

Zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für die Lebensdauer von Reparaturschweißungen

Teil 1 – Stand der Technik und Versuche

H. Pasternak, A. Chwastek

Zusammenfassung Dieser Beitrag beschreibt – als erster von zwei Teilen – Ergebnisse des durchgeführten Forschungsprojekts über Reparaturschweißungen. Es handelt sich um die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit kleiner Musterbauteile, die dynamisch beansprucht werden. Ermittelt wurden Schwingfestigkeitsklassen für den Urzustand sowie auch für die sanierten Kehlnähte nach drei Bemessungskonzepten, das heißt Nenn-, Struktur- und Kerbspannung. Der vorliegende, erste Beitrag gibt den Stand der Technik wieder und geht auf die durchgeführten Versuche ein. Die numerische Modellierung und Bewertung der Ergebnisse wird im Teil 2 vorgestellt.

Evolution of Fatigue Assessment of Seams' Repair, Part 1 – State of the Art, Experimental Investigations

Abstract This article describes results from a research project about repair of welding. This work deals with an enhancement of fatigue resistance of small test specimens subjected to cyclic loads. The main task of this study was to determine the FAT-classes of original state and after repair of seams according to the assessment procedures, such as nominal, structural and effective notch stress approach. The first part encloses state of art and shows the results of the carried out tests. The numerical investigations and also the assessments will be done in the second part.

1 Einleitung

Ein nicht ausreichender Ermüdungswiderstand der Details in Kombination mit steigenden Ermüdungsbeanspruchungen führt früher oder später zu Schäden; dann stellt sich die Frage nach der Instandsetzung der Schäden.

Bei dynamisch beanspruchten Bauteilen sind oft Schweißnahtübergänge die Gründe für eine Rissbildung mit nachfolgendem Risswachstum. Sie schränken in vielen Fällen die Lebensdauer der Bauteile und Bauwerke ein. Hinzu kommen Abweichungen, die man bei dem Nachweis der Konstruktion nicht berücksichtigen konnte, zum Beispiel größere Belastungen und der Wunsch nach längerer Nutzung.

Nach Meinung der Autoren ist bis heute kein Bemessungskonzept für die Beanspruchbarkeit der Schweißung nach erfolgter Reparatur bekannt. In einem Forschungsvorhaben [1], bei dem neben dem Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau

der BTU auch das Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig und dem Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften der Universität Innsbruck mitwirkten, werden erstmalig Ermüdungsfestigkeitsklassen für Reparaturschweißungen entwickelt.

Der erste Teil dieses Beitrages behandelt zunächst den Stand der Technik, die Herstellung und Sanierung der Probekörper, die Durchführung der Ermüdungsversuche sowie auch Begleituntersuchungen (wie Temperatur-, Eigenspannungsmessungen). Im zweiten Teil werden Versuche und numerische Modellierung gegenübergestellt und Ergebnisse bewertet.

2 Stand der Technik

2.1 Konzepte zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit

Zur Beurteilung der Ermüdungssicherheit stehen heutzutage neben einer rein experimentellen Bewertung unterschiedliche rechnerische Konzepte zur Verfügung. Die herkömmlichen Konzepte basieren auf Nenn-, Struktur- und Kerbspannungen, wobei für die Schweißverbindungen eher lokale Konzepte zu empfehlen sind.

Im Nennspannungskonzept werden Spannungen nach der elementaren Festigkeitslehre für Balken oder Stabwerke im Nennquerschnitt des Bauteils ermittelt. Örtliche spannungserhöhende Effekte der Schweißung werden dabei vernachlässigt. Der Nachweis erfolgt in Form eines einfachen Spannungsnachweises gegen eine Wöhlerlinie, die im Regelfall aus Versuchen gewonnen wird. Dabei sind die lokalen Spannungsspitzen auf der Widerstandseite im Kerbdetail abzudecken [2].

Im Strukturspannungskonzept (**Gleichung 1**) sind die lokalen geometrischen Effekte, mit Ausnahme der Kerbwirkung der Schweißnaht selber, enthalten. Diese fiktive Strukturspannung wird in der Regel durch Extrapolation über zwei bzw. drei Stützstellen im definierten Abstand von der Schweißnaht auf die Einbrandkerbe (sog. Hot-Spot) ermittelt. Aus diesem Grund werden die FE-Analyse und/oder die Messungen mittels Dehnmessstreifen (DMS) angewandt. Die Ermüdungswiderstandseite enthält in diesem Fall die Kerbfälle von Strukturspannungen.

$$\Delta\sigma_{Stru} = \Delta\sigma_{Nenn} \cdot k_t \quad (1)$$

Das Kerbspannungskonzept (**Gleichung 2**) wird auf elastizitätstheoretischer Basis am Ort des vermuteten Versagens in der Schweißnaht einbrandkerbe (entweder am Nahtübergang oder an der Wurzel) angewandt. Das Kerbspannungskonzept basiert auf dem Verfahren von Neuber. Dabei geht man davon aus, dass die volle Kerbspannung im Kerbgrund nicht ermüdungswirksam wird.

Laut diesem Konzept werden alle Kanten der Schweißnaht einbrandkerbe mit dem fiktiven Radius $r_f = 1,0\text{mm}$ abgerundet und mit einer Wöhlerlinie FAT225 verglichen [2], [3].

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak

Dipl.-Ing. Agnieszka Chwastek

Brandenburgische Technische Universität (BTU)

Lehrstuhl Stahl- und Holzbau

K.-Wachsmann-Allee 2

03046 Cottbus

Dafür sind Berechnungen mithilfe der FE-Methode erforderlich.

Die Präzision der Bewertung nach diesem Konzept ist hoch, aber ein größerer Modellierungsaufwand ist erforderlich.

$$K_t = \frac{\Delta\sigma_{Kerb}}{\Delta\sigma_{Nenn}} \text{ bzw. } \Delta\sigma_{Kerb} = \Delta\sigma_{Nenn} \cdot k_t \quad (2)$$

Bei jedem Konzept ist es wichtig, dass dieselben Spannungen für die Schwingbeanspruchung und den Ermüdungswiderstand bestimmt werden [2]. Die Ermüdungsnachweise nach allen Konzepten wurden in **Tabelle 1** gegenübergestellt.

2.2 Imperfektionen

Durch den Schweißprozess entstehen Fertigungsimperfektionen und Verzüge, die sekundäre Biegespannungen hervorrufen. Aus diesem Grund werden diese Winkel- und/oder Kantenversätze im Nachweis zur Schwingfestigkeit und durch den sogenannten Spannungserhöhungsfaktor (engl. stress magnification factor SMF) im Ermüdungswiderstand der Wöhlerlinien berücksichtigt [1]. Aus den IIW-Empfehlungen zur Schwingfestigkeit [2] lassen sich diese Werte für vier Typen von Schweißverbindungen und für Nenn- und Strukturspannungskonzept entnehmen (**Tabelle 2**). In diesem Fall sind Winkel- oder Kantenversätze auf der Beanspruchungsseite zu berücksichtigen, wenn der Versatz den Betrag überschreitet (**Gleichung 3**), der bereits in den Wöhlerkurven des Ermüdungswiderstandes des konstruktiven Details berücksichtigt ist [2]. Beim Kerbspannungskonzept sind die Imperfektionen stets auf der Beanspruchungsseite zu berechnen.

$$k_{m,eff} = \frac{k_{m,berech}}{k_m} \quad (3)$$

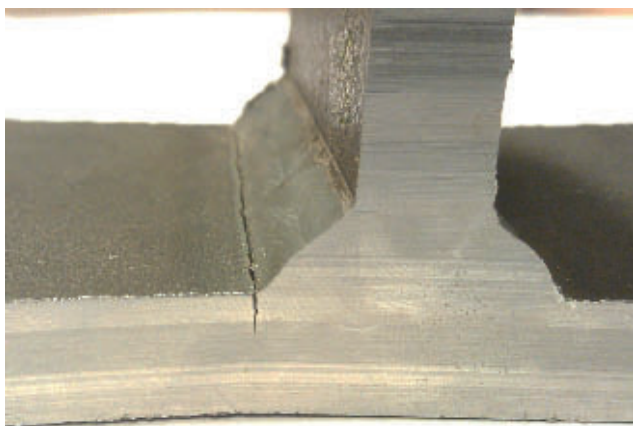


Bild 1. Riss am Nahtübergang
Fig. 1. Crack at weld toe

Tabelle 1. Ermüdungsfestigkeitsnachweise Table 1. Fatigue resistance approaches		
	Spannungsschwingbreite	Ermüdungsnachweis
globale Konzepte	▪ Nennspannung $\gamma_{1,1} \Delta\sigma_{1,1} = \lambda_1 \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{1,1}, Q_1)$	$\frac{\gamma_{1,1} \Delta\sigma_{1,1}}{\Delta\sigma_{0,2000} / Y_{WR}} < 1$
	▪ Korrigierte Nennspannung $\gamma_{1,1} \Delta\sigma_{L,1} = k_1 \cdot \lambda_1 \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{1,1}, Q_1)$	$\frac{\gamma_{1,1} \Delta\sigma_{L,1}}{\Delta\sigma_{0,2000} / Y_{WR}} \leq 1$
lokale Konzepte	▪ Strukturspannung $\gamma_{E,1} \Delta\sigma_{E,1} = k_1 \cdot (\gamma_{E,1} \Delta\sigma_{E,1})$	$\frac{\gamma_{E,1} \Delta\sigma_{E,1}}{\Delta\sigma_{0,2000} / Y_{WR}} \leq 1$
	▪ Kerbspannung $\gamma_{1,1} \Delta\sigma_{1,1} = K_1 \cdot (\gamma_{1,1} \Delta\sigma_{1,1})$	$\frac{\gamma_{1,1} \Delta\sigma_{1,1}}{\Delta\sigma_{0,2000} / Y_{WR}} < 1$

Tabelle 2. Berücksichtigung des Spannungserhöhungsfaktors [2] Table 2. Consideration of stress magnification factors [2]			
Type of k_m analysis	Nominal stress approach	Structural hot spot and effective notch approach	
Type of welded joint	k_m already covered in FAT class	k_m already covered in SN curves	Default value of effective k_m to be considered in stress
Butt joint made in shop in flat position	1,15	1,05	1,10*
Other butt joints	1,30	1,05	1,25*
Cruciform joints	1,45	1,05	1,40*
Fillet welds on one plate surface	1,25	1,05	1,20**
*) but not more than $(1 + 2.5 \cdot e_{max}/t)$, where e_{max} = permissible misalignment and t = wall thickness of loaded plate **) but not more than $(1 + 0,2 \cdot t_{ref}/t)$, where t_{ref} = reference wall thickness of fatigue resistance curves			

3 Versuchsprogramm

Da Kehlnähte eine bedeutend höhere Spannungskonzentrationen als Stumpfnähte aufweisen, wurden im Folgenden Probekörper mit Kehlnähten untersucht. Je nach Belastung, tritt der Riss am Nahtübergang auf und wird durch die

Tabelle 3. Versuchsprogramm Table 3. Investigation schedule		
Untersuchungsprogramm - Nachbehandlung der vorhandenen Risse		
Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
1. mit MAG geschweißt 2. die einzelnen Prüfkörper herausgetrennt 3. Ermüdungsversuche durchgeführt	1. mit MAG geschweißt 2. die einzelnen Prüfkörper herausgetrennt 3. Ausschleifen der potenziellen Risse (bis 30 % Höhe vom Blech) 4. E-Hand geschweißt 5. Ermüdungsversuche durchgeführt	1. analog wie Gruppe II, aber mit dem hochfrequenten Hammer
Urzustand	Sanierung	Nachbehandlung

Konzentration der Kerbspannungen verursacht (Bild 1). Bei solchen Nähten ist die Anwendung eines Nachbehandlungsverfahrens geeignet. Im Weiteren werden solche Schweißnähte repariert und untersucht.

Die Resultate der Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurden in Form der klassischen Wöhlerkurven dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit der Schweißnähte nach der Sanierung und Nachbehandlung sicherzustellen, werden die Versuchsserien in drei Gruppen gegliedert. Ein detailliertes Versuchsprogramm ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Gruppe I – fehlerfreie Schweißnaht, das heißt Ermüdungsversuche mit im geschweißten Zustand belassenen Prüfkörpern. In Gruppe II wurde ein potenzielles Risssanierungsszenario nachgestellt. Angenommen wurde, dass der Riss bis 50 % der Blechdicke reicht. Die beschädigten Schweißnähte wurden dann durch Ausfräsen der potenziellen Risse und Reparaturschweißen saniert. Für den so vorbereiteten Prüfkörper wurden die Ermüdungsversuche durchgeführt. Die Gruppe III ist analog zu der Gruppe II, aber ergänzend wurden die Prüfkörper einer Schweißnahtnachbehandlungsmethode unterzogen. Dafür wurde das hochfrequente Hämmern genutzt.

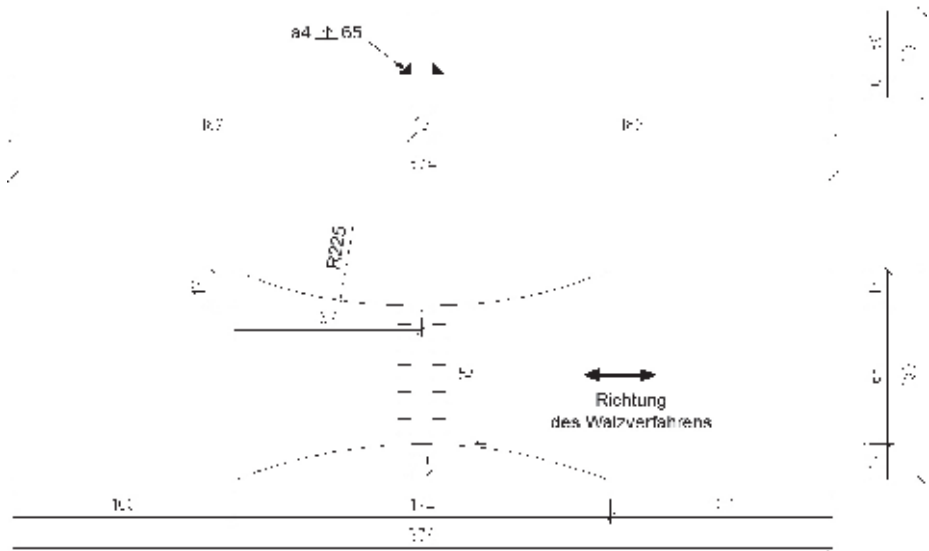
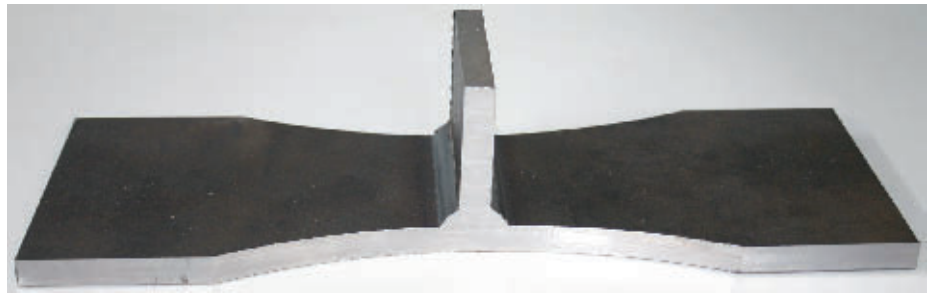


Bild 2. Geometrie der Versuchskörper
Fig. 2. Geometry of specimen

4 Prüfkörperherstellung

4.1 Urzustand

Für die Lebensdauerersuche wurden kleinmaßstäbliche Proben mit einseitig aufgeschweißter Quersteife gefertigt. Bild 2 zeigt die aus den geschweißten Blechen S355 gearbeitete Form der Proben aus 10mm Blechdicke. Als Schweißprozess wurde Metallaktivgasschweißen (MAG) mit Massivelektrode angewendet. Die Schweißparameter wurden in Tabelle 4 aufgelistet [1].

4.2 Sanierung

Vor dem Reparaturschweißen der Probe wurden die Schweißübergänge lokal mit einem Fingerfräser ausgeschliffen. Um eine adäquate Verschmelzung in der Wärmeinflusszone zu bekommen, wurde das Ausschleifen in V-Form durchgeführt (Bild 3).

Die Reparaturschweißung erfolgte durch 3-lagiges E-Handschweißen, (Bild 4, rechts). Die Bezeichnung des genutzten Schweißzusatzwerkstoffes ist E420RR 12 mit 2,5 mm Elektrodendurchmesser [1]. Jede weitere Schweißlage wurde nach vorheriger Abkühlung bis circa 110 °C geschweißt. Die Schweißparameter jeder einzelnen Lage sind in der Tabelle 5 aufgeführt. Die erste Lage wurde an der Wurzel, die zweite am Übergang und die dritte bei der Quersteife geschweißt. Es wurden zusätzlich Auslaufbleche verwendet, um den Anfangs- und Endbereich der Schweißnähte ein-

Tabelle 4. Schweißparameter während der Herstellung [1] Table 4. Welding parameters of specimens during manufacturing [1]						
I [Ampere]	U [Volt]	v _s [cm/min]	v _D [m/min]	Schweißprozess	Schweißposition	Zusatzwerkstoff
320	30,8	40	11	135	PB	G4Si1

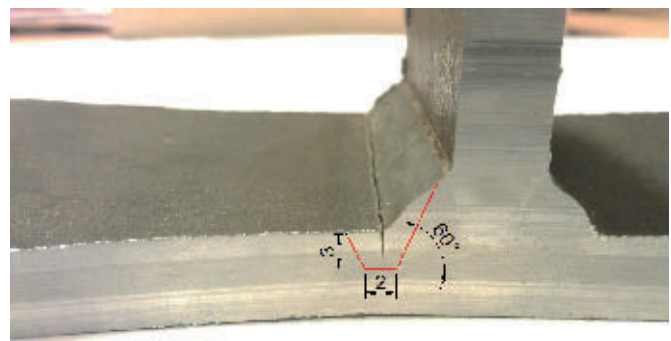


Bild 3. Ausschleifen eines Risses
Fig. 3. Grinding of crack

wandfrei zu belassen und eventuelle Schweißkrater zu vermeiden (Bild 4, links).

Bild 5 zeigt die Schweißnähte nach der Sanierung. Die Nähte sind eher flacher als beim Urzustand.

4.3 Nachbehandlung

Um die Auswirkung mechanisch nachbehandelter Schweißnahtübergänge auf die Schwingfestigkeit reparaturschweißter Verbindungen zu erforschen, wurde das hochfrequente Hämmern ausgewählt. Unter die-

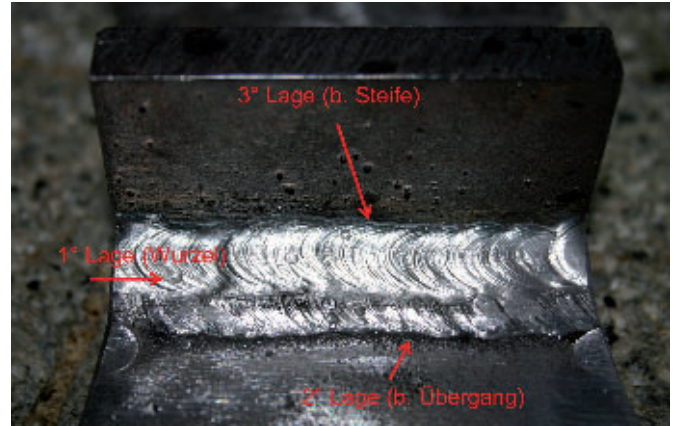


Bild 4. Reparaturschweißen (links) und entsprechende Schweißlage (rechts)
 Fig. 4. Repair welding (left) and appropriate weldings layers (right)

sem versteht man einen pneumatisch betriebenen mechanischen Nachbehandlungsprozess, bei dem man Nahtgeometrieveränderung und mechanische Randschichtveränderung kombiniert. Ein einzelner gehärteter Metallstift (Pin), der durch einen druckluftbeschleunigten Kolben verstärkt wird, wurde als Hammerkopf angewendet. Der Pin besitzt einen abgerundeten Kopf mit einem Radius von 3 mm. Die Hammerfrequenz betrug 230 Hz [1].

In Bild 6 wird eine mittels HF-Hämmerns nachbehandelte Schwingprobe gezeigt. Weil die Proben 3-lagig reparaturgeschweißt wurden, mussten mit dem Hammer mehrere Spuren bearbeitet werden [1]. Somit wurde eine zusätzliche Bearbeitung zweier Nahtlagen erzeugt (Bild 7).

5 Versuche

5.1 Ermüdungsversuche

Die Versuche wurden mit einer Prüffrequenz von 30 Hz auf einer hydraulischen Schwingprüfmaschine (MTS 810) durchgeführt (Bild 8). Über zwei Stahlzylinder wurde die Last in die Probekörper eingeleitet. Um ein Verschieben der Prüfkörper zu verhindern wurden zusätzliche Blecheinsätze mit entsprechenden Kontaktflächen in die hydraulischen Spannbacken des Prüfsystems eingespannt.

Es wurden fünf Spannungsniveaus genutzt, um die Probekörper zu belasten. Nur die Versuche mit Bruchausgang vom Schweißnahtübergang der Schwingprobe wurden für die Auswertung berücksichtigt, die zu den Wöhlerdiagrammen führten. Ungeschädigte Proben wurden in den Dia-

Tabelle 5. Schweißparameter während des Reparaturschweißens				
Table 5. Welding parameters of seams' repair welding				
Schweißparameter	U in [V]	I in [A]	v in [mm/sek]	
			Seite 1 (rechts)	Seite 2 (links)
1. Lage (Wurzel)	25	130	2,921	2,679
2. Lage (b. Übergang)	22	103	3,042	3,019
3. Lage (b. Steife)	22	112	2,291	2,087

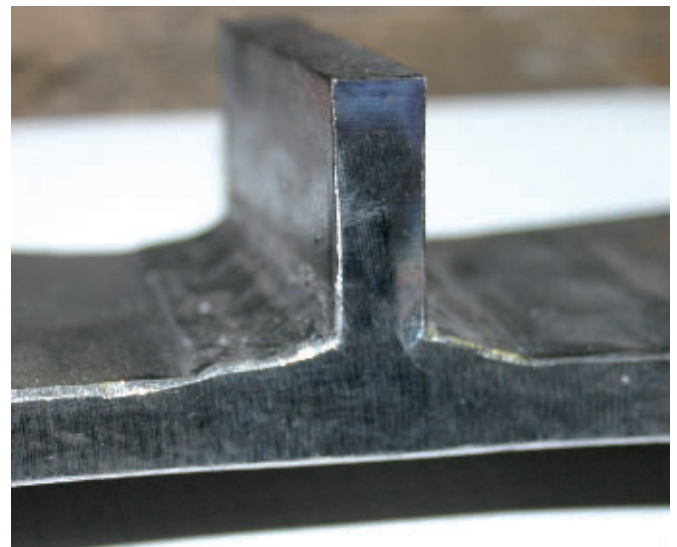


Bild 5. Ansicht auf die Schweißnähte nach der Sanierung
 Fig. 5. View of seams after repair

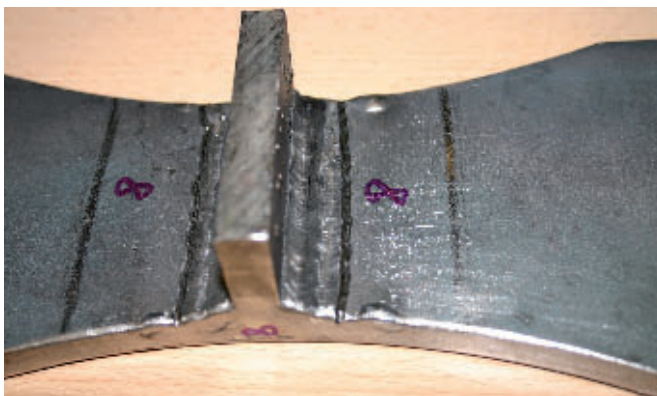


Bild 6. Probekörper nach Hammerbehandlung
 Fig. 6. Specimens after post-weld treatment



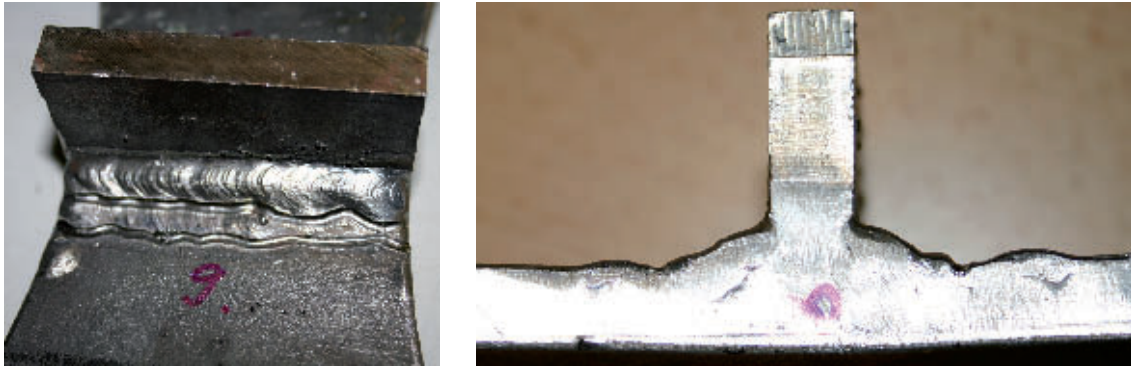


Bild 7. Hammerspuren an Nahtübergängen (links) und Hammerspuren im Querschnitt (rechts)
 Fig. 7. Traces of hammer at weld toe (left) and cross section of seams after treatment (right)

grammen durch Pfeile gekennzeichnet. Die ausgewählte periodische Belastungsart ist eine Zug-schwellbeanspruchung mit dem Spannungsverhältnis $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0,1$. Um bessere Vergleichbarkeit der verschiedenen Wöhlerlinien zu erreichen, wurde die statistische Auswertung mit fixierter, vordefinierter Neigung von $m = -3$ bestimmt.

Urzustand

Für den Urzustand konnte eine Ermüdungsfestigkeit von 107 N/mm^2 ermittelt werden (bei diesem Wert handelt es sich um die Ermüdungsfestigkeit mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50%). Der Abknickpunkt zur Dauerfestigkeit N_D (Tabelle 6) ist im Vergleich zum Eurocode (5 Mio.) [4] zu niedrigeren Lastwechselzahlen verschoben. Das bedeutet, dass eine erhebliche Verbesserung der Lebensdauer im Dauerfestigkeitsbereich nachgewiesen werden kann.

Bei jeder Probe der Gruppe I bildete sich ein Versagen vom Schweißnahtübergang aus und die Bruchflächen wiesen einen typischen Ermüdungsrissfortschritt auf. Ein Riss entstand erst im Mikrobereich und vergrößerte sich dann stabil. Anschließend führte dieser zu einem instabilen Restbruch. Deutlich zu erkennen ist eine feinkörnige Schwingbruchfläche und eine grobkörnige Restbruchfläche (Bild 9, links).

Sanierung

Die Ergebnisse nach der Sanierung der simulierten Defekte zeigen eine geringe Verbesserung der Schwingfestigkeit (um ca. 12%) im Vergleich zum Urzustand. Die Ermü-

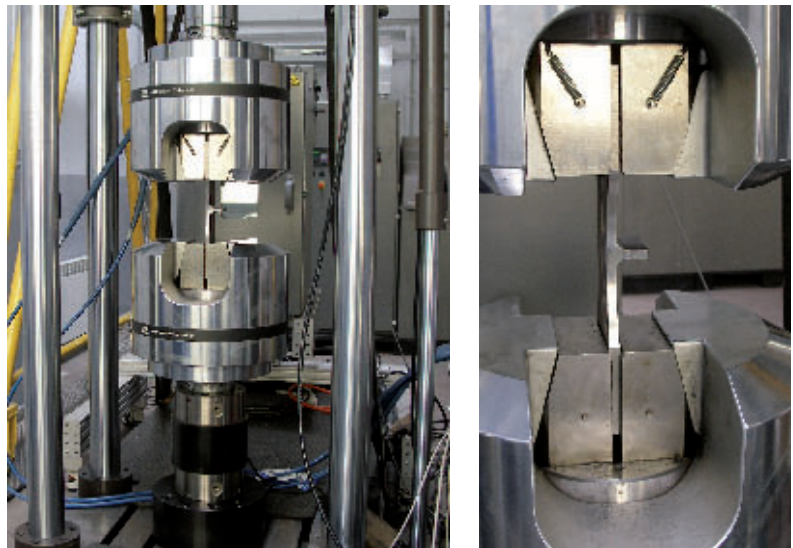


Bild 8. Hydraulische Prüfmaschine (links) und Halterung des Prüfkörpers in der Maschine (rechts)
 Fig. 8. Hydraulic fatigue test machine (left) and support the specimens in the machine (right)

dungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ beträgt 120 N/mm^2 . Dementsprechend kann eine Reparaturschweißung den ursprünglichen Ausgangszustand wieder herstellen. Als sinnvolle Reparaturschweißung wird definiert:

- Arbeitsschritt 1 – Ausfräsen des Schweißnahtübergangs
- Arbeitsschritt 2 – Reparaturschweißen mit dem Lichtbogenhandschweißen.

Der Sanierungsprozess kann aber zur Vergrößerung von Bauteilverzügen führen.

Im Fall der Sanierung begann auch bei jeder Probe ein Anriss am Nahtübergang und wies einen typischen Ermüdungsrissfortschritt auf (Bild 9, Mitte).

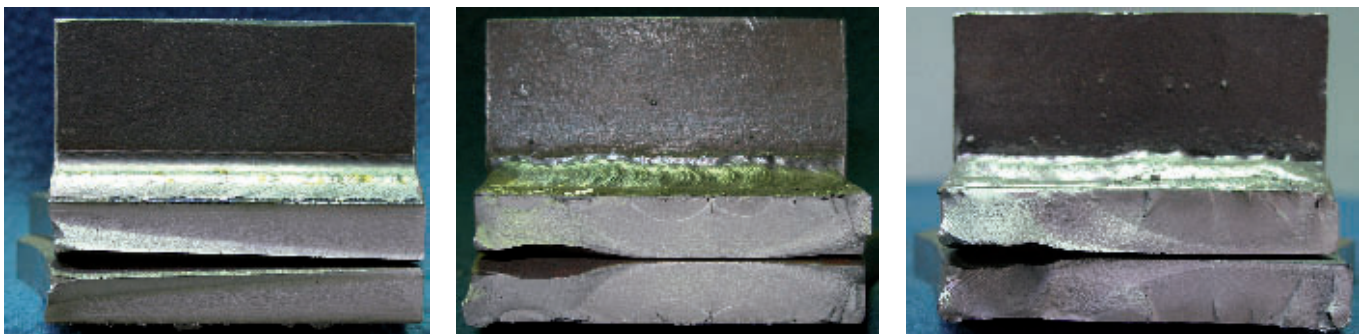


Bild 9. Bruchfläche des Urzustandes (links), sanierten (Mitte) und nachbehandelten (rechts) Proben
 Fig. 9. Fatigue cracks of original state (left), seams' repair (centre) and seams' reworking (right)

Tabelle 6. Ergebnisse der einzelnen Zustände Table 6. Results of suitable states						
Stahlsorte	Nachbehandlungsverfahren	Ausgewertete Versuche n [-]	m fixiert; m = 3			m variabel
			Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel $\Delta\sigma_{c,50\%}$ [N/mm ²]	Abknickpunkt Dauerfestigkeit N_D [-]	Verbesserung durch Nachbehandlung $\Delta\sigma_{Nach}/\Delta\sigma_{Urz}$ [-]	Steigung der Wöhlerlinie m [m]
S355	Urzustand	29	107	2.221.687	-	3,2
	Sanierung	13	120	3.115.746	1,12	2,5
	Nachbehandlung	13	115	2.747.813	1,07	2,8

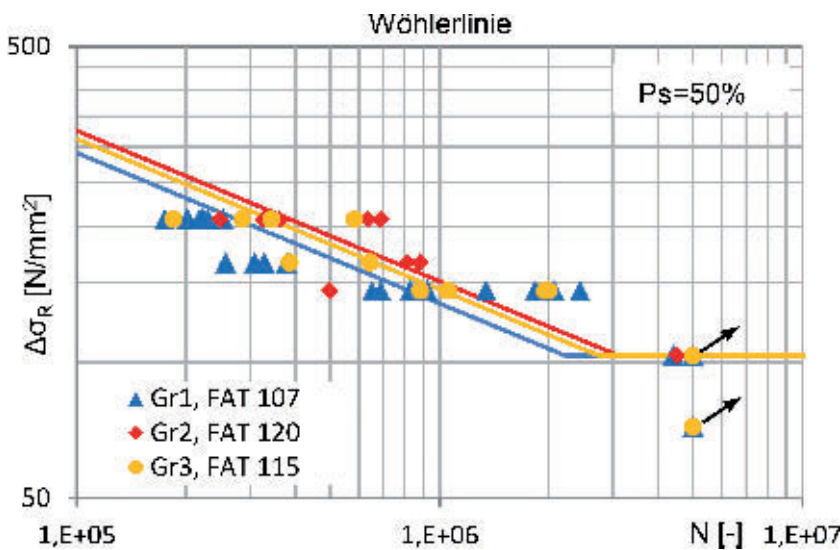


Bild 10. Vergleich der drei Zustände
Fig. 10. Comparison of results from three states

Nachbehandlung

Die Ergebnisse der Schwingversuche an reparaturgeschweißten und zusätzlich nachbehandelten Proben zeigen jedoch, dass die Ermüdungsfestigkeit, $\Delta\sigma_{c,50\%}$ im Vergleich zum Urzustand nur um 7% gesteigert wird und 115N/mm² beträgt. Die Hammerbehandlung hat im vorliegenden Fall also keine Auswirkung auf die Schwingfestigkeit. Da nur eine von den untersuchten Proben der Gruppe III im Grund-



Bild 11. Winkelverzugberechnung mit Lasertriangulation [1]
Fig. 11. Measurement of angular misalignment with laser triangulation [1]

material versagte, wird diese nicht als maßgebend betrachtet. In den anderen Fällen brach – trotz Reparatur – der Riss immer am Nahtübergang auf. Zwei deutliche Ermüdungsbruchflächen sind zu erkennen (Bild 9, rechts).

Eine umfassende Zusammenstellung der Ergebnisse der einzelnen Versuchsserien kann Tabelle 6 entnommen werden. In Bild 10 sind die mittleren Wöhlerlinien mit der Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechsel abgebildet. Die Ergebnisse der Gruppe III machen deutlich, dass eine Anwendung der Nachbehandlung im vorliegenden Fall wenig effektiv ist. Deswegen fokussieren sich die nachfolgenden Untersuchungen vornehmlich auf das Tragverhalten der Kehlnähte im Urzustand und der reparierten Nähte.

**5.2 Begleituntersuchungen
Verzüge**

Im Rahmen des Projektes wurden die Verzüge der Proben aus Gruppe I und II mittels Lasertriangulation bestimmt (Bild 11). Da die sanierten Proben doppelt geschweißt wurden, haben diese größere Versätze. Aus Tabelle 7 sind die gemessenen Verzüge zu entnehmen.

In unterschiedlichen Forschungsvorhaben wurden verschiedene analytische Ansätze zur Bewertung von Kantenversätzen entwickelt. So sind sie zum Beispiel den IIW-Empfehlungen zur Schwingfestigkeit [2] zu entnehmen. Mittels diese Ansätze konnte der Spannungserhöhungsfaktor k_m aus den gemessenen Verzügen berechnet werden. Anhand dieser Information hat man unter Berücksichtigung der gemessenen Verzüge für die Probe mit aufgeschweißter Quersteife der Faktor k_m berechnet. Der Formelapparat zur Berechnung der Winkelverzüge ist in Tabelle 8 gezeigt.

Die durch die Herstellung verursachten Verzüge der Proben sind in den Versuchsergebnissen bereits enthalten. Damit man die FAT-Klasse für die ideale Bauteilgeometrie berechnen kann, muss man den gewonnenen FAT-Wert mit dem berechneten Faktor $k_m = 1,45$ für den Urzustand und $k_m = 1,88$ für die Reparaturschweißung, multiplizieren.

Metallographische Untersuchungen

Zur Bestimmung der Schweißnahtqualität sowie zum Vergleich der numerischen Modelle mit den im Versuch ermit-

Tabelle 7. Winkelschrumpfung an Kehlnähten (links), Winkelverzug der Gruppe I (Mitte), Winkelverzug der Gruppe II (rechts)
 Table 7. Angular shrinkage of fillet seams (left), angular misalignment of group I (centre), angular misalignment of group II (right)

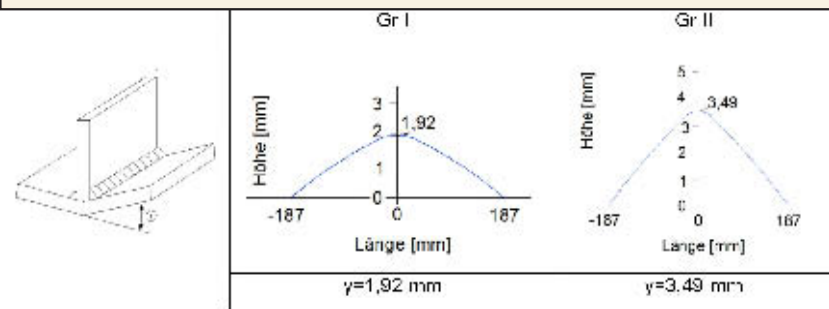


Tabelle 8. Formelapparat zur Bewertung von Winkelversätzen [2]
 Table 8. Formulae for assessment of angular misalignments [2]

Angular misalignment between flat plates

Assuming fixed ends:
 with $\beta = \frac{2y}{t} \sqrt{\frac{13\sigma_m}{E}}$
 $k_m = 1 - \frac{3y}{t} \frac{\tanh(\beta/2)}{\beta/2}$
 altern.: $k_m = 1 - \frac{3\alpha}{2t} \frac{\tanh(\beta/2)}{\beta/2}$

Assuming pinned ends:
 $k_m = 1 - \frac{6y}{t} \frac{\tanh(\beta)}{\beta}$
 altern.: $k_m = 1 - \frac{3\alpha}{t} \frac{\tanh(\beta)}{\beta}$

The tanh correction allows for reduction of angular misalignment due to the straightening of the joint under tensile loading. It is always ≤ 1 and it is conservative to ignore it. σ_m is membrane stress range.

schweißen wurden Typ-K Thermoelemente verwendet, die punktförmig auf die Proben aufgeschweißt wurden. Die Messungen erfolgten bis zur vollständigen Abkühlung. Bei der Auswertung der Messergebnisse stimmten die Temperaturfelder qualitativ und quantitativ überein. Die Lage der Thermoelemente und die dazu gehörigen Temperaturverläufe beim Reparaturschweißen sind Bild 14 zu entnehmen [1].

Eigenspannungsmessungen
 Um die Ungenauigkeit der Eigenspannungsmessungen zu vermeiden, wurden zuerst die Walzhauatrückstände oberflächlich mit einer Druckluft-Strahlmaschine gereinigt. Der Ei-

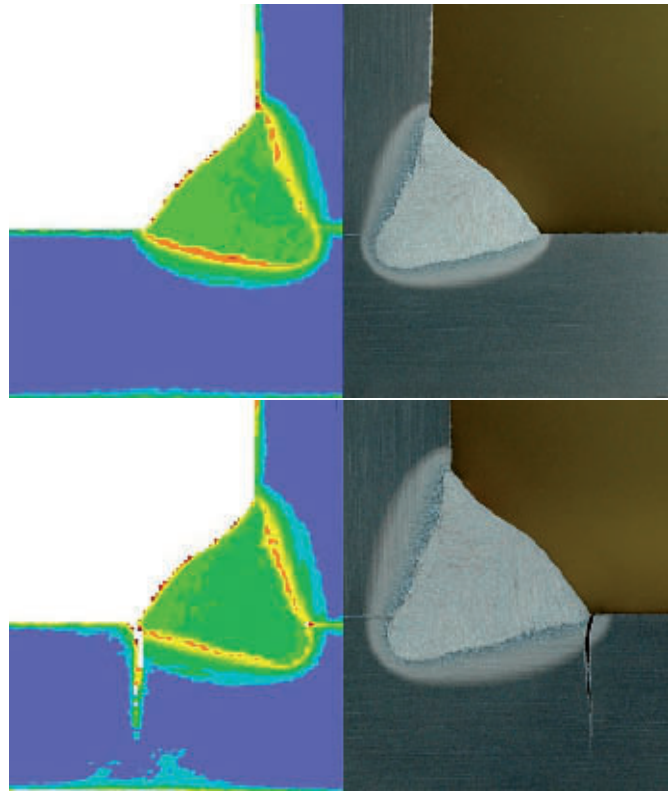


Bild 12. Makroschliff und Härtemessung einer Schwingprobe im Urzustand (oben), zusätzlich mit einem angeschauten Anriss (unten)
 Fig. 12. Macroscopic examination and impact testing of one specimen in original state (top), and additionally with occurred crack (below)

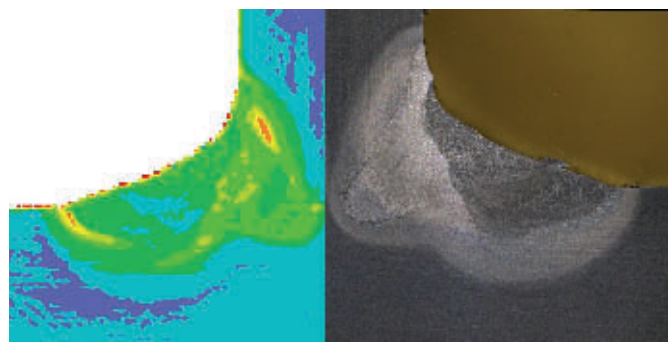


Bild 13. Makroschliff und Härtemessung einer reparaturgeschweißten Schwingprobe [1]
 Fig. 13. Macroscopic examination and impact testing of one specimen after seam repair [1]

telten Werten, wurden Makroschliffe erstellt sowie Härtemessungen mit dem UCI-Verfahren (Ultrasonic Contact Impedanz) durchgeführt. In den Bildern 12 und 15 sind die Makroschliffe und die Auswirkung der Härteverteilungen der Proben im Urzustand sowie nach der Sanierung dargestellt.

Die Probe im Urzustand zeigt deutlich größere Aufhärtungen in der Grobkornzone, die zur Verringerung der örtlichen Duktilität führen und dadurch eine Versprödung bzw. Rissbildung verursacht. Dies ist auf den schnellen Wärmeabfluss und die anschließend schnelle Abkühlung der größeren, MAG-geschweißten Grundplatte zurückzuführen. Infolge der wiederholten Wärmeeinbringung nach der Sanierung hat sich die Grob- und Feinkornzone vergrößert. Da der Sanierungsprozess schon an einzelnen, ausgefrästen Proben durchgeführt wurde, ist die Abkühlgeschwindigkeit langsamer und es sind geringere Aufhärtungen im Grobkornbereich in reparaturgeschweißten Proben zu verzeichnen (Bild 15). Der Makroschliff offenbart, dass die Kerbe der sanierten Schweißnähte am Nahtübergang wesentlich geringer ausfällt. Der größere Kerbradius wirkt sich auf die Dauerschwingfestigkeit positiv aus.

Temperaturmessungen
 Um eine Schweißsimulation durchführen zu können, waren Messungen des Temperaturfeldes nötig. Für Temperaturmessungen während des Schweißens und Wieder-

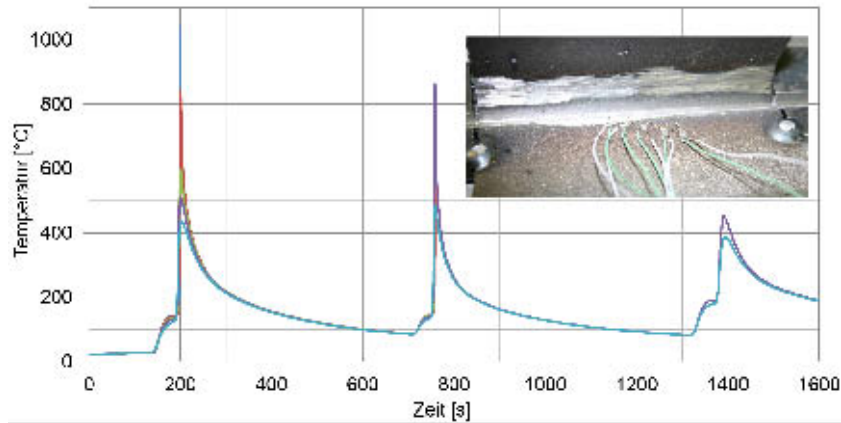


Bild 14. Temperaturverlauf beim 3-lagigen Reparaturschweißen
Fig. 14. Temperature distribution of 3-layers welding process

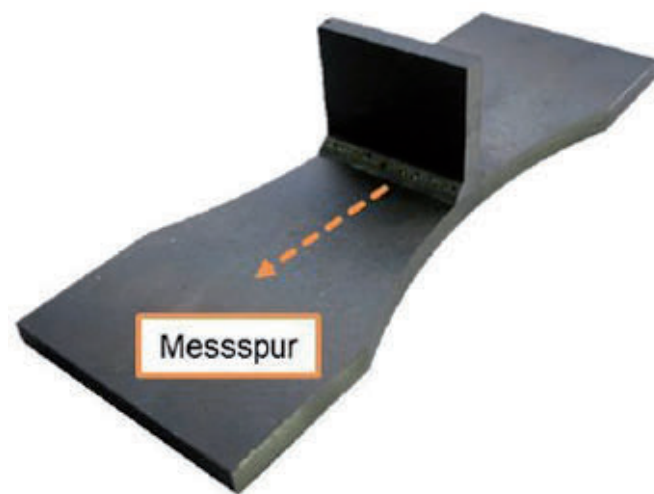


Bild 15. Position der Messlinie für die Quereigenspannungsbestimmung [1]
Fig. 15. Measurement line of transverse residual stress [1]

genspannungsverlauf wurde röntgenographisch mit einem Ψ -Diffraktometer unter Verwendung von CrK_α -Strahlung ermittelt. Bestimmt wurden Quereigenspannungen, bezogen auf die Messlinie beginnend quer von dem Schweißnahtübergang, **Bild 15**. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse von gemessenen und berechneten Eigenspannungen ist im zweiten Teil des Beitrages dargestellt.

6 Schluss

Aus den Ermüdungsversuchen lässt sich folgern, dass die Sanierung der fehlerhaften Schweißungen effektiv war. Es stellt sich die Frage, in welche FAT-Klasse die sanierten

Nähte eingeordnet werden können. Um diese Frage zu beantworten, muss die Ermüdungsfestigkeit für die Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % ermittelt werden. Zusätzlich muss der Einfluss der Imperfektionen in allen drei Bemessungskonzepten berücksichtigt werden.

Dazu war es erforderlich, die Spannungserhöhungsfaktoren k_m zu berechnen, die zur Ermittlung der wahren Struktur- und Kerbspannungen nötig sind. Die Messungen von Temperatur bzw. Eigenspannungen und Verzügen, die in diesem Teil des Beitrages vorgestellt wurden, sind erforderlich, um in Teil 2 des Beitrags die Schweißsimulation durchzuführen.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 54 EBG der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. – FOSTA, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. An dieser Stelle soll allen, die zum Gelingen des Projekts beigetragen haben, gedankt werden, insbesondere der AiF und dem projektbegleitenden Ausschuss für die stetige Bereitschaft zur Diskussion. Die Autoren möchten dem Institut für Schweißen in Gleiwitz, Polen, für die rasche Durchführung der zusätzlichen Ermüdungsversuche danken.

Literatur

- [1] Nitschke-Pagel, T.; Pasternak, H.; Lener, G. et al.: Bemessungskonzepte für Trag- und Dauerfestigkeitsberechnungen von Reparaturschweißungen – Repair welding of structures. Schlussbericht, Forschungsvorhaben P 911/IGF-Nr. 54 EBG, erscheint 2015
- [2] Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components, Doc. IIW XIII-1539-96/XV-845-96, Paris, October 2008
- [3] Morgenstern, C.; Sonsino, C.M.; Hobbacher, A.; Sorbo, F.: Fatigue design of aluminium welded joints by the local stress concept with the fictitious notch radius of $r_f=1$ mm. In: International Journal of Fatigue Vol. 28 (2006), Iss. 8, pp.881-890.
- [4] DIN EN 1993-1-9:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung, Dezember 2010