

Beitrag zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für Dauerfestigkeitsberechnungen von Reparaturschweißungen

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak¹ und Dipl.-Ing. Agnieszka Chwastek¹

¹ Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Lehrstuhl Stahl- und Holzbau, Konrad-Wachsmann-Allee 2, Cottbus, Deutschland
hartmut.pasternak@b-tu.de, agnieszka.chwastek@b-tu.de

ZUSAMMENFASSUNG

Einige Tragwerke unterliegen während ihrer Nutzungsdauer sich häufig wiederholenden Beanspruchungen, die zum Ermüdungsversagen führen können. Vor diesem Hintergrund spricht man in der Praxis von Ermüdungsfestigkeit. Im Brückenbau sowie in vielen Einsatzbereichen des Hochbaus (Kranbahnen, Windanlagen, Türme, Masten, Krane) sind die Konstruktionen ständig wiederkehrenden Belastungen unterworfen. Vor allem kommt es meistens zu Ermüdungsschäden bei Schweißkonstruktionen, wegen des Einflusses vom Schweißprozess. In vielen Fällen wird die Lebensdauer dynamisch beanspruchter Bauteile durch die Ermüdungsfestigkeit begrenzt. Oft sind Schweißnahtübergänge ursächlich für eine Rissbildung mit späterem Risswachstum. Im Baubereich findet gegenwärtig eine starke Verschiebung von der Investition in neuere Bauwerke hin zur Sanierung und Instandhaltung statt [Pfeifer 2014]. Derzeit gibt es aber keine einheitlichen (normativen) Bemessungskonzepte für sanierte und nachbehandelte Nähte. Forschungsgegenstand ist die Entwicklung eines Beitrags zum Bemessungskonzept für Dauerfestigkeitsberechnungen von Reparaturschweißungen, basierend auf kleinen Musterbauteilen. Die Schweißverbindungen werden in Schwingfestigkeitsklassen für das Nennspannungs-, Strukturspannungs- und Kerbspannungskonzept eingeordnet.

1 Konzepte zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit

Zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit stehen heutzutage neben dem Nennspannungskonzept zwei Schwingfestigkeitskonzepte auf der Grundlage lokaler Spannungen zur Verfügung: das Struktur- und das Kerbspannungskonzept.

Das Nennspannungskonzept beinhaltet alle Beanspruchungen in der Tragstruktur. Die lokalen Einflüsse wie Steifigkeitsänderungen oder Kerbwirkungen der Schweißnaht bleiben bei der Spannungsberechnung jedoch unberücksichtigt. In dem Strukturspannungskonzept sind die lokalen geometrischen Effekte, mit Ausnahme der Kerbwirkung der Schweißnaht selber, enthalten. Diese fiktive Strukturspannung spielt insbesondere im Zusammenhang mit der Anwendung von Dehnmessstreifen (DMS) eine wichtige Rolle, da die DMS bei nicht nachbearbeiteten Nähten selten direkt auf den Nahtübergang geklebt werden können [Schmied und Kurmann 2010]. Das Kerbspannungskonzept wird auf elastizitätstheoretischer Basis am Ort des vermuteten Versagens in der Schweißnahtinbrandkerbe berechnet. Sie folgt jedoch bei entsprechender Modellierung aus der FE-Simulation.

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Beitrags zu diesen Bemessungskonzepten für die Schwingfestigkeit von Reparaturschweißungen.

2 Probekörper

Das Hauptziel des Vorhabens ist ein Einfluss der Sanierung und des Schweißnahtnachbehandlungsverfahrens auf die Ermüdungsfestigkeit der Schweißnähte zu zeigen. Da Kehlnähte eine höhere Spannungskonzentration als Stumpfnähte besitzen, wurden in Folgenden die Probekörper mit Kehlnähten untersucht. Zusätzlich ist die Anwendung des Nachbehandlungsverfahrens bei solchen Nähten geeignet.

Für die Lebensdaueruntersuchungen wurden kleinmaßstäbliche Proben mit einseitig aufgeschweißter Quersteife gefertigt. Abbildung 1 zeigt die Geometrie der untersuchten Quersteife aus 10mm S355. Als Schweißprozess wurde Metallaktivgasschweißen mit Massivelektrode, MAG verwendet.

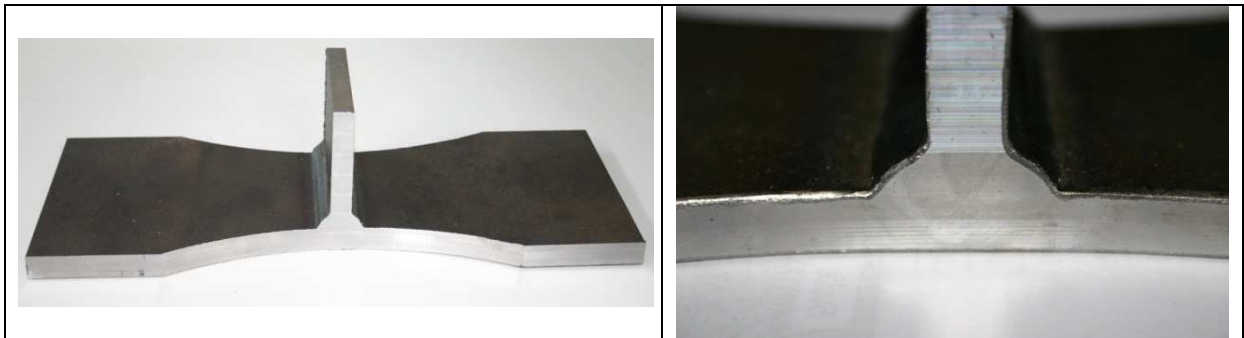


Abbildung 1: Quersteife für Lebensdaueruntersuchungen

3 Versuchsprogramm

Das Wichtigste am Anfang der Arbeit war ein gutes Versuchsprogramm zu entwickeln. Das schematische Versuchsprogramm ist in Tabelle 1 dargestellt. Insgesamt besteht das Versuchsprogramm aus ca. 50 Prüfkörpern von dem Konstruktionsdetail der Quersteife.

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Untersuchungsprogramm – Nachbehandlung der vorhandenen Risse		
Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
<ul style="list-style-type: none"> ▪ mit MAG geschweißt ▪ die einzelnen Prüfkörper herausgetrennt ▪ Ermüdungsversuche durchgeführt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ mit MAG geschweißt ▪ die einzelnen Prüfkörper herausgetrennt ▪ Ausschleifen der potentiellen Risse (bis 30% Höhe von Blech) ▪ E-Hand geschweißt ▪ Ermüdungsversuche durchgeführt 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ analog wie Gruppe II, aber mit dem hochfrequenten Hammer
<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">Urzustand</div>	<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">Sanierung</div>	<div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;">Nachbehandlung</div>

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche werden in Form des klassischen Wöhlerdiagramms präsentiert. Um eine Vergleichbarkeit der Schweißnähte nach der Sanierung und Nachbehandlung sicherzustellen, werden sich die Versuchsserien in drei Gruppen gliedern.

Die Gruppe I – fehlerfreie Schweißnaht, d.h. Ermüdungsversuche mit im Schweißzustand belassenen Prüfkörper. Bei der Gruppe II wurde es angenommen, dass je Probe schon ein Riss besitzt. Der Riss reicht bis 30% von Blechdicke. Die fehlerhaften Schweißnähte wurden dann durch Ausschleifen der potentiellen Risse und Wiederschweißen saniert. Für so vorbereitete Prüfkörpern wurden die Ermüdungsversuche durchgeführt. Der Prozess der Gruppe II wird als Sanierung benannt. Die Gruppe III ist analog wie Gruppe II aber zusätzlich ergänzend durch Schweißnachbehandlungsmethode. Als das Schweißnahtbehandlungsverfahren wurden einen hochfrequenten Hammer genutzt.

Für die Gruppe 2 und 3 wurden 15 Proben hergestellt und deren Herstellung messtechnisch begleitet. Für die Gruppe I wurde insgesamt 29 Proben hergestellt.

4 Reparaturschweißung

4.1 Sanierung

Bevor das Reparaturschweißen, d.h. Gruppe II, durchgeführt wurde, wurden örtlich die Schweißübergänge ausgeschliffen. Dies erfolgte mit einem Fingerfräser. Um eine bessere Verschmelzung in der Wärmeinflusszone zu bekommen, wurde das Ausschleifen eines vorhandenen Risses in V-Form durchgeführt. Zusätzlich wurden Auslaufbleche verwendet, um den Anfangs- und Endbereich der Quersteife einwandfrei zu lassen und eventuelle Schweißkrater vermeiden zu können. Die Reparaturschweißung erfolgte durch 3-lagiges Lichtbogenhandschweißen, E-Hand-Schweißen, siehe Abbildung 3 (li.).



Abbildung 2: Vorhandener Riss (li.), Ausschleifen eines Risses (re.)

4.2 Nachbehandlung

Zur Untersuchung des Einflusses mechanisch nachbehandelter Schweißnahtübergänge auf die Schwingfestigkeit reparaturgeschweißter Verbindungen wurde das HiFIT (High Frequency Impact Treatment) Verfahren gewählt. In der Abbildung 3 (re.) ist die Probe, die durch die Hammeranwendung betrachtet wurden, gezeigt.

5 Versuchsdurchführung

Im Rahmen von Bauteilversuchen werden Ermüdungsuntersuchungen in Form von klassischen Wöhlerversuchen durchgeführt. Die ausgewählte Belastungsart ist Zugschwellbeanspruchung mit Spannungsverhältnis $R=0,1$. Die Maschinerfrequenz beträgt 30 Hz.

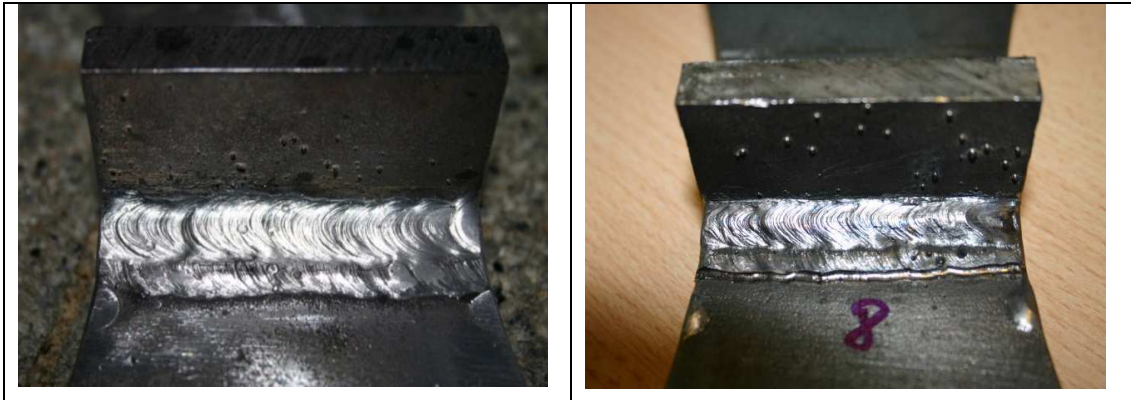


Abbildung 3: Sanierung, Gruppe II (li.), Nachbehandlung, Gruppe III (re.)

Im Folgenden wird die Gegenüberstellung von Ergebnissen der drei Gruppen betrachtet. Die mittleren Ermüdungsfestigkeiten bei 2 Millionen Lastwechsel $\Delta\sigma_{C,50\%}$ mit fixierter m für die drei Gruppe sind der Abbildung 4 zu entnehmen. Alle Ergebnisse wurden in einem Diagramm dargestellt um den Vergleich zu verdeutlichen.

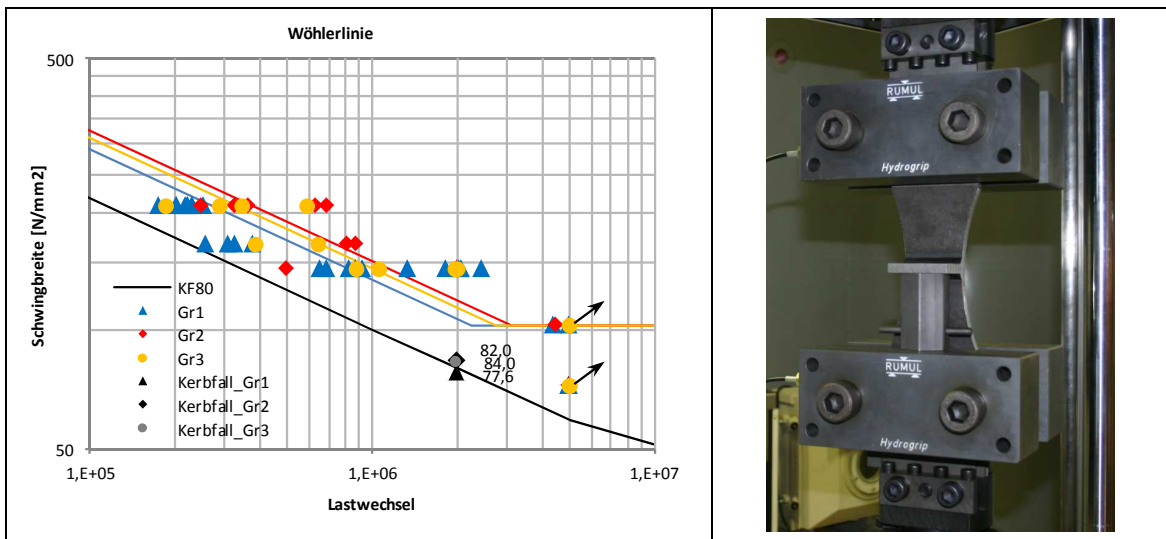


Abbildung 4: Ermüdungsversuche für drei Gruppen (li.) Prüfmaschine (re.)

Neben den Ermüdungsversuchen werden die hergestellten Schweißproben metallografisch untersucht und zusätzlich die Eigenspannungen röntgenographisch quer zur Schweißnaht bestimmt, um eine Vergleichbarkeit der Schweißnähte sicherzustellen.

6 Numerische Untersuchungen

Die Schweißverbindungen werden in Schwingfestigkeitsklassen für das Nennspannungs-, Strukturspannungs- und Kerbspannungskonzept eingeordnet. Hierfür werden unterschiedliche FE-Modellierungsvarianten vorgestellt und die Ergebnisse bewertend gegenübergestellt. Die Haupteinflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit wie Kerbwirkung, Mittelspannung bzw. R-Verhältnis und Eigenspannungen mit nachfolgenden Verzügen werden detailliert vorgestellt. Durch die Verbindung der Versuchsergebnissen und FE-Simulation ist die Bestimmung der Struktur- und Kerbspannungskonzepte für die Reparaturschweißungen möglich. Die geplanten numerischen Untersuchungen dienen der Versuchsplanung und der Reduktion der Anzahl von erforderlichen

experimentellen Untersuchungen sowie der Kalibrierung der verwendeten Software und Berechnungsparameter.

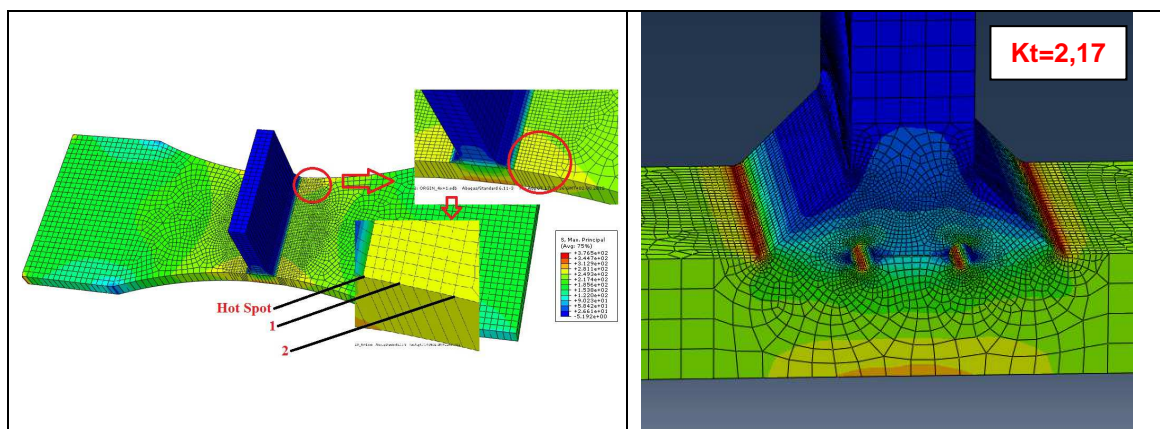


Abbildung 5: Strukturspannungen (li.) Kerbspannungen (re.)

7 Literatur

Design of steel structures. Fatigue, EN 1993-1-9, 2003.

Dürr, A, "Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung", pp. 25-34, 44-45, Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität, Stuttgart, 2007.

Hobbacher, A, "Recommendations for fatigue design of welded joints and components.", Doc. IIW XIII-1539-96/XV-845-96, pp. 13-80, 99, 135-138, Paris, October 2008.

Niemi, E, "Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components", Doc. IIW 1221-93, pp. 3-5, 12-16, 19-32, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta 1995.

Niemi, E, Fricke, W, Maddox, S, J, "Fatigue Analysis of Welded Components. Designer's guide to the structural hot-spot stress approach", Doc. IIW 1430-00, pp. 3-29, 2006.

Pfeifer, 2014. Beschreibung des Hammers, <http://www.pfeifer.de/de/hifit/> .

Radaj, D, Sonsino, C, M, "Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten", Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren, DVS-Verl., Düsseldorf, 2000.

Schmied, B. und Kurmann, S. (2010), " Statischer Festigkeitsnachweis von Schweißnähten mit örtlichen Spannungen", Manuskript zum Vortrag am Schweizer Maschinenelemente Kolloquium, Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz.

Schröder, H, Ch, Gerster, P, Schäfers, F, "Neue Prüfkonzepte und Verfahren zur Schweißnaht-Nachbehandlung", VGB Power Tech 8, Mannheim, Ehingen, Kerpen, Germany, 2010.