

# Experimentelle und numerische Untersuchungen an mit dem hochfrequenten Hämmerverfahren (HFH) behandelten Schweißverbindungen

Stefanos Gkatzogiannis<sup>1</sup>, Jan Schubnell<sup>2</sup>, Peter Knödel<sup>1</sup>, Majid Farajian<sup>2</sup>,  
Thomas Ummerhofer<sup>1</sup>, Michael Luke<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KIT Stahl- und Leichtbau  
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine  
Otto-Ammann-Platz 1, D-76131 Karlsruhe

<sup>2</sup>Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM  
Wöhlerstraße 11, D-79108 Freiburg

## Kurzfassung

Der aktuelle Beitrag berichtet über Ergebnisse eines abgeschlossenen Forschungsprojektes, das das Ziel hatte, ein experimentell validiertes und handhabbares, numerisches Berechnungskonzept zur Lebensdauerberechnung von mit dem hochfrequenten Hämmerverfahren (HFH) behandelten Schweißverbindungen zu entwickeln. Das Kerbdetail der angeschweißten Querstreifen wurde im Rahmen dieses Projektes experimentell und numerisch untersucht. Exemplarische Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen werden im aktuellen Beitrag dargestellt und diskutiert. Besonderer Fokus liegt auf den Ergebnissen der Ermüdungsversuche an HFH-behandelten Querstreifen aus S355, die die von IIW und DAST Richtlinien vorgeschlagenen FAT-Klasse bestätigen, und der HFH-Prozesssimulation, die mit Finite-Elemente (FE) Analysen durchgeführt wurde. Die Hauptpunkte des angewendeten Modellierungsansatzes werden diskutiert. Die Validierung der Simulationsmodelle erfolgte durch einen direkten Vergleich der simulierten Eigenspannungsprofile mit Eigenspannungsmessungen, die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführt wurden. Es wurde in den meisten Fällen eine zufriedenstellende Genauigkeit zwischen den modellierten und den gemessenen Eigenspannungsprofilen erreicht.

## 1. Einleitung

Das *hochfrequente Hämmerverfahren (HFH)*, auch bekannt unter dem englischen Begriff *High Frequency Impact Treatment (HFMI)*, ist ein vergleichsweise neues Verfahren zur mechanischen Oberflächenbehandlung, welches speziell zur Schweißnahtnachbehandlung entwickelt wurde. Experimentelle Untersuchungen zeigen eine deutliche Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Verbindungen durch die HFH-Nachbehandlung [1]. Eine Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit um mehr als 100 % ist in bestimmten Fällen möglich. Die Effektivität der Methode wurde für viele verschiedenen Geometrien und Wanddicken der nachbehandelten Kerbdetails bestätigt.

Die bisherigen experimentellen Untersuchungen des HFH-Verfahrens, darunter maßgeblich die des KIT<sup>1</sup> [1], haben die Erstellung der Bemessungsrichtlinien für ermüdungsbeanspruchte, HFH-nachbehandelte Bauteile des International Institute of Welding (IIW) 2016 [2] und des Deutschen Ausschusses für Stahlbau DAST 2019 [3] ermöglicht. Die Bemessung auf Basis der DAST-Richtlinie erfolgt durch die Zuordnung der ermüdungsbeanspruchten Bauteile zu Kerbfallklassen ähnlich wie in den vorhandenen Bemessungsrichtlinien für geschweißte Bauteile und Konstruktionen [4], [5]. In der IIW-Richtlinie [2] werden Erhöhungsfaktoren für die Ermüdungsfestigkeit von HFH-behandelten Proben auf Basis ihrer ursprünglichen Kerbfallklassifizierung nach Hobbacher [23] angegeben.

---

<sup>1</sup> Karlsruher Institut für Technologie

Darüber hinaus wurde das Verfahren auch numerisch untersucht ([1], [6] - [11] usw.). Eine mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführte Simulation des Verfahrens kann die Bestimmung des Eigenspannungsfelds [12] und seine Berücksichtigung in einer anschließenden Lebensdauerberechnung ermöglichen. Auf dieser Basis kann eine genauere, weniger konservative Bemessung von HFH-nachbehandelten ermüdungsbeanspruchten Bauteilen erfolgen und die Ermüdungsfestigkeit von komplexeren Geometrien kann ohne die Durchführung von aufwändigen experimentellen Untersuchungen prognostiziert werden. Die wesentliche Voraussetzung für die Erarbeitung zutreffender Ergebnisse durch numerische Untersuchungen ist die Berücksichtigung aller Effekte, die für die genaue Berechnung der Eigenspannungen nach der HFH-Nachbehandlung maßgebend sind. Diese wurden in vielen der oben genannten numerischen Untersuchungen vernachlässigt.

Der aktuelle Beitrag berichtet über die Ergebnisse eines abgeschlossenen Forschungsprojektes mit dem Kurztitel „*HFH-Simulation*“ [13], das das Ziel hatte, ein experimentell validiertes und handhabbares, numerisches Berechnungskonzept zur Lebensdauerberechnung von HFH-behandelten Schweißverbindungen zu entwickeln. Die erzielten Ergebnisse sollten als Basis für nationale und internationale Regelwerke, z.B. in Form von tabellarischen Kerbfallklassen, zur Verfügung gestellt werden. Damit soll ein weiterer Beitrag zum geregelten industriellen Einsatz von HFH geleistet werden.

## **2. Lösungsweg des Forschungsprojektes „*HFH-Simulation*“**

Mit Hilfe einer Werkstoffmodellierung und einer Prozesssimulation wurden numerische Schweißsimulationen durchgeführt und die resultierenden schweißbedingten Eigenspannungsfelder berechnet. Danach wurde die Anwendung des HFH-Verfahrens an den Schweißnahtübergängen simuliert und die resultierenden Eigenspannungsfelder aus Schweiß- und HFH-Eigenspannungen berechnet. Im Rahmen der Simulationsrechnungen wurden die Auswirkungen verschiedener Modellierungsansätze untersucht (Werkstoffmodell, Randbedingungen usw.). Hierdurch wurden werkstoffmechanisch begründete Simulationstechniken etabliert, die die Gewinnung vertiefter Erkenntnisse bezüglich der Vorgänge beim Schweißen und der HFH-Nachbehandlung und der resultierenden Veränderungen des Werkstoffzustandes in der verformten Randschicht ermöglichten. Die numerischen Analysen wurden durch Experimente zur Charakterisierung des Werkstoffzustandes in der Randschichtzone begleitet, um so eine zuverlässige Validierung der Simulationstechniken sicherzustellen. Weiterhin wurden Ermüdungsversuche durchgeführt, um Konzepte zur Lebensdauerberechnung auf Basis gekoppelter FEM-Verfahren und darauf aufbauender Ingenieurkonzepte entwickeln und validieren zu können. Die durch das werkstoffmechanische Konzept abgesicherte und durch experimentellen Untersuchungen validierte Prozedur zur Lebensdauerberechnung von gehämmerten Schweißverbindungen wurde als ein ingenieurmäßiges Tool für die praktische Anwendung umgesetzt und als Empfehlung für relevante Richtlinien und Regelwerken etabliert. Exemplarische Ergebnisse, sowohl der Ermüdungsversuche als auch der HFH-Prozesssimulation, werden im aktuellen Beitrag diskutiert.

## **3. Untersuchte Kerbfallklasse**

Das Kerbdetail der angeschweißten Querstreifen wurde im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojektes „*HFH-Simulation*“ experimentell und numerisch untersucht, da es in Anwendungen des Maschinenbaus und des Bauingenieurwesens häufig vorkommt.

Es wurden Kleinproben und HEA 260 Träger, beide mit beidseits angeschweißten Querstreifen, im Rahmen des Projektes aus S355J2+N, S690QL [14] und S960QL [15] hergestellt und geprüft. Für die Herstellung der Kleinproben wurden Mutterkreuzstöße mit einer Blechdicke von 10 mm geschweißt, HFH-nachbehandelt und abschließend durch Sägen getrennt. Die Geometrie, sowohl der

Mutterkreuzstöße als auch der Kleinproben ist in Abbildung 1 dargestellt. Für die Großbauteilversuche standen Walzprofile HEA 260 aus S355J2+N zur Verfügung, die Träger aus S690QL und S960QL wurden als geschweißte Träger hergestellt, da keine Walzprofile aus diesen Werkstoffen verfügbar waren. Die wichtigsten Schweißparameter für beide Werkstoffe sind in Tabelle 1 angegeben.

Die Träger wurden unter einer 4-Punkt Biegebelastung getestet. Bei allen Trägern wurden drei Quersteifen aus dem jeweiligen Werkstoff beidseits eingeschweißt, um die Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit der zu prüfenden Kerbfallklasse zu ermöglichen. Im Rahmen des aktuellen Projektes wurde der erste angerissene Schweißnahtübergang zur Auswertung herangezogen. Die Ausführungsart der Quersteifen mit Freischnitten wurde deshalb gewählt, da diese im Stahlbrückenbau üblich ist. Die Geometrie der getesteten Träger ist in Abbildung 2 dargestellt.

Erfahrene Anwender der HFH-Gerätehersteller (PIT und HiFIT) haben die HFMI-Nachbehandlung der Proben übernommen. Die Nachbehandlung wurde zu gleichen Teilen mit PITEC- und HiFIT-Geräten und gemäß [2] und [3] durchgeführt.

## **4. Ermüdungsversuche**

### **4.1. Versuchsplanung und Durchführung**

Die Ermüdungsversuche an den Kleinproben wurden axial mit einer Hochfrequenzprüfmaschine Zwick 400 HFP 5100 bei einer Prüffrequenz von 110 Hz und mit einem Spannungsverhältnis  $R = 0,1$  bis zum Durchriss durchgeführt. Die HEA 260 Träger wurden unter Biegebeanspruchung mit einer Frequenz von 0,1 Hz bis 0,3 Hz geprüft ( $R = 0,1$ ). Die Anpassung eines 4-Punkt Biegeversuchsaufbaus an der Schenck 6300 Prüfmaschine der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des KIT ermöglichte die Durchführung der aufwändigen Versuche. Die Versuchsmatrix umfasste Versuche an 89 Kleinproben und 9 Trägern aus allen drei aufgeführten Werkstoffen und in beiden Zuständen „wieggeschweißt“ und „HFH-nachbehandelt“.

Die Planung und Auswertung der Versuche erfolgte mithilfe des Nennspannungskonzeptes. Alle Proben wurden bis zum Durchriss geprüft. Regelmäßige Farbeindringprüfungen während der Versuche an den Großbauteilen (jeweils alle 2.000 LW) ermöglichten die Erkennung des ersten technischen Anrisses im Prüfbereich bei 7 der insgesamt 9 geprüften Träger.

### **4.2. Ergebnisse und Diskussion**

Der Großteil der ermittelten Ergebnisse liegt im Zeitfestigkeitsbereich, die übrigen im Dauerfestigkeitsbereich. 10 Durchläufer, alle im HFH-nachbehandelten Zustand, erreichten ohne eine erkennbare Rissbildung 20 Mio. LW nach denen der Versuch abgebrochen wurde. Bei 8 Kleinproben entstanden die Ermüdungsriss im Einspannbereich oder im Grundmaterial. Bei den restlichen 71 Kleinproben lag der Ermüdungsriss im Schweißnahtübergang. Der Anriss ging in 16 Fällen trotz der oben beschriebenen Nachbehandlung der Kanten von den Rändern des Schweißnahtübergangs aus.

Die Versuche an HEA Trägern lieferten ähnliche Ergebnisse wie die an den Kleinproben. Alle Ergebnisse der Großbauteile liegen im Zeitfestigkeitsbereich. Die Rissausgangsorte der Träger unterschieden sich signifikant. Anrisse traten innerhalb und außerhalb des Prüfbereichs, im Grundmaterial und am Steg der geprüften Träger auf. Eine ausführliche Darstellung der Rissausgangsorte, auch für die Großbauteile, ist in [13] zusammen mit Bildern aller Anrisse zu finden.

Die Ergebnisse der Versuchsserien aus S355J2+N im wie geschweißten (Versuchsserie „AW\_S355“) und HFH-behandelten Zustand (Versuchsserie „HFMI\_S355“) sowie deren mittlere und

charakteristische Wöhlerlinien für freie und feste Neigung sind exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt. Die Mittelwertkurve der Serie AW\_S355 liegt für eine frei berechnete Neigung von 3,3 bei  $2 \times 10^6$  LW bei  $103 \text{ N/mm}^2$ . Die charakteristische Ermüdungsfestigkeit der Serie AW\_S355 bestätigt die zugeordnete Kerbfallklasse 80 und eine Neigung der Wöhlerlinie von  $m = 3$  ( $\Delta\sigma_{c,95\%} = 93,7 \text{ N/mm}^2$  und  $m_{\text{frei}} = 3,3$ ). Metallografische Untersuchungen der statistischen Ausreißer zeigten, dass einige Proben an einzelnen Nahtübergängen ungenügend nachbehandelt wurden. Diese Proben wurden deshalb aus der statistischen Auswertung ausgeschlossen. Die Mittelwertkurve der Serie HFMI\_S355 liegt für eine frei berechnete Neigung von  $m = 9,3$  bei  $2 \times 10^6$  LW bei  $237 \text{ N/mm}^2$ . Die charakteristische Ermüdungsfestigkeit der Versuche HFMI\_S355 liegt für eine feste Neigung von  $m = 5$  bei  $147 \text{ N/mm}^2$  und bestätigt die in [2] vorgeschlagene FAT-Klasse 140. Die Annahme einer Neigung von  $m = 5$  ist konservativ, wenn die Dauerfestigkeit untersucht wird. Damit bestätigen die aktuellen Ergebnisse nochmals den positiven Effekt einer HFH-Nachbehandlung auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter Proben aus S355. Die Ergebnisse der Großbauteile liegen innerhalb der Ergebniswolke der Kleinproben. Aus den vorliegenden Ergebnissen ist ersichtlich, dass der Maßstabeffekt hier keinen Einfluss auf die Effektivität der HFH-Nachbehandlung hat.

## 5. FE Simulation des hochfrequenten Hämmerverfahrens

### 5.1. Ausgangspunkt

Voraussetzung für die Lieferung vertrauenswürdiger Ergebnisse durch numerische Untersuchungen ist die Berücksichtigung aller Effekte, die für die ausreichend genaue Berechnung der Eigenspannungen nach einer HFH-Nachbehandlung maßgebend sind. Die Validierung des Simulationsmodells kann durch einen direkten Vergleich der simulierten Eigenspannungsprofile mit Eigenspannungsmessungen erfolgen. Effekte, von denen anzunehmen ist, dass sie einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der simulierten Eigenspannungsprofile haben können, sind zum Beispiel die Dehnratenabhängigkeit des nachbehandelten Werkstoffes, die vorhandenen Schweißeigenspannungen, die Modellierung des Kontakts zwischen dem Pin und dem nachbehandelten Werkstoff etc.

### 5.2. Modellierungsansatz

Für die Simulation der HFH-Nachbehandlung ist die Durchführung einer vollständigen transienten Berechnung erforderlich. Dafür wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens die kommerziellen Softwarepakete ANSYS Workbench 18.2 und ABAQUS Version 6.14 eingesetzt. Als Solver wurden LS DYNA R10.1.0 bzw. ABAQUS Explicit verwendet, die entsprechende Rechenzeiteffizienz und Robustheit bei großen FE-Modellen zeigten und die Anwendung von vergleichsweise einfachen Kontaktbedingungen zulassen.

Die Modellierung der gesamten Geometrie der untersuchten Proben war mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung nicht möglich. Um die Rechenzeit zu reduzieren, wurde im aktuellen Modell lediglich eine Teilgeometrie unter Ausnutzung von Symmetriebedingungen betrachtet (Abbildung 4). Aus dem gleichen Grund wurde nur die Nachbehandlung eines Schweißnahtübergangs modelliert. Sehr feine Vernetzung wurde nur im Bereich des Schweißnahtübergangs, an dem die HFH-Nachbehandlung erfolgt, um die Rechenzeit zu begrenzen. Vorherige Konvergenzanalysen zeigten, dass bei Verwendung von Elementen mit linearem Ansatz eine Netzfeinheit mit Elementabmessungen kleiner als  $1/40$  des Pinradius  $R_{\text{pin}}$  im Nachbehandlungsbereich erforderlich ist [18]. Ebenfalls aus Gründen der Rechenzeit wurde eine gröbere Vernetzung außerhalb dieses feinvernetzten Volumens verwendet (siehe Abbildung 4).

Die Pinbewegung wurde sowohl kraftgesteuert<sup>2</sup> ( $V_y$  / VUAMP-Subroutine in Abbildung 4) als auch verschiebungsgesteuert ( $u_y$  in Abbildung 4) simuliert. Zur kraftgesteuerten Modellierung des HFH-Prozesses ist eine Ermittlung der Aufschlaggeschwindigkeit erforderlich [7]. Eine Messung der Stauchung des HFH-Pins mit Dehnungsmessstreifen und Transientenmessverstärker wurde mit einer Abtastrate von 100 kHz (siehe Abbildung 5) durchgeführt. Ähnliche Messungen wurden schon in [6], [10] und [17] beschrieben. Die gemessene Kontaktkraft bzw. die Stauchung des Pins wurden wie in vorhergehenden Untersuchungen auf Basis einer linear-elastischen FE-Analyse mit der Aufschlaggeschwindigkeit korreliert [19].

Der Vorschub des Pins entlang des Schweißnahtübergangs zwischen aufeinanderfolgenden Schlägen wurde verschiebungsgesteuert modelliert ( $u_z$  / VDISP-Subroutine in Abbildung 4). Eine ausreichende Überlappung ist zwischen benachbarten HFH-Schlägen erforderlich, um die Tiefe der HFH-Spur und die Eigenspannungen ausreichend genau zu simulieren. Der Einfluss der Überlappung wurde in [20] und [21] ausführlich erläutert. Anhand der gemessenen Fortschrittsgeschwindigkeit und Schlagfrequenz der zwei Nachbehandlungsverfahren wurden die HiFIT- und PITEC-Nachbehandlung mit einem Übergang bzw. mit drei Übergängen modelliert. Die unterschiedlichen Pinradien beider Geräte wurden dabei berücksichtigt.

Für die in Abbildung 4 dargestellte HFH-Prozesssimulation wurde die gegenüberliegende Seite vollständig in allen Raumrichtungen fixiert. Die Eigenspannungen nach dem Schweißprozess wurden als Anfangsbedingung für die HFH-Simulation im FE-Modell berücksichtigt. Die Umsetzungen der Materialmodelle von Cowper-Symonds (KIT / LS-Dyna) und Chaboche (IWM / ABAQUS) ermöglichten die Berücksichtigung der Dehnratenabhängigkeit der Streckgrenze in der WEZ<sup>3</sup>. Die Kalibrierung der angewendeten Werkstoffgesetze erfolgte auf Basis der im Rahmen des Forschungsprojektes ermittelten Werkstoffeigenschaften für die WEZ und den Grundwerkstoff.

### 5.3. Ergebnisse und Diskussion

Zum Vergleich mit den Neutronenbeugungsmessungen [22] wurden die Tiefenprofile des Eigenspannungszustandes nach der HFH-Behandlung aus den FE-Modellen über äquivalente Bereiche bzw. Volumen gemittelt und ausgelesen. Zum Vergleich des Eigenspannungszustandes an der Oberfläche wurden die Spannungen im FE-Modell ebenfalls über den gleichen Bereich wie bei den Röntgenbeugungsmessungen gemittelt und ausgelesen. Die Eigenspannungstiefenprofile wurden dabei jeweils in der Mitte der HFH-behandelten Spur in der Mitte des Kleinprüfkörpers ermittelt. Der Vergleich zwischen den numerisch ermittelten Eigenspannungswerten (Sim.) und den experimentell ermittelten Eigenspannungswerten (Exp.) ist in Abbildung 6 für die Kleinprüfkörper aus S355J2+N dargestellt. Dabei beziehen sich die Ergebnisse des Fraunhofer IWM auf die Simulationsergebnisse, die mit dem ABAQUS Modell ermittelt wurden und die Ergebnisse des KIT auf die Ergebnisse, die mit dem LS-DYNA Modell generiert wurden. Die Simulationen der Proben aus S960QL lieferten ähnliche Ergebnisse.

Beim direkten Vergleich zwischen den numerisch und experimentell ermittelten Eigenspannungswerten wurde festgestellt, dass beide verwendete FE-Modelle dazu tendieren, die Beträge der Druckeigenspannungen in Querrichtung zu überschätzen. In Längsrichtung werden die Beträge der Druckeigenspannungen jedoch unterschätzt. Beide FE-Modelle geben jedoch den deutlichen Unterschied der Druckeigenspannungen zwischen der PITEC-Behandlung und der HiFIT-Behandlung wieder. Ebenfalls können beide Modelle die Wirtktiefe der Druckeigenspannung zwischen 2 mm (S960QL) und 3 mm (S355J2+N) ausreichend genau wiedergeben.

---

<sup>2</sup> kraftgesteuerte und geschwindigkeitsgesteuerte Modellierungsansätze sind äquivalent: Eine Kraft beschleunigt den Pin auf eine bestimmte Anschlaggeschwindigkeit

<sup>3</sup> Wärmeeinflusszone

Eine signifikante Abweichung ist nur zwischen den am KIT modellierten und den gemessenen Profilen der PITEC-Nachbehandlung vorhanden. Die Anwendung von vereinfachten bilinearen Werkstoffgesetzen ist der Grund für diese Ungenauigkeit. Es soll hier nochmals erwähnt werden, dass die aktuelle Simulationsreihe eine dreilagige Nachbehandlung für die PITEC-Proben anhand der gemessenen Fortschrittgeschwindigkeit und Aufschlagfrequenz voraussetzt. Damit erhöht sich die Anzahl der modellierten Aufschläge und folglich die der auftretenden Plastizitätszyklen. Die verwendete Werkstoffmodellierung kann jedoch diese erhöhte Anzahl von Plastizitätszyklen nicht realistisch abbilden. Dadurch tritt eine nicht vernachlässigbare Abweichung von ca. 20 % in Bezug auf die Streckgrenze auf. Im Fall der HiFIT-Nachbehandlung, die einlagig, aber mit ähnlicher Schrittweite simuliert wird, war die Anzahl von Plastizitätszyklen deutlich geringer. Der Einfluss der einfacheren Werkstoffmodellierung war hier vernachlässigbar und es wurde eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht.

## 6. Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens „*HFH-Simulation*“ [13] war die Entwicklung eines experimentell validierten und handhabbaren numerischen Berechnungskonzeptes zur Lebensdauerberechnung von HFH-behandelten Schweißverbindungen. Dabei sollte insbesondere der Eigenspannungszustand nach dem Hochfrequenzhämmern berücksichtigt werden. Außerdem, sollten die Anwendung des HFH-Verfahrens und das entsprechende Berechnungskonzept auf komplexere Bauteile übertragen werden. Die entsprechenden Untersuchungen wurden dabei am Nahtdetail der Quersteife aus den Grundwerkstoffen S355J2+N, S690QL und S960QL durchgeführt. Die Bestimmung des Eigenspannungszustandes vor und nach dem Hochfrequenzhämmern wurde mit Finite Elemente Simulationen durchgeführt. In meisten Fällen wurde eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht. Die Grundlage für die Anpassung entsprechender Verfestigungsmodelle war dabei eine ausführliche Charakterisierung der Grundwerkstoffe, die im Rahmen des den Untersuchungen zugrundeliegenden Forschungsprojektes durchgeführt wurde.

Ermüdungsversuche wurden an Kleinproben und Großbauteilen aus den Stählen S355J2+N, S690QL und S960QL und in beiden Zuständen „wie-geschweißt“ und „HFH-nachbehandelt“ durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war die Quantifizierung des Einflusses des HFH auf die Ermüdungsfestigkeit der untersuchten Quersteife und die Bestätigung der vom IIW [4] und DAST [3] vorgeschlagenen FAT-Klassen. Die Planung und Auswertung der Ermüdungsversuche erfolgte mit Hilfe des Nennspannungskonzeptes. Die Mehrheit der ermittelten Ergebnisse liegt im Zeitfestigkeitsbereich. Die Versuche an Großbauteilen lieferten ähnliche Ergebnisse wie an den Kleinproben. Damit kann ein Bauteileffekt, der die Effektivität der HFH-Nachbehandlung beeinflusst, ausgeschlossen werden. Darüber hinaus bestätigen die aktuellen Ergebnisse der Ermüdungsversuche die von IIW [4] und DAST [3] vorgeschlagene FAT-Klasse 140 für die HFH-nachbehandelten Quersteifen aus S355.

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nummer 19.227 N/DVS-Nummer 09.080 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Autoren danken dem Fördermittelgeber und der Forschungsvereinigung sowie dem projektbegleitenden Ausschuss für die bereitgestellten Probekörper und die fachliche Unterstützung.

## Literatur

- [1] Ummenhofer T.; *REFRESH: Lebensdauererlängerung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen*, Abschlussbericht D 761, KIT Stahl- und Leichtbau, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe, 2009.
- [2] Marquis G. B., Barsoum Z.; *IIW Recommendations for the HFMI Treatment – For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints*, 1<sup>st</sup> Edition, Springer Singapore (IIW Collection), Singapore, 2016.
- [3] DASt–Richtlinie 026; *Ermüdungsbemessung bei Anwendung höherfrequenter Hämmervverfahren*, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Düsseldorf, 2019.
- [4] Hobbacher A.; *IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*, WRC, New York, 2009.
- [5] EN 1993-1-9; *Eurocode 3 - Design of Steel Structures - Part 1-9: Fatigue*, 2009.
- [6] Foehrenbach J., Hardenacke V., Farajian M.; High Frequency Mechanical Impact Treatment (HFMI) for the Fatigue Improvement: Numerical and Experimental Investigations to describe the Condition in the Surface Layer, *Welding in the World* **60** (4), pp. 749–755, 2016.
- [7] Hardenacke V., Farajian M., Siegele D.; *Modelling and Simulation of the High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment of Welded Joints*, IIW Commission XIII, Doc. XIII-2533-14, 2014.
- [8] Kuhlmann U.; *Experimentelle Untersuchungen zur ermüdungssteigernden Wirkung des PIT-Verfahrens*, Versuchsbericht, Institut für Konstruktion und Entwurf, Schwerpunkte: Stahlbau, Holzbau und Verbundbau, Universität Stuttgart, 2009.
- [9] Kuilin Y., Sumi Y.; Simulation of Residual Stress and Fatigue Strength of Welded Joints Under the Effects of Ultrasonic Impact Treatment (UIT), *International Journal of Fatigue* **92**, pp. 321-332, 2016.
- [10] Simunek D., Leitner M., Stoschka M.; *Numerical Simulation Loop to Investigate the Local Fatigue Behaviour of Welded and HFMI-Treated Joints*, IIW Document XIII-WG2-136-13, 2013.
- [11] Yuan K. L., Sumi Y.; Modelling of Ultrasonic Impact Treatment (UIT) of Welded Joints and its Effect on Fatigue Strength, *Frattura ed Integrità Strutturale* **34**, pp. 476–486, 2015.
- [12] Foehrenbach J., Hardenacke V., Farajian M., Luke M.; *Fatigue Life Calculation of High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treated Welded Joints by means of Numerical Process Simulation and Critical Plane Approaches*, IIW Commission XIII, Doc. XIII-2637-16, 2016.
- [13] Luke T., Ummenhofer T., Farajian M., Knoedel P., Schubnell J., Gkatzogiannis S.; *Rechnergestütztes Bewertungstool zum Nachweis der Lebensdauererlängerung von mit dem Hochfrequenz-Hämmervverfahren (HFMI) behandelten Schweißverbindungen aus hochfesten Stählen*, Abschlussbericht DVS 09069 – IGF 19227 N, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg und KIT Stahl- und Leichtbau, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruhe, 2019.
- [14] DIN EN 10025-2:2019-10; *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle*.
- [15] DIN EN 10025-6:2018-07; *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand; Deutsche Fassung prEN 10025-6:2011*.
- [16] DIN EN ISO 15614-1:2017-12; *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißverfahrensprüfung - Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen*.
- [17] Baptista R., Infante V., Branco C.; Fully Dynamic Numerical Simulation of the Hammer Peening Fatigue Life Improvement Technique, *Procedia Eng.* **10**, pp. 1943–1948, 2011.
- [18] Gkatzogiannis S., Knoedel P., Ummenhofer T.; FE Simulation of High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment – First Results, *Proceeding of NORDIC STEEL 2019, The 14th Nordic Steel*

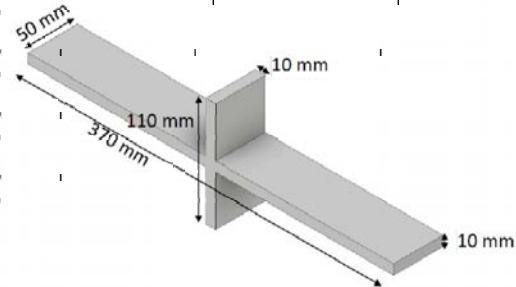
*Construction Conference, Copenhagen 18–20 September 2019, ce/papers* **3** (3-4), pp. 797-802, Ernst & Sohn, 2019.

- [19] Ernould C.; *Numerical Simulation of Pin Kinetic and its Influence on the Material Hardening, Residual Stress Field and Topography during High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment*, Master Thesis, KIT Karlsruhe, 2017.
- [20] Schubnell J., Eichheimer C., Ernould C., Maciolek A., Rebelo-Kornmeier J., Farajian M.; The Influence of Coverage for High Frequency Mechanical Impact Treatment of Different Steel Grades, *Journal of Materials Processing Technology* **277**, 116437, 2020.
- [21] Gkatzogiannis S.; *Finite Element Simulation of Residual Stresses from Welding and High Frequency Hammer Peening*, Doctoral Dissertation, Doctoral Examination Passed on 10/06/2020, to be published in 2020.
- [22] Schubnell J., Carl E., Farajian M., Gkatzogiannis S., Knödel P., Ummenhofer T., Wimpory R., Eslami H.; Residual Stress Relaxation in HFMI-Treated Fillet Welds After Single Overload Peaks, *Welding in the World* **64**, pp. 1107–1117, 2020.



Tabelle 1: Schweißparameter

Werkstoff	Prozess	Elektroden- durchmesser [mm]	Strom [A]	Lichtbogen- spannung [V]	Draht- vorschub [mm/min]	Schweiß- geschwindigkeit [mm/min]	Wärme- einbringung [kJ/mm]
S355 Kreuzstoß	135 mit Robotern	1,2	246 – 249	29,5	100	10,0	8,9
S690/S960 Kreuzstoß	135	1	155 – 175	24,5	100	10,0	5,9
S690/S960 HEA 260	135	1	185 – 205	28,5	100	10,0	9,9



(a)

(b)

Abbildung 1: Geometrie des Mutterkreuzstoßes (a) und der gefertigten Kleinproben (b)

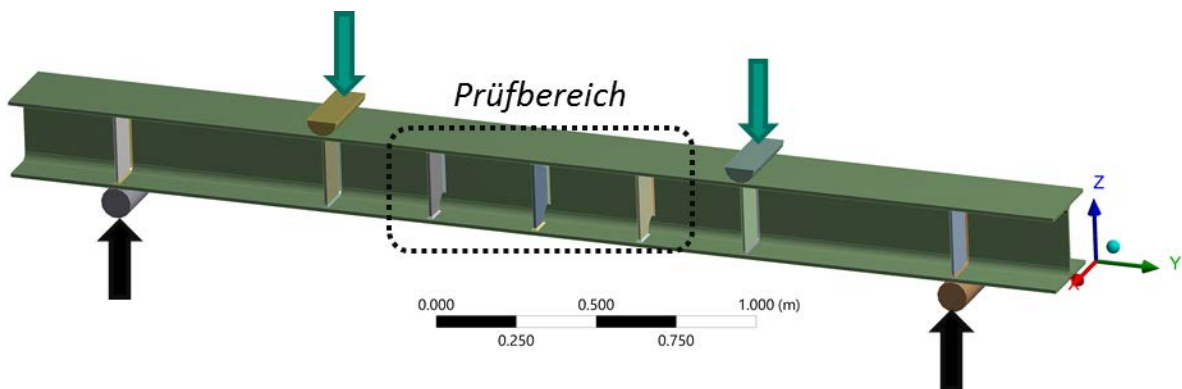


Abbildung 2: Geometrie der Versuchskörper HEA 260 mit Lasteinleitung (grüne Pfeile) und Auflagern (schwarze Pfeile)

Symbol	Versuchsreihe	m	$? s_{c,50\%}$	$? s_{c,95\%}$
		[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
■	AW_S355	frei	3,2	103
		fest	3,0	99
◆	HFMI_S355	frei	9,3	237
		fest	5,0	213

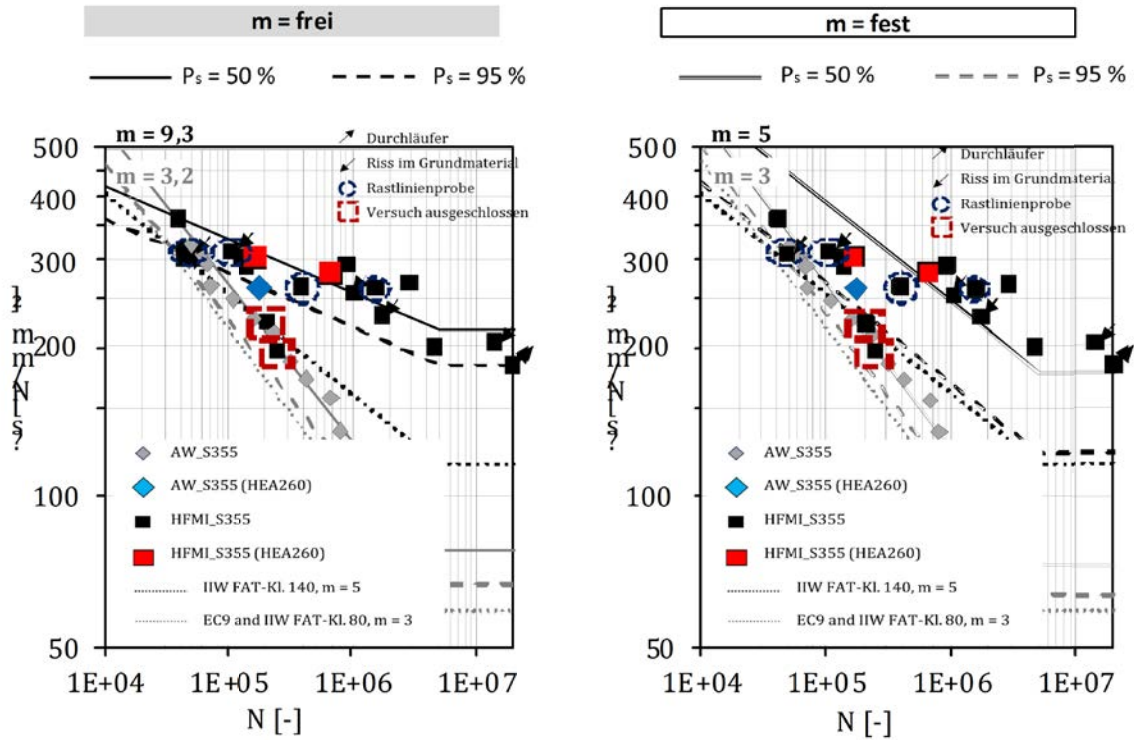


Abbildung 3: Ergebnisse der Ermüdungsversuche an Proben aus S355J2+N

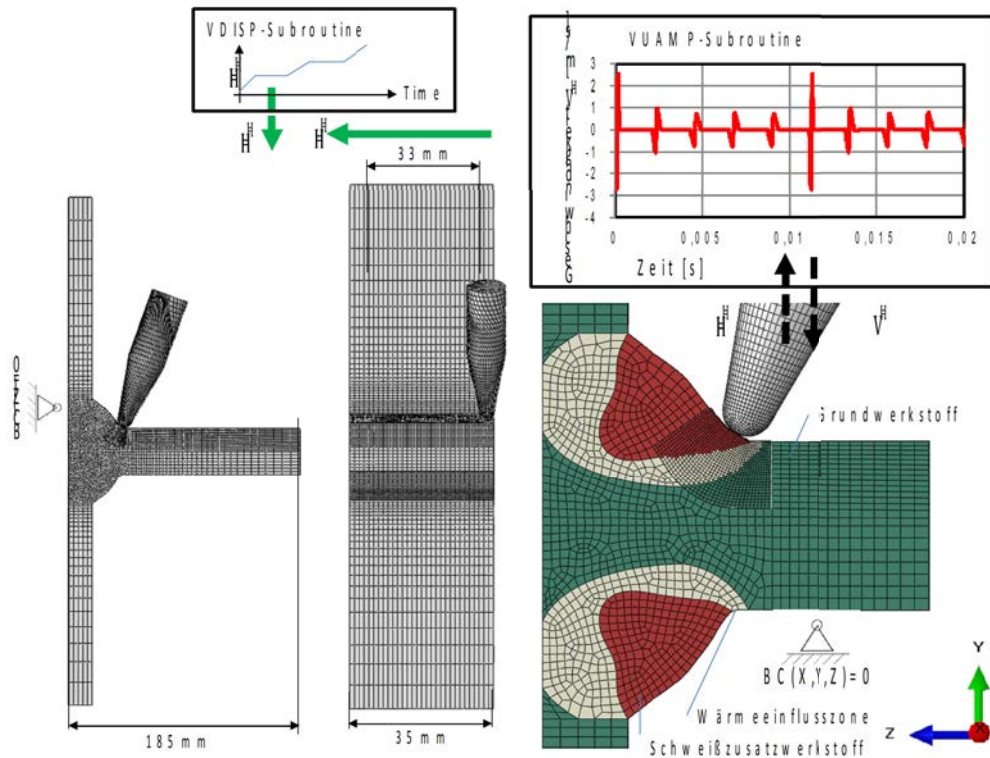


Abbildung 4: 3D-FE Modell der HFH-Simulation der Kleinprüfkörper in ABAQUS (IWM)

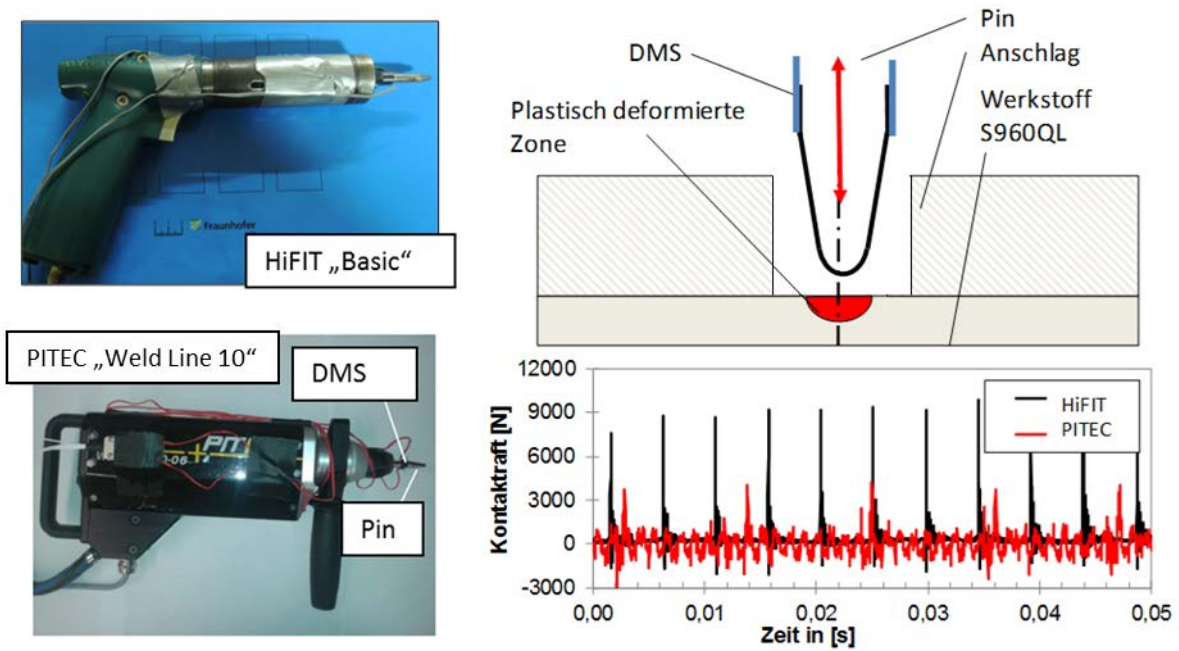


Abbildung 5: Messung der Kontaktkraft der HFH-Werkzeuge

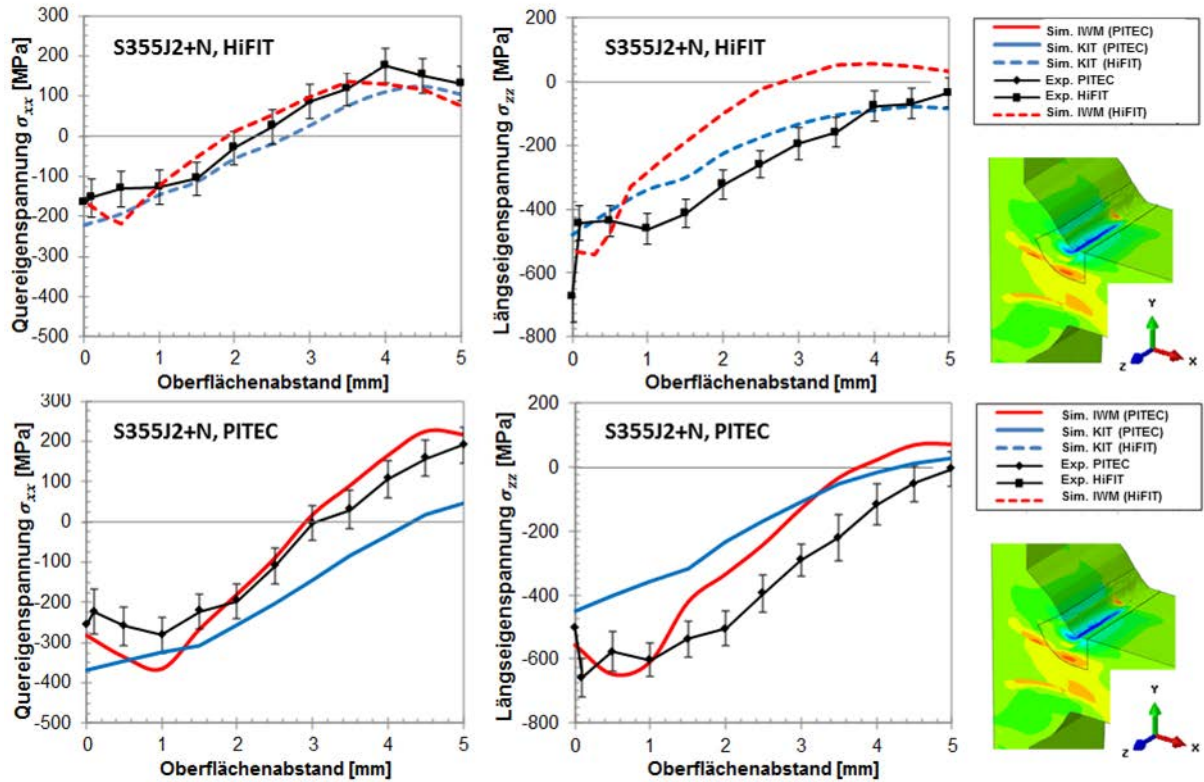


Abbildung 6: Vergleich zwischen den Eigenspannungen der FE-Simulation (Sim.) und den experimentell ermittelten Eigenspannungen (Exp.) für die Kleinprüfkörper aus S355J2+N