

Zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für die Lebensdauer von Reparaturschweißungen, Teil 2 – Numerische Untersuchungen und Ermittlung der Schwingfestigkeitsklassen

H. Pasternak, A. Chwastek

Zusammenfassung Der vorliegende Beitrag beschreibt – als zweiter von zwei Teilen – Ergebnisse des durchgeführten Forschungsprojekts über Reparaturschweißungen. Dabei handelt es sich um eine Sanierung, die durch Ausfräsen der fehlerhaften Naht und Reparaturschweißen zustande gekommen ist. Im Beitrag werden numerische Modellierung und Bewertung der Ergebnisse, die zur Ermittlung der Schwingfestigkeitsklassen nach den drei Bemessungskonzepten führt, diskutiert. Die durch Verzüge verursachten Imperfektionen wurden in den Berechnungen berücksichtigt. Eine Schlussfolgerung aus den Untersuchungen ist, dass die Reparaturschweißung mindestens die gleiche Lebensdauer wie die Schweißung im ursprünglichen Zustand hat.

Evolution of Fatigue Assessment of Seams' Repair, Part 2 – Numerical investigations, determination of fatigue strength classes

Abstract This article describes – as second from two parts – results from a research project about repair of welding. The repair was carried out by grinding the flawed seams and re-welding them. The second part encloses numerical analysis and evaluation of results to determine the fatigue strength classes according to three assessment procedures. The imperfections and misalignments were also taken into account. The conclusion from these investigations is that, the repaired welding seams have at least the fatigue life of the original ones.

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

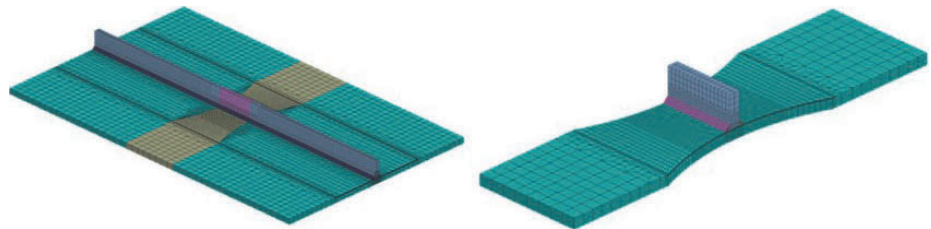


Bild 1. Grundplatte mit aufgeschweißter Quersteife (links) und einzelne Probe (rechts) [2]
Fig. 1. Base plate with transverse attachment (left) and separate specimen (right) [2]

1 Einleitung

Ein Bestandteil der folgenden Untersuchungen ist die Einordnung der Proben nach der Reparaturschweißung in Schwingfestigkeitsklassen, sogenannte FAT-Klassen. Um die Kerbklasse für einzelne Konzepte angeben zu können, musste neben der experimentellen auch numerische bzw. rechnerische Ermittlung der Schwingfestigkeiten durchgeführt werden. Die die Versuche wurden in [1] bereits beschrieben. Dieser Teil bezieht sich auf die Bestimmung der Kerbfälle mithilfe der FEM-Simulationen.

2 Numerische Untersuchungen

2.1 Schweißsimulation

Die Struktursimulation erfolgte so realitätsnah wie möglich. Um dies zu realisieren, wurden Gefügeumwandlungen des Werkstoffs, Werkstoffeigenschaften sowie die Temperaturabhängigkeit des Werkstoffs berücksichtigt. Die Eigenstressungen der Probekörper wurden mit dem Softwarepaket SYSWELD® berechnet. Für die Simulation des Schweißvorgangs ist vor allem die Wärmeauskopplung in den Werkstoff und die geometrische Ausarbeitung der Naht von Bedeutung. Im Voraus wurden durch einen Versuch das Temperaturfeld und ein Makroschliff erstellt. Dies war notwendig um die Ersatzwärmequelle der Simulation entsprechend zu kalibrieren.

Um die Versuchsbedingungen numerisch möglichst genau abzubilden, wurde zunächst die Grundplatte mit aufgeschweißter Quersteife und anschließend das mechanische Ausfräsen der Proben simuliert (Bild 1).



Bild 2. Schematische Darstellung des Reparaturschweißens im numerischen Modell. Detail Kehlnaht (links), ausgefräster Bereich (mitte), Reparaturnaht (rechts) [2]
Fig. 2. Schematic drawing of seams' repair in numerical model. Fillet weld (left), removed prior existed crack (centre), repaired seam (right) [2]

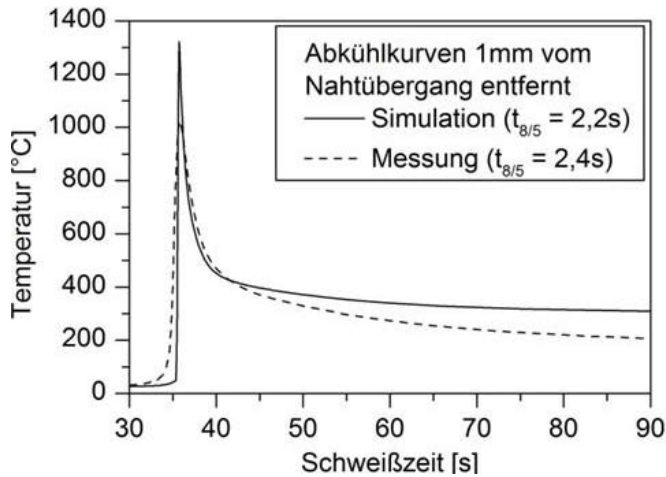


Bild 3. Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverläufe exemplarisch an einem Messpunkt [2]
 Fig. 3. Comparison of measured and computed temperature distribution of one point as an example [2]

Der Arbeitsschritt Reparatur erfolgte wie in der vorherigen Probe ebenso realitätsnah. Ein fehlerhafter Teil einer Kehlnaht und eines Grundwerkstoffes wurde numerisch, wie in den Voraussetzungen des Projektes angegeben „ausgefräst“ und daraufhin wieder verschweißt. In **Bild 2** ist die numerische Betrachtung der Reparaturnaht abgebildet.

In **Bild 3** wurde die Übereinstimmung der Temperaturfelder nach Messungen und Berechnungen für einen Messpunkt gezeigt. Die Abkühlzeiten $t_{8/5}$ von der Messung und Simulation weisen vergleichbare Beträge auf.

Bild 4 enthält die Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Eigenspannungsverläufe für die beiden Zustände. Ein Grund für die quantitativen Abweichungen der Quereigenspannungsberechnungen kann in der Elementierung sowie auf den Lagerungsbedingungen liegen. Im Fall des Urzustands wurde schon nach dem zweiten Ansatz die Optimierung der berechneten und gemessenen Quereigenspannungsverläufe erreicht. Weiterhin zeigten die Ergebnisse für die Sanierung qualitative Übereinstimmung. Die Abweichungen der Werte im Grundwerkstoff wurden

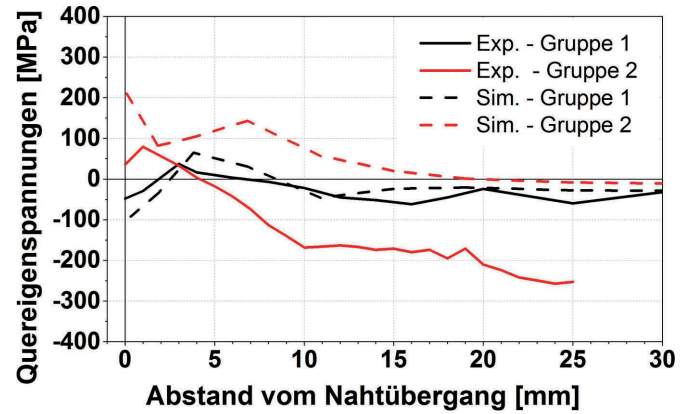


Bild 4. Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Quereigenspannungen im Urzustand (Gruppe I) sowie im reparaturgeschweißten Zustand (Gruppe 2) [2]
 Fig. 4. Comparison of measured and computed transverse residual stress in original state –group I (left) and after seams' repair – group II (right) [2]

wahrscheinlich durch das Kugelstrahlen verursacht. Der Eigenspannungsverlauf am Nahtübergang kann nicht verglichen werden, da der Probekörper mit 3-lagigem E-Hand Schweißen gefügt wurde. Dadurch unterschieden sich die Geometrien je Naht.

2.2 Lokale Spannungen

In diesem Abschnitt werden die unterschiedlichen FE-Modellierungsvarianten, die zur Ermittlung der Struktur- und Kerbspannungen der Schwingprobe führten, vorgestellt. Einige Empfehlungen und Richtlinien zur Bewertung dieser Spannungen lassen sich zum Beispiel in [3], [5] finden. Die Spannungen für die einzelnen Schwingfestigkeitskonzepte wurden mit einer Einheitslast, die bei einem Probenquerschnitt von 650 mm² (an der Schweißnaht) eine Nennspannung von 1,0 N/mm² verursachen, berechnet [5]. Als versagensmaßgebend wird jeweils die 1. Hauptspannung angesehen [5]. Die numerischen Analysen wurden mit dem FE-Programm ABAQUS mit einem im Zugversuch bestimmten E-Modul von 221,9 GPa durchgeführt.

Strukturspannung

Die Strukturspannung wurde bei einer Vernetzung durch Extrapolation über zwei Punkte im Abstand von 0,4t und 1,0t (t = 10 mm) vom Nahtübergang ermittelt, **Bild 5** links [5]. Für die folgenden Berechnungen wurde ein Volumenmodell gewählt, das 20 Knoten-Elemente vom Typ C3D20R (die den acht Gauß-Punkten entsprechen) mit reduzierter quadratischer Iteration nutzt (**Bild 5** rechts). Die Spannung am Hot-Spot resultiert sich aus **Gleichung (1)**:

$$\sigma_{Stru} = 1,67 \sigma_{0,4t} - 0,67 \sigma_{1,0t} \quad (1)$$

Weil die Nennspannung beim Probenquerschnitt 1,0 N/mm² beträgt, entspricht die Strukturspannung bereits dem Spannungskonzentrationsfaktor k_t (eng. stress concentration factor, SCF).

Verschiedene Vernetzungsvarianten wurden genutzt, um die richtigen Spannungsbeträge zu kalibrieren. Die Netze unterschieden sich sowohl in der Anzahl der Elemente zwischen den Extrapolationspunkten als auch durch die Blechdicke. In **Tabelle 1** wurden die durchgeführten Modelle und die daraus berechneten Spannungskonzentrationsfaktoren gegenübergestellt. Der Strukturspannungsfaktor k_t für

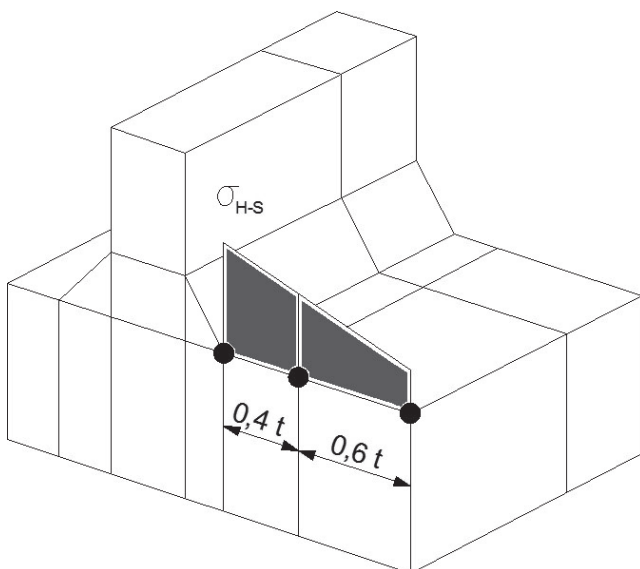


Bild 5. Strukturspannung am konstruktiven Detail (li.), 20-Knoten-Element mit acht Gaußpunkten (re.)
 Fig. 5. Structural stress at constructive detail (left), 20-nodes element with eight gaussian points (right)

Tabelle 1. Gegenüberstellung der FE-Berechnungen für die Strukturspannung
Table 1. Comparison of FE-calculations of structural stress

	Urzustand	Reparaturschweißung
modellierte Naht		
grobe Vernetzung	 $\sigma_{hs,1kN}=1,13N/mm^2$	 $\sigma_{hs,1kN}=1,20N/mm^2$
feine Vernetzung	 $\sigma_{hs,1kN}=1,15N/mm^2$	 $\sigma_{hs,1kN}=1,21N/mm^2$
k_t	1,15	1,20

die originale Probe beträgt $k_t = 1,15$, für die sanierten hingegen $k_t = 1,20$.

Kerbspannung

Nach dem Kerbspannungskonzept wurden die linearen Kerbspannungen numerisch am Neuber-Modell ermittelt. Nach Neuber wird das Ausmaß des Ersatzradius je nach Beanspruchungsfall (ebener Spannungszustand, ebener Dehnungszustand, nichtebener Schub) und gültiger Festigkeits-hypothese unterschiedlich, nach Gleichung (2) bestimmt:

$$r_f = r_r + s \cdot \rho^* \tag{2}$$

worin r_f fiktiv vergrößerter Radius, r_r Ausgangsradius der Kerbe, s Faktor der Mikrostützwirkung und ρ^* Ersatzstrukturlänge ist. Für Strukturstahl gilt $s = 2,5$ und $\rho^* = 0,4\text{mm}$ von Mises. Im schwierigsten Fall, das heißt Ausgangsradius = 0mm liefert die Gleichung (1) $r_r = 1,0\text{mm}$. Erfahrungen aus der Praxis [6], [7] legen zur Zeit nahe, den Kerbradius mit $r_f = 1,0\text{mm}$ anzusetzen, was gute Ergebnisse für die Stahlbauteile der Dicke $\geq 5\text{mm}$ bringt.

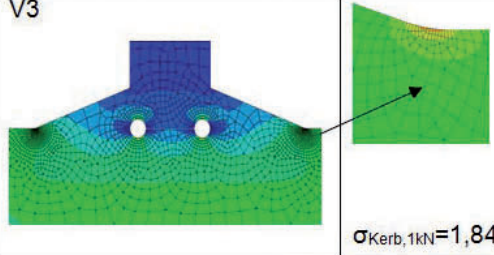
Die Schweißnahtenbrandkerbe wurde in den folgenden Berechnungen mit einem Radius von 1mm ausgerundet und fein vernetzt [5]. Um die Kerbspannungen an der Nahtwurzel zu bestimmen, wurde eine Schlüsselockkerbe und/oder eine zusätzliche Spalte modelliert. Für den originalen

Tabelle 2. Gegenüberstellung der FE-Berechnungen für die Kerbspannung im Urzustand
Table 2. Comparison of FE-calculations of notch stress for original state

	Urzustand	
Schalen	V1	 $\sigma_{Kerb,1kN}=2,07\text{ N/mm}^2$
	V2	 $\sigma_{Kerb,1kN}=2,08\text{ N/mm}^2$
	V3	 $\sigma_{Kerb,1kN}=2,08\text{ N/mm}^2$
Volumen	 $\sigma_{Kerb,1kN}=1,97\text{ N/mm}^2$	
K_t	2,07	

Zustand wurden sowohl ein Schalen- als auch ein Volumenmodell entwickelt. Für das Schalenmodell wurden 8-Knoten Elementen vom Typ S8 verwendet, das Volumenmodell hat die schon beim Strukturspannungskonzept beschriebenen Elemente. Die Tabelle 2 zeigt eine Gegenüberstellung von berechneten Spannungskonzentrationsfaktoren für den Urzustand. Da die Kerbspannungen bei jeder Variante ähnliche Beiträge aufwiesen, kann man für die Reparatur-schweißung nur ein Schalenmodell erstellen (Tabelle 3). Die Kerbspannungen am Nahtübergang sind im Fall solcher Probegeometrie von entscheidender Bedeutung. Der resultierte Kerbspannungsfaktor für die originale Probe betrug $K_t = 2,07$, für die Sanierung aber $K_t = 1,84$. Der niedrigere Wert für die Sanierung resultierte aus den erheblich flacheren Nähten nach der Reparatur.

Tabelle 3. FE-Berechnungen für die Kerbspannung der Reparaturschweißung
Table 3. FE-calculations of notch stress for seam's repair

Reparaturschweißung	
Schalen	V3
	
K _i	1,84

3 Berechnungen der Schwingfestigkeitsklassen

3.1 Statistische Auswertung

Die Bestimmung der charakteristischen Ermüdungsfestigkeitswerte und der dazugehörigen Ermüdungsfestigkeitskurven aus den Versuchsergebnissen wurde in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wird mithilfe einer linearen Regressionsanalyse die mittlere Ermüdungsfestigkeitskurve (50% Überlebenswahrscheinlichkeit, $P_{\bar{U}} = 50\%$,) berechnet. Im zweiten Schritt wird der charakteristische Wert der Ermüdungsfestigkeit als 95%-Quantil für ein Überleben mit einer 75% Vertrauenswahrscheinlichkeit für zwei Millionen Lastwechsel bestimmt [8].

Die Mittelwertkurve aus den Stichproben wird durch eine lineare Regressionslinie auf Basis des üblichen doppelt-logarithmischen ($\log N$, $\log \Delta\sigma$) Wöhlerdiagramms ermittelt. Die Neigung wird als fixiert, $m = -3$ angenommen.

Die Mittelwertkurve ist wie folgt zu berechnen:

$$\log N = \log \Delta\sigma (N = 0) + m \cdot \log \Delta\sigma \quad (3)$$

$$\log \Delta\sigma (N = 0) = \frac{1}{n} \left(\sum \log N_i - m \sum \log \Delta\sigma_i \right) \quad (4)$$

$$\log N_{95} = \log 2 \cdot 10^6 - k_3(n, p, 1 - \alpha) \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\log \Delta\sigma_{50} - \log \Delta\sigma)^2}{\sum (\log \Delta\sigma_i - \log \Delta\sigma)^2}} \quad (5)$$

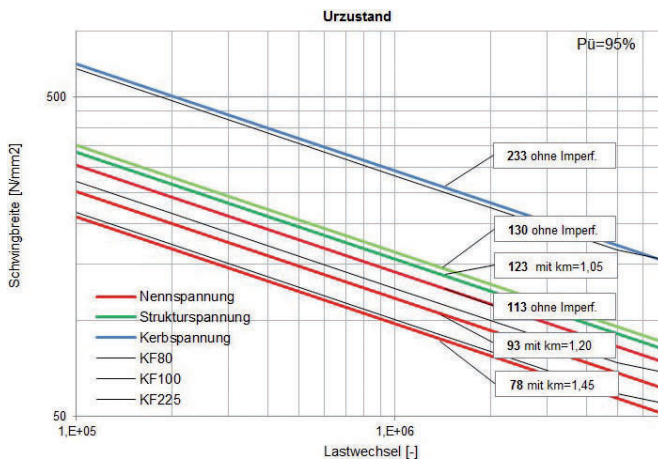


Bild 6. Rechnerische FAT-Klassen für die Schwingprobe im Urzustand nach drei Konzepten
Fig. 6. Calculated FAT-categories for specimen in original state according to three resistance approaches

Um die charakteristische (entsprechend 95 %-Fraktilkurve) Ermüdungsfestigkeit im Sinne des Eurocodes [8] zu entwickeln, musste die Regressionsgerade parallel um das Maß des Produkts von Korrekturfaktor k_3 , Standardabweichung s und Unbestimmtheit der Ausgleichsgeraden verschoben werden. Das Verfahren beruht auf einem einseitigen Toleranzintervall mit einem Konfidenzbereich von 75 % auf Basis einer angenommenen Normalverteilung.

$$\log N_{95} = \log 2 \cdot 10^6 - k_3(n, p, 1 - \alpha) \cdot s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\log \Delta\sigma_{50} - \log \Delta\sigma)^2}{\sum (\log \Delta\sigma_i - \log \Delta\sigma)^2}} \quad (6)$$

Der Faktor $k_3(n, p, 1 - \alpha)$ kann aus Anhang D [9] ermittelt werden.

Die aus der Stichprobe geschätzte Standardabweichung beträgt:

$$\log \Delta\sigma (N = 0) = \frac{1}{n} \left(\sum \log N_i - m \sum \log \Delta\sigma_i \right) \quad (7)$$

mit $\log NLR = \log \Delta\sigma (N = 0) + m \cdot \log \Delta\sigma_i$

3.2 Schwingfestigkeitsklasse nach Nennspannungskonzept

Schweißzustand

In den Schwingfestigkeitsklassen für das Nennspannungskonzept ist ein Winkelversatz von $e = 1 \text{ mm}$ für die Schwingprobe bereits enthalten. Dieser Versatz bewirkt, gegenüber einer idealen Bauteilgeometrie eine Spannungserhöhung um 20 %. [5]. Die FAT-Klasse nach EC [8] für die Schwingprobe ist 80. Nach der statistischen Auswertung der experimentellen Ergebnisse und einer Multiplikation dieser mit dem Spannungserhöhungsfaktor ergibt sich die FAT-Klasse 95. Dieser Vergleich illustriert, dass FAT 80 gemäß EC [8] konservativ ist. Die Werte der FAT-Klassen für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % sind dem Bild 6 zu entnehmen.

Reparaturschweißungen

Die Proben der Gruppe II wurden als typisches Konstruktionsdetail der Schwingprobe nach EC [4] betrachtet. Als Ausgangslage wurde FAT 80 angenommen. Für die Gruppe II wurde die Ermittlung der rechnerischen FAT-Klassen

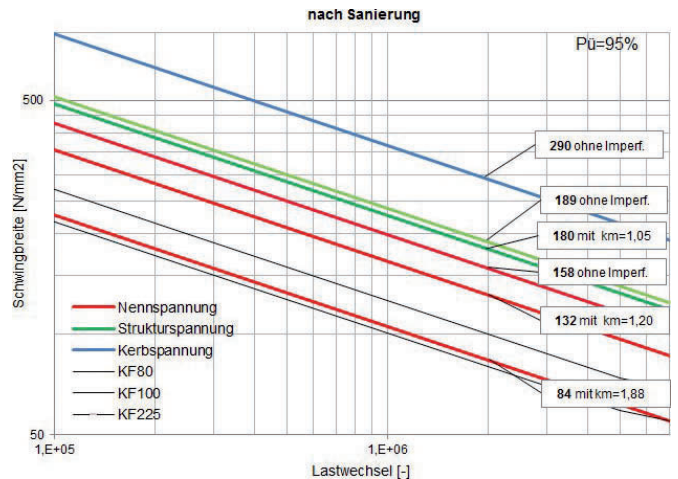


Bild 7. Rechnerische FAT-Klassen für die sanierten Schwingprobe nach drei Konzepten
Fig. 7. Calculated FAT-categories for specimen after seam's repair according to three resistance approaches

analog zur Gruppe I durchgeführt. Man muss hier aber im Voraus sagen, dass die gemessenen Verzüge größere Werte aufwiesen. Die rechnerische FAT-Klasse entspricht dem Kerbfall nach EC [8] mit bereits berücksichtigtem Spannungserhöhungsfaktor von 1,20. Im Bild 7 sind die rechnerischen FAT-Klassen für Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % dargestellt. Die Ergebnisse deuten drauf hin, dass die Schwingfestigkeit für die Reparaturschweißung erheblich höher ist, als der Ausgangswert. Statt 80 liegt der Kerbfall 132 vor. Hierbei ist auch der Spannungserhöhungsfaktor von $k_m = 1,20$ berücksichtigt. Dies ergibt eine Besserung der Schwingfestigkeit von 65 %.

3.3 Schwingfestigkeitsklasse nach Struktur-und Kerbspannungskonzept

Schweißzustand

Damit man Schwingfestigkeitsklasse nach dem Strukturspannungskonzept ermitteln kann, sollten zunächst die Nennspannungen mit dem aus FE-Modellen berechneten Spannungskonzentrationsfaktor $k_t = 1,15$ multipliziert werden. Zusätzlich musste der Spannungserhöhungsfaktor, k_m berücksichtigt werden. Die FAT-Klasse nach EC [8] beinhaltet schon einen Versatz, der einem Wert von 1,05 entspricht. Dieser Versatz muss für die Berechnung der FAT-Klasse beachtet werden, um einen Vergleich mit den Angaben im EC [8] zu ermöglichen. Die Ausgangsbasis bildet hierbei der Strukturspannungskerbfall FAT 100 für die Schwingprobe. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche haben FAT 123 ergeben. Dies entspricht einer um 23 % höheren Schwingfestigkeit als im EC [8] angegeben.

Für das Kerbspannungskonzept legt das IIW-Dokument [6] nur eine FAT-Klasse 225 fest. Unter Berücksichtigung des berechneten Spannungskonzentrationsfaktors, $K_t = 2,07$ ergab sich die FAT-Klasse 233. Man muss hier andeuten, dass die Verbesserung der Schwingfestigkeit mit 3 % nicht bedeutend war. Sowohl FAT 225 [8] als auch die berechnete Klasse FAT 233 berücksichtigen in den Beträgen keinen Einfluss von Imperfektionen. Ein möglicher Winkelversatz soll stattdessen für die Beanspruchungsseite berechnet werden.

Reparaturschweißungen

Die Proben nach der Sanierung zeigten eine deutliche Verbesserung der Schwingfestigkeit gegenüber der Ausgangslage. Der Spannungskonzentrationsfaktor für die Strukturspannungen ist $k_t = 1,2$. Er wurde unter Berücksichtigung verschiedener numerischer Modellen errechnet. Die FAT-Klasse 100 für Strukturspannungen hat einen Spannungserhöhungsfaktor von $k_m = 1,05$. Zusätzlich gibt es den Spannungskonzentrationsfaktor k_t wurden die Proben in die Schwingfestigkeitsklasse 180 zugeordnet. Es zeigt sich eine erhebliche Verbesserung um 80 %.

Für das Kerbspannungskonzept betrug $k_t = 1,84$, was eine FAT-Klasse 290 ergibt. Im Vergleich zu den Angaben gemäß EC [8] (FAT-Klasse 225), bedeutet dies eine Verbesserung um circa 30 %. Wie eingangs erwähnt, sind hierfür alle Imperfektionen des Ermüdungsnachweises auf der Beanspruchungsseite zu berücksichtigen.

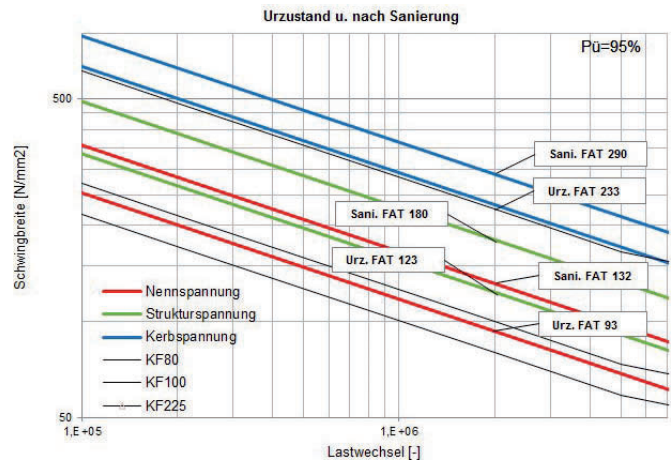


Bild 8. Versuchstechnisch ermittelte FAT-Klassen für den Urzustand und die Reparaturschweißung
Fig. 8. Determined FAT-categories of original state and after seam's repair

4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Im Großen und Ganzen wiesen die sanierten Proben eine erhöhte Schwingfestigkeit auf. Für jedes Nachweiskonzept ist der Betrag der berechneten Schwingfestigkeitsklasse erheblich größer als in den momentan gültigen Normen oder Richtlinien, wie zum Beispiel EC [8] oder IIW-Dokument [6].

Die Ergebnisse des Vorhabens zeigen außerdem, dass der Kerbfall gemäß EC [8] für die aufgeschweißte Quersteife mit Kehlnähten konservativ ist. Dies gilt insbesondere für die Nenn- und Strukturspannungskonzepte, bei denen die ermittelte Verbesserung circa 20 % beträgt. Eine Gegenüberstellung der erstellten Wöhlerlinien ist Bild 8 zu entnehmen. Zusätzlich sind die berechneten FAT-Klassen in Tabelle 4 dargestellt.

5 Schluss

Im Rahmen dieser Untersuchungen konnten Erfahrungen bezüglich handhabbarer Sanierungsprozesse für Schweißnähte gewonnen werden. Des Weiteren unterliegen die ermittelten Ergebnisse der Bemessungsempfehlungen definierten Grenzen, die sich aus den Randbedingungen der Untersuchungen Versuchsrahmen ergeben.

Wird eine geschweißte Verbindung einer zyklisch belasteten Konstruktion saniert, wird der nachfolgende Reparaturprozess empfohlen: Zunächst wird die beschädigte Schweißnaht entlang des Risses ausgeschliffen. Die Rissinitiierung erfolgt dabei in der Regel am Schweißnahtübergang. Das Ausschleifen soll bis zu einer Tiefe von 30 % der

Tabelle 4. Gegenüberstellung der FAT-Klassen
Table 4. Comparison of FAT-categories

Nachweiskonzept	Kerbfall ($P_0 = 95\%$)		
	EC 3 [2]	Urzustand	Reparaturschweiß.
Nennspannung	80	93	132
	$k_m = 1,20$ bereits berücksichtigt		
Strukturspannung	100	123	180
	$k_m = 1,05$ bereits berücksichtigt		
Kerbspannung	225	233	290
	$k_m =$ nicht berücksichtigt		

ursprünglichen Blechdicke vorgenommen werden. Die so vorbereitete Form, wird anschließend mit E-Hand wieder verschweißt. Da der ausgeschliffene Bereich relativ groß ist, wird ein 3-lagiges Schweißen empfohlen. Hierbei sollten sich die erste Lage in der Wurzel und die folgenden zwei Lagen jeweils an den Übergängen befinden (**Bild 2**). Die sich einstellende Nahtdicke entspricht nicht den Abmessungen der Naht im Urzustand. Die Ergebnisse für zyklisch belastete, sanierte Schweißnähte sind in Abschnitt 4 dargestellt. Sie gelten für die folgenden Randbedingungen:

- Spannungsverhältnis der Belastung von $R = 0,1$ (Zugschwellbeanspruchung)
- Imperfektionsanforderungen gemäß IIW-Empfehlungen [6]
- T-Stoß
- Stahlgüte S355
- Nahtdicke von 5 mm
- Blechdicke (Grundmaterial) von 10 mm.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 54 EBG [2] 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.

Literatur

- [1] *Pasternak, H.; Chwastek, A.*: Zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für die Lebensdauer von Reparaturschweißungen, Teil 1: Stand der Technik und Versuche. In: Bauingenieur 90 (2015), Heft 2, S. 47–54.
- [2] *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.
- [3] *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, 2006.
- [4] *Niemi, E.*: Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components. The International Institute of Welding. Abington Publishing, Cambridge, 1995.
- [5] *Schliebner, R.; Vormwald, M.*: Anwendung von FE-basierten Schwingfestigkeitskonzepten auf Mismatch-Kreuzstoßverbindungen, In: Stahlbau 72 (2003), Heft 10, S.725–733.
- [6] *Hobbacher, A.*: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding, Paris, 2008.
- [7] FKM-Guideline. Analytical strength assessment of components in mechanical engineering. Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM), Frankfurt, 2003.
- [8] DIN EN 1993–1–9:2005+AC:2009, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–9: Ermüdung, Dezember 2010
- [9] ISO 16269–6:2014, Statistical interpretation of data – Part 6: Determination of statistical tolerance intervals, 2014

