

Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von neuen und vorhandenen Konstruktionen durch Nachbehandlung mit höherfrequenten Hämmerverfahren

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Dipl.-Ing. Stephanie Breunig (Universität Stuttgart)

1 Was ist Nachbehandlung durch höherfrequente Hämmerverfahren?

Die Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung, die zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen dienen, können grundsätzlich in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

- Verfahren zur Veränderung des Schweißnahtprofils (z.B. durch WIG-Nachbehandlung)
- Verfahren zur Änderung des Eigenspannungszustands (Erzeugung von Druckeigenspannungen am Schweißnahtübergang, z.B. durch Hämmern)

In Forschungsarbeiten, u.a. in REFRESH [18], hat sich gezeigt, dass das Einbringen von Druckeigenspannungen einen deutlich höheren Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat als das Verringern der Kerbschärfe. Als Verfahren stehen beispielsweise das Hämmern, Nadeln oder Teilchenstrahlen zur Verfügung. Das Prinzip der Verfahren ist grundsätzlich gleich, da sich durch die mechanische Oberflächenbehandlung die oberflächennahen Materialschichten elastisch-plastisch kaltverformen und verfestigen und somit sich aus Gleichgewichtsgründen oberflächennahe Druckeigenspannungen einstellen [19]. Höherfrequente Hämmerverfahren (HFH) leisten neben dem Einbringen von Druckeigenspannungen auch in geeigneter Tiefe noch eine Glättung der Kerbschärfe und eine gewisse lokale Materialverfestigung im Nahtübergangsbereich. Sie haben sich in Bezug auf die eingebrachten Druckeigenspannungen als besonders effektiv erwiesen [19], [20], [18], [21]. Zu den gängigen HFH-Verfahren gehören z.B. das Ultrasonic Impact Treatment (UIT) [22] und [23], das Pneumatic Impact Treatment (PIT) [24], das High Frequency Impact Treatment (HiFIT) [25], sowie weitere Verfahren, die im Weiteren nicht näher erläutert werden, siehe auch [26]. Diese Verfahren beruhen auf dem gleichen Prinzip, haben aber eine unterschiedlich starke Marktverbreitung. In Deutschland werden zurzeit vor allem das Pneumatic Impact Treatment (PIT) [24] und das High Frequency Impact Treatment (HiFIT) [25] vertrieben.

Eine Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen zu Wirksamkeit der HFH-Verfahren beziehen sich auf Neubaukonstruktionen, so wurde die HFH-Nachbehandlung in den meisten Fällen direkt nach dem Schweißvorgang durchgeführt, um zu zeigen, dass von Beginn an ein verbesserter Kerbfall erreicht werden kann. Auch sind viele der Untersuchungen für hochfeste Stähle durchgeführt worden. [27] hat zum ersten Mal auch die Wirksamkeit für S235 nachgewiesen, was gerade für die Beurteilung von vorhandenen Stahlwasserbauwerken von Bedeutung ist.

Im Rahmen von [28] werden zurzeit die bisherigen Erkenntnisse zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit zusammengestellt, durch weitere Versuche ergänzt und entsprechende Nachweisverfahren daraus abgeleitet. Dabei werden auch die zahlreichen beeinflussenden Faktoren, wie der Mittelspannungseinfluss oder der Bauteileinfluss untersucht. Diese vorläufigen Ergebnisse werden in

Abschnitt 2 zusammengestellt. Ergebnisse, vor allem aus [27] aus Untersuchungen an Bestands- und reparaturgeschweißten Details werden in Abschnitt 3 und 4 erläutert. Erste Ergebnisse zur Qualitätssicherung gemäß [29] erläutert Abschnitt 5. Abschnitt 6 fasst zusammen und zeigt zukünftige Perspektiven gerade auch für die Bewertung und Verstärkung vorhandener Konstruktionen auf.

2 Erfahrungen mit Höherfrequenten Hämmerverfahren durch Versuche und Entwicklung von Nachweisverfahren

Die Anwendung der HFH-Verfahren zur Erreichung einer Ermüdungsfestigkeitssteigerung setzt die Eignung des vorliegenden Konstruktionsdetails voraus. Hauptkriterium zur Eignung ist der Ausgang des Ermüdungsrisses vom Schweißnahtübergang. Bisher konnte die Wirksamkeit der Anwendung auf den Schweißnahtübergängen von folgenden Konstruktionsdetails bestätigt werden:

- Querbelastete Stumpfnah
- Unbelastete Quersteife
- Unbelastete Längssteife
- Querbiegebeanspruchte Kehlnah

Abbildung 1 zeigt den Einsatz des PIT-Verfahrens an Klein-Probekörpern und Bauteilversuchen aus [28] zum Kerbdetail der unbelasteten Quersteife.



Abbildung 1: Einsatz des HFH-Verfahrens PIT an Klein-Probekörpern und Bauteilprüfkörpern aus [28] zum Kerbdetail der Quersteife

Die beeinflussenden Faktoren werden anhand von Gegenüberstellungen vieler gesammelter Ermüdungsversuchsergebnisse deutlich. Mithilfe einer in [28] entwickelten Datenbank können die verschiedenen Einflussparameter beobachtet und die bisher vorliegenden Nachweisverfahren aus [19], [26] und [30] bewertet und weiterentwickelt werden.

Die Wirksamkeit der HFH-Anwendung auf die verschiedenen Details ist abhängig von den folgenden Faktoren:

- Einfluss der Streckgrenze f_y
- Mittelspannungseinfluss (ausgedrückt durch Spannungsverhältnis R)
- Bauteileinfluss
- Einfluss aus Vorbelastungen

Anhand des folgenden *Wöhler*diagramms, das die in [28] gesammelten Ergebnisse an mit HFH-behandelten Quersteifenversuchen zeigt, wird der Einfluss der Mittelspannung und des Bauteinflusses deutlich. Die Ergebnisse der an Trägern durchgeführten Versuche aus S355 in [28] zeigen allgemein eine niedrigere Ermüdungsfestigkeit als die der zugehörigen Kleinversuche. Dieses Phänomen, lässt sich sowohl an behandelten als auch unbehandelten Ermüdungsversuchen bestätigen. Ein Grund hierfür sind u.a. die durch Zwängungen verursachten größeren Eigenspannungen in den Großbauteilen, die bei Kleinversuchsserien durch die geringen Abmessungen und freie Verformbarkeit weniger auftreten. Dieser Effekt ist vor allem bei der Übertragbarkeit der Ermüdungsfestigkeitsgewinne durch HFH-Verfahren auf reale Bauwerke zu berücksichtigen, da diese in höherem Maße eigenspannungsbehaftet sind. Die durchgeführten Versuche aus [28] und deren Auswertung sind in [31] näher beschrieben.

Auch für Versuche mit einem Spannungsverhältnis $R = 0,5$ konnte ein Zuwachs gegenüber dem ursprünglichen Kerbfall 80 N/mm^2 nach Nennspannungskonzept-Nachweis gemäß DIN EN 1993-1-9 [32] durch die Nachbehandlung bestätigt werden. Der Zuwachs bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ ist wesentlich höher und bei einer Wechselbeanspruchung ($R = -1$) ist ein noch höherer Zuwachs möglich.

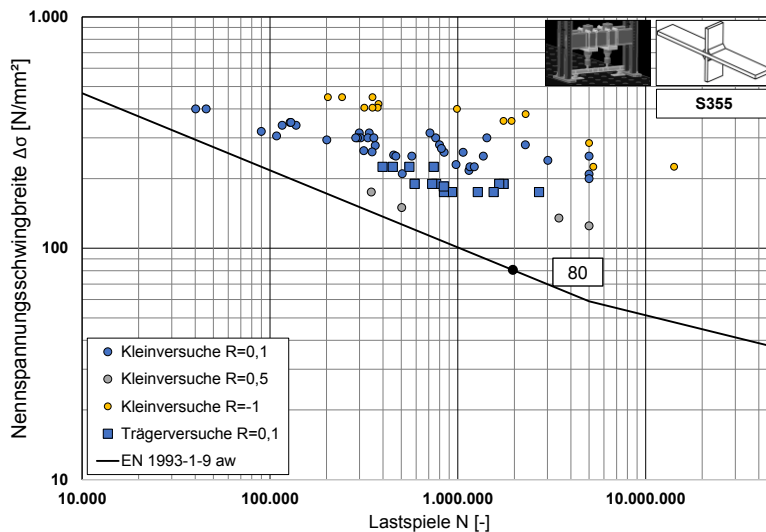


Abbildung 2: Wöhlerkurve Konstruktionsdetail Quersteife – Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse an Träger- und Kleinversuchen mit HFH-Nachbehandlung in Abhängigkeit des Spannungsverhältnisses R aus [28]

Aus Abbildung 2 wird deutlich, dass die Nachweisverfahren alle beeinflussenden Faktoren berücksichtigen sollten und darüber hinaus klare Abgrenzung und Randbedingungen für die Anwendbarkeit enthalten sollten.

Aus den Ergebnissen der genannten Forschungsvorhaben resultieren erste Bemessungsempfehlungen von *Dürr* [19] und *Weich* [30] zur Quantifizierung des Festigkeitsgewinns durch die Nachbehandlung. Außerdem existiert eine Bemessungsempfehlung des *I/W* [26] für verschiedene Details.

In allen drei Fällen entspricht das Vorgehen im Endeffekt einer infolge der Schweißnahtnachbehandlung begründeten Höherstufung der Kerbfallklasse, ähnlich wie es z. B. bei eben beschliffenen Stumpfstößen bereits im Kerbfallkatalog in [32] vorgesehen ist. Die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ wird dabei anhand eines Erhöhungs- bzw. Anpassungsfaktors vorgenommen:

$$\Delta\sigma_{C\cdot imp} = \Delta\sigma_C \cdot k \quad (1)$$

$\Delta\sigma_C$ Referenzwert der Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel (Kerbfallklasse, FAT)

$\Delta\sigma_{C\cdot imp}$ Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel des nachbehandelten (imp = improved) Konstruktionsdetails

k Erhöhungsfaktor

Nach dem von *Dürr* abgeleiteten Ansatz ergibt sich die Ermüdungsfestigkeit in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit des unbehandelten Kerbdetails ($\Delta\sigma_C = 80 \text{ N/mm}^2$). Das heißt, die Kerbfallklasse der nachbehandelten Naht wird durch Multiplikation mit einem Faktor k , der in Form eines Produktansatzes unter Berücksichtigung eines Werkstofffaktors k_f , eines Mittelspannungsfaktors k_R und eines Geometriefaktors k_L bestimmt wird. Die vorgeschlagene Wöhlerlinienneigung von $m = 5$ repräsentiert im Wesentlichen den in den Versuchen beobachteten unteren Wert.

In *Weich* wird die Ermüdungsfestigkeit der nachbehandelten Nähte ebenfalls in Bezug auf die Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ der unbehandelten Nähte unter Berücksichtigung der beiden maßgebenden Einflussparameter Werkstoff und Mittelspannung, die durch die Faktoren k_{fe} und k_R erfasst werden, angegeben, bezogen auf eine Neigung von $m = 5$.

Die jüngste Bemessungsempfehlung des IIW [26] gilt allgemein für alle geschweißten Konstruktionsdetails im Bereich von FAT 50 – FAT 90, die ein Versagen vom Schweißnahtübergang hervorrufen. Die Verbesserung wird durch ein den Kerbfallklassen entsprechendes stufiges Bewertungssystem berücksichtigt. In Abhängigkeit der vorliegenden Bedingungen des Konstruktionsdetails, z.B.: der Streckgrenze, wird das HFH-behandelte Kerbdetail stufenweise bis zu maximal 4 Stufen (z.B. für S960) höher eingeordnet als im Ursprungszustand. Die Berücksichtigung des Mittelspannungsverhältnisses findet durch eine stufenweise Reduzierung, maximal 3 Stufen (z.B. für $R=0,5$) statt.

In [28] wird nun ein Vorschlag erarbeitet, der möglicherweise dieses Stufen-Bewertungsverfahren aus IIW [26] aufgreift, aber die neuen Erkenntnisse und Verbesserungen einarbeitet und das Verfahren auf die Kerbdetails, für die auch Erfahrungen vorliegen, einschränkt.

3 Ermüdungsfestigkeitssteigerung zyklisch vorbelasteter Schweißdetails

Neben der Frage nach der Anwendung von HFH-Verfahren auf geschweißten Konstruktionen aus S235 war ein weiteres Ziel des für BAW mit dem KIT gemeinsam durchgeführten Projektes [27], Erkenntnisse aus zyklisch vorbelasteten und ebenso reparaturgeschweißten Konstruktionen zu

erhalten. Im Zuge des Projekts wurde ein Versuchsprogramm mit 70 Ermüdungsversuchen durchgeführt, das in Tabelle 1 zusammengefasst ist.

Tabelle 1: Versuchsprogramm aus [27] an dem Kerbdetail unbelastete Quersteife aus S235

Serie	Behandlungszustand	Nachbehandlungsverfahren ,Forschungsstelle, Anzahl der durchgeführten Versuche	
		HiFIT KIT, Versuchsanstalt für Stahl Holz und Steine	PIT Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf
1	Geschweißt, unbehandelt	5	5
2	Geschweißt, nachbehandelt	10	10
3	Geschweißt, zyklisch belastet bis zur rechnerischen Lebensdauer, nachbehandelt	10	10
4	Geschweißt, zyklisch belastet bis zum technischen Anriss, Reparatur-Schweißung, nachbehandelt	10	10

Die Serie 1 ist die zu Grunde gelegte Referenzserie, die Erkenntnisse zum Kerbfall der unbelasteten Quersteife im Schweißzustand liefert. Die unbehandelte Referenzserie erreicht gemäß der Auswertung nach [34] bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 95 % eine Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ von 77,9 N/mm² bei 2 Millionen Lastwechseln. Dies entspricht ziemlich genau der nach DIN EN 1993-1-9 [32] ansetzbaren charakteristischen Ermüdungsfestigkeit der Quersteife von 80 N/mm² bei der Anwendung des Nennspannungskonzepts.

Für die Serie 2, die die Nachbehandlung auf Neubaukonstruktionen repräsentiert, konnte mit einem charakteristischen Wert von $\Delta\sigma_c$ 182,3 N/mm² mehr als die doppelte Ermüdungsfestigkeit des ursprünglichen Kerbfalls erreicht werden.

Im Zuge der Serie 3 wurden am Konstruktionsdetail der Quersteife eine zyklische Vorbelastung bis zur rechnerischen Lebensdauer der 95% Überlebenswahrscheinlichkeit durchgeführt, anschließend nachbehandelt und der Prüfkörper bis zum Versagen geprüft. Über die nicht nachbehandelte Referenzserie (Serie 1) konnte zum einen die rechnerische Lebensdauer der einzelnen Spannungsniveaus berechnet und zum andern der Unterschied in der erreichten Lastwechselzahl des Ursprungszustands ermittelt werden. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse.

Im Diagramm in Abbildung 3 ist deutlich zu erkennen, dass eine Nachbehandlung, auch nach einer 100% Vorschädigung (Serie 3) durch die erreichte Lebensdauer einen günstigen Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Somit wird eine charakteristische Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$ von 106 N/mm² (bei einer variablen Wöhlerlinienneigung) erreicht, die sogar über dem ursprünglichen Wert nach DIN EN 1993-1-9 [32] liegt. Voraussetzung für die erfolgreiche HFH-Nachbehandlung bei vorgeschädigten Bestandskonstruktionen ist der Ausschluss von Rissen > 0,5mm nach [18].

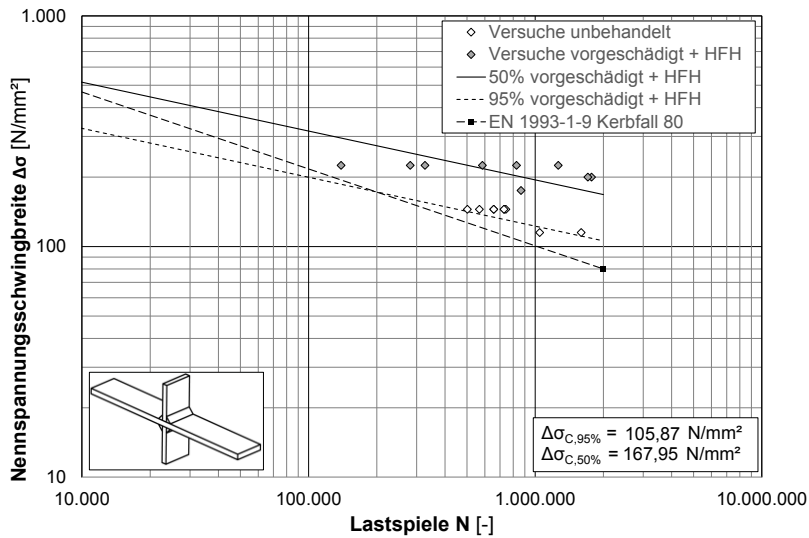


Abbildung 3: Wöhlerkurve Quersteife – HFH-Nachbehandlung nach Vorschädigung S235 aus [27] (ohne Darstellung von Durchläufern)

Neben den Untersuchungen an S235 am Detail der Quersteife in [27] wurden auch im Forschungsprojekt REFRESH [18] u.a. die Lebensdauererlängerung an vorbelasteten Konstruktionsdetails aus S355 sowie S690 untersucht. Betrachtet wurden die Konstruktionsdetails Querstumpfstoß und Längsrippe. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse in Form eines Wöhlerdiagramms der am Querstumpfstoß durchgeführten Versuchsreihe. Für den unbehandelten Zustand wurde eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c$ von 103 N/mm² erreicht.

Die Untersuchungen in [18] haben ergeben, dass die Lebensdauererlängerung einer vorgeschädigten Konstruktion bei einer Risstiefe $a \leq 0,5$ mm erreicht werden kann. Überschreiten die Risse diesen Grenzwert, sollte eine Reparaturschweißung vorgenommen werden.

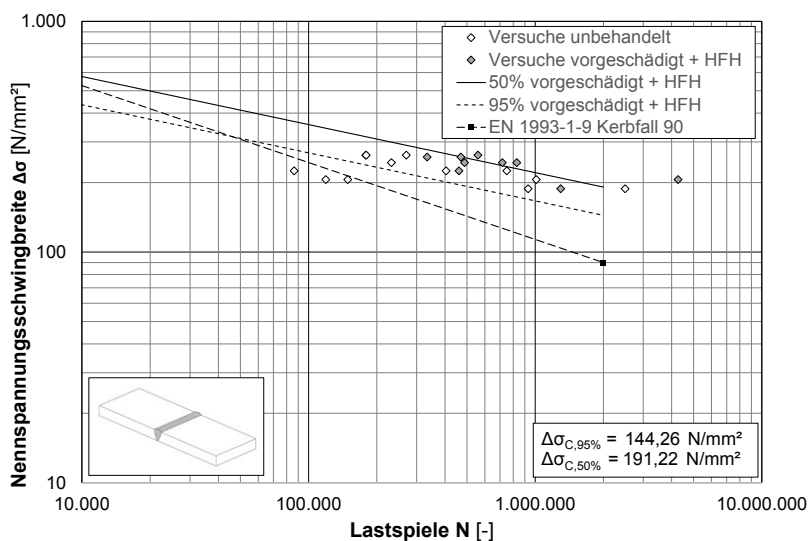


Abbildung 4: Wöhlerkurve Stumpfnah aus S355 - HFH-Nachbehandlung nach Vorschädigung aus [18] (ohne Darstellung von Durchläufern)

4 Ermüdungsfestigkeitssteigerung reparaturgeschweißter Schweißdetails

Wie aus der Literatur und Praxiserfahrungen bekannt ist, stellt das Reparieren von gerissenen geschweißten Konstruktionen hohe Anforderungen an den ausführenden Schweißer und das Prüfpersonal. Neben den Anforderungen an die für die Reparatur zu verwendenden Materialien muss der Riss einschließlich der Risspitze vollständig entfernt werden. In manchen Fällen kann durch die Reparaturschweißung durch Aufbringen mehrerer Schweißnahtlagen gegenüber der ursprünglichen Kerbe ein sehr viel weicherer Nahtübergang erzeugt werden. Das bedeutet, dass die Spannungskonzentration an dem Nahtübergang u. U. sehr viel geringer als beim Ursprungszustand ausfallen kann. Für die HFH-Verfahren ergibt sich jedoch durch einen sehr weichen Schweißnahtübergang eine erschwerte Nachbehandlung, da der konkrete Nahtübergang, an dem sich der Pin des Nachbehandlungsgeräts orientiert, als Führung dient. Es kommt also stark auf die Qualität und geometrische Form der Reparaturschweißung an, ob eine Nachbehandlung eine zusätzliche Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit mit sich bringen kann. Eine frühzeitige Schädigung durch eine HFH-Nachbehandlung gegenüber dem rein reparaturgeschweißten Zustand ist den Autoren nicht bekannt.

Die Erfahrungen aus reparaturgeschweißten Ermüdungsversuchen spiegeln sich in den durchgeführten Versuchen aus [27] wider. Es wurde wieder das Konstruktionsdetail der unbelasteten Quersteife untersucht. Die Versuchskörper wurden in Belastungsstufe 1 bis zum technischen Anriss beansprucht. Die Anrisstiefe betrug 1,5 – 6 mm an den Schweißnahtübergängen. Im Anschluss an Belastungsstufe 1 wurden die Prüfkörper aus der Prüfmaschine ausgebaut, die Risse an den Schweißnahtübergängen mit einem Winkelschleifer bis zum Rissgrund ausgeschliffen und nach der Reinigung der Prüfkörper die Reparaturschweißung mit dem MAG-Verfahren ausgeführt. An den reparierten Kehlnähten wurden an den Quersteifen-Prüfkörpern z.T. Wurzelbindefehler (siehe Abbildung 4) entdeckt, die vor erneuter Prüfung eliminiert wurden. Anschließend wurden alle Schweißnahtübergänge zum Grundblech, auch die, an denen keine Reparaturschweißung durchgeführt wurde, mit HFH nachbehandelt. Dann wurden die Prüfkörper wiederum in die Prüfmaschine eingebaut und in Belastungsstufe 2 bis zum Bruch geprüft. Während der Versuchsdurchführung ergab sich das für die unbelastete Quersteife typische Anrissverhalten, das in Abbildung 5 gezeigt wird. Bei den Versuchen traten die Anrisse an den reparaturgeschweißten Nähten sowie auch an den gegenüberliegenden Nähten auf. Die Ermüdungsbrüche gingen von Wurzelfehlern, der Nachbehandlungszone oder von vorhandenen Rissen aus, die durch die Nachbehandlung überhämmert wurden. In fast allen Fällen wurde in der zweiten Belastungsstufe noch mal mehr als die Lastwechselzahl beim ersten Anriss erreicht. Weniger Lastwechsel oder nur die gleiche Zahl erreichten Versuche, bei denen schon ein Riss, nicht erkannt, vor der HFH Behandlung vorhanden war.

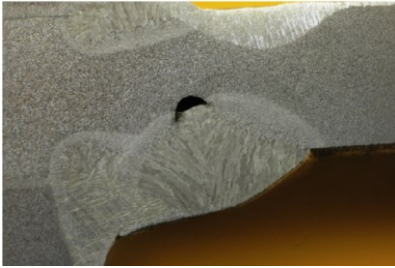


Abbildung 4: Wurzelbindefehler nach Reparatur (Serie 4) aus [27]

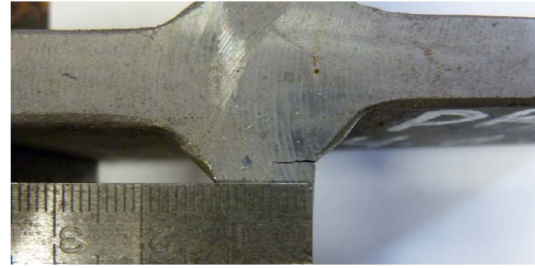


Abbildung 5: Typisches Anriss (Serie 4) aus [27]

Die Ergebnisse der Versuchsdurchführung an den reparaturgeschweißten Nähten aus [27] zeigen, dass unter Berücksichtigung einer variablen Neigung der Wöhlerlinie eine Ermüdungsfestigkeit von 87,6 N/mm² erreicht werden konnte. Das ist geringfügig höher als die Ermüdungsfestigkeit im Ursprungszustand mit 77,9 N/mm² der unbehandelten Referenzserie aus [27], siehe Abbildung 6.

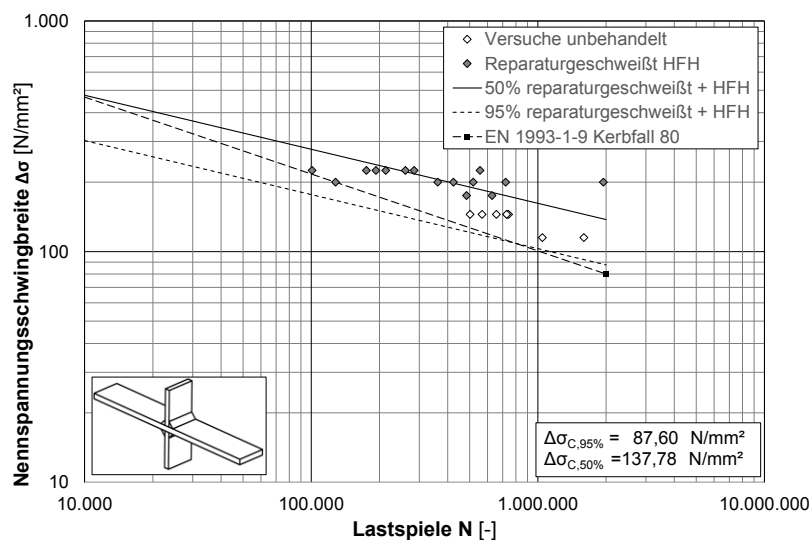


Abbildung 6: Wöhlerkurve Quersteife – HFH-Nachbehandlung nach Reparaturschweißung S235 aus [27] (ohne Darstellung von Durchläufern)

Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung der HFH-Verfahren auf Bestands- und reparierten Konstruktionen ist das Detektieren und anschließende Eliminieren von Rissen. Darüber hinaus macht es Sinn, nicht nur die reparaturgeschweißte Stelle zu behandeln, sondern auch baugleiche Details, die noch keine offensichtlichen Anrisse zeigen.

5 Qualitätssicherung

Ein Hindernis für die Akzeptanz und somit Anwendung der HFH-Verfahren im Stahlbau stellt derzeit die Qualitätssicherung bei der Anwendung der Verfahren dar. Erste Ansätze hinsichtlich der Entwicklung eines einfach handhabbaren Konzepts zur Qualitätssicherung wurden im Rahmen der FOSTA-Kurzstudie [29] verfolgt, wo auch Empfehlungen aus anderen Projekten bewertet wurden.

Die einfachste Form der Qualitätssicherung ist die Sichtprüfung, die auch bei der Prüfung von Schweißnähten als wesentliches Qualitätssicherungselement anerkannt ist. Denn eine erste richtungsweisende Aussage zur Nachbehandlungsspur kann durch optische Merkmale überprüft werden, deren Erkennung man zum Beispiel durch die Herstellung von Vergleichsmustern auch schulen könnte. Nähere Informationen zur Intensität der Ausführung gibt zum Beispiel die Spurtiefe, die als Maßnahme der Qualitätsprüfung bereits im Zuge von [18] vorgestellt wurde. Deshalb wurde auch eine Spurtiefenlehre entwickelt, siehe auch [26]. Als ungeeignet wird der im Rahmen der FOSTA-Kurzstudie [29] untersuchte Almentest bewertet, da das Ergebnis durch den Anwender beeinflussbar ist. Dieser Test ist jedoch einer der in [26] empfohlenen Qualitätssicherungsmaßnahmen.

Neben der Prüfung für die Eignung verschiedener Qualitätssicherungsverfahren wurden in [29] auch die Auswirkungen einer Nachbehandlung mit variierender Intensität auf die Ermüdungsfestigkeit betrachtet. Es konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse der Ermüdungsversuche die mit unterschiedlicher Intensität nachbehandelt wurden, im Streuband der mit normaler Intensität durchgeführten Versuche lag. Die Untersuchungen mit geringer Stichprobengröße lässt darauf schließen, dass eine Nachbehandlung mit schlechter Qualität durch das Auswerteverfahren nach [34] mit der 95% - Überlebenswahrscheinlichkeit - zumindest die bei dieser Versuchsserie betrachtete Abweichung der Qualität - abdeckt. Ein größer angelegtes Versuchsprogramm mit verschiedenen Nachbehandlungsqualitäten und größeren Stichproben könnte helfen die Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit weiter einzugrenzen.

6 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass Höherfrequente Hämmerverfahren für geeignete Schweißnähte ein erfolgreiches Nachbehandlungsverfahren sowohl für Neukonstruktionen als auch für bestehende und reparierte Konstruktionen sind. Das Potenzial der Ermüdungsfestigkeitssteigerung konnte mit diversen Untersuchungsergebnissen unterstrichen werden. Konkrete Bemessungsansätze für Neukonstruktionen wurden vorgestellt und die beeinflussenden Faktoren erläutert. Die Herausforderung bei den vorgeschädigten Konstruktionsdetails ist weniger die Anwendung der Verfahren, sondern die vollständige Detektion der Risse sowie die Qualitätssicherung der Reparaturschweißung. Erste positive Ergebnisse zeigen das Potenzial der Nachbehandlungsverfahren auch in diesen Fällen. Der derzeitige Stand zur Entwicklung der Qualitätssicherung bei der Anwendung der HFH-Verfahren wurde zusammengefasst und mögliche Ansätze für weitere Schritte gegeben. Durch die bisher durchgeführten Forschungsarbeiten wird klar, dass der Fokus zunächst auf Neukonstruktionen lag. Hinsichtlich der Anwendung auf Bestandskonstruktionen sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Randbedingungen einer erfolgreichen Anwendung weiter zu konkretisieren.

7 Dank

Die Autoren des Beitrags bedanken sich für die Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten [27], [28] und [29] bei den Kollegen des Karlsruher Institut für Technik, sowie bei der Bundesanstalt für Wasserbau bzw. bei DAST/Aif und FOSTA/Aif für die Finanzierung und Unterstützung. Des Weiteren gilt ein besonderer Dank den Firmen Pitec GmbH und DYNATEC GmbH für die Unterstützung bei der Nachbehandlung mit den beiden HFH-Verfahren HiFIT und PIT.

Literaturverzeichnis

- [18] Ummenhofer, T., et al.: Lebensdauerverlängerung neuer und bestehender geschweißter Stahlkonstruktionen. REFRESH-Projekt, Forschungsbericht P702, Forschungsvereinigung Stahlanwendung, 2009.
- [19] Dürr, A.: Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung. Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2007.
- [20] Haagensen, P.J., Maddox, S.J.: IIW-Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminum Structures. IIW document XIII-22001-07, International Institute of Welding (IIW), Revised June 2009.
- [21] Nussbaumer, A; Imhof D.: On the practical use of weld improvement methods, in Prog. Struct. Engng Mater. 2001; 3: S. 95-105.
- [22] Imhoff, C.: Argentine Rail Yard Bridges: Using ultrasonic impact treatment to enhance fatigue. In: Bridgeline (2004), Vol. 13, Nr. 2, S. 5-6.
- [23] Kuhlmann, U.; Dürr, A.; Günther, H.-P.: Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit höherfester Baustähle durch Anwendung der UIT-Nachbehandlung, Stahlbau 75 (2006), Heft 11, S. 930-938.
- [24] Gerster, P.: Praktische Anwendungen der PIT Technologie, Stahlbau 78 (2009), Heft 9, S. 680-683.
- [25] Telljohan, G., Dannemeyer, S.: HiFIT – Technische Entwicklung und Anwendung, Stahlbau 78 (2009), Heft 9, S. 622-626.
- [26] Marquis, G. B., Barsoum, Z.: IIW-Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. IIW-WG2_147-15, 2015.
- [27] Kuhlmann, U., Ummenhofer, T., Kudla, K., Weidner, P., Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau, Schlussbericht, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2013.
- [28] Kuhlmann, U., Breunig, S., Ummenhofer, T., Weidner, P.: Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren, laufendes Forschungsprojekt, DAST/Aif Stuttgart/Karlsruhe, 2013-2017.
- [29] Kuhlmann, U., Ummenhofer, T., Breunig, S., Weidner, P., Kudla, K.: Entwicklung eines einfachen Qualitätssicherungstest für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren, FOSTA-Kurzstudie P872, Schlussbericht, 2017.

- [30] Weich, I.: Ermüdungsverhalten mechanisch nachbehandelter Schweißverbindungen in Abhängigkeit des Randschichtzustands. Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2009.
- [31] Breunig, S., Kuhlmann, U.: Increased Service Life of Fatigue Effected Structures through High Frequency Mechanical Impact Treatments, IABSE-Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, September 23-25th 2015, Geneva.
- [32] DIN EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; 2010.
- [33] Kuhlmann, U., Bergmann, J., Dürr, A., Thumser, R.: Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung; AiF-Forschungsvorhaben, Forschungsbericht P620, Forschungsvereinigung Stahlanwendung, 2006.
- [34] Brozetti, J. Hirt, M. A., Ryan, I., Sedlacek, G., Smith, I. F. C.: Background information on fatigue design rules – Statistical evaluation – Chapter 9 – Document 9.01. Eurocode 3 Editorial Group, 1989.