftabfall zu Versuchsbeginn.....	102
5.4.3	Erwärmung der Probekörper.....	104
5.5	Versuchsergebnisse	106
5.5.1	Allgemeine Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse.....	107
5.5.2	Einfluss der Prüffrequenz.....	111
5.5.3	Einfluss der Mittelspannung	117
5.5.4	Bewertung der hochgesetzten Durchläufer	119
5.5.5	Beurteilung der Bruchflächen.....	122
5.5.6	Verhalten im Bereich sehr hoher Lastwechselzahlen	126
5.5.7	Vergleich der Versuchsergebnisse mit Sonsino et al.	127
5.5.8	Vergleich der Versuchsergebnisse mit Eurocode 3	129
5.6	Zusammenfassung und Erkenntnisse	131
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	135
6.1	Zusammenfassung.....	135
6.2	Ausblick	139
7	Literatur	141
7.1	Normen und Richtlinien	141
7.2	Fachbücher, Monographien, Aufsätze und Berichte.....	143
7.3	Programmsysteme	155
7.4	Studentische Arbeiten	155
8	Verzeichnisse	157
8.1	Abbildungsverzeichnis.....	157
8.2	Tabellenverzeichnis.....	160
Anhang	163