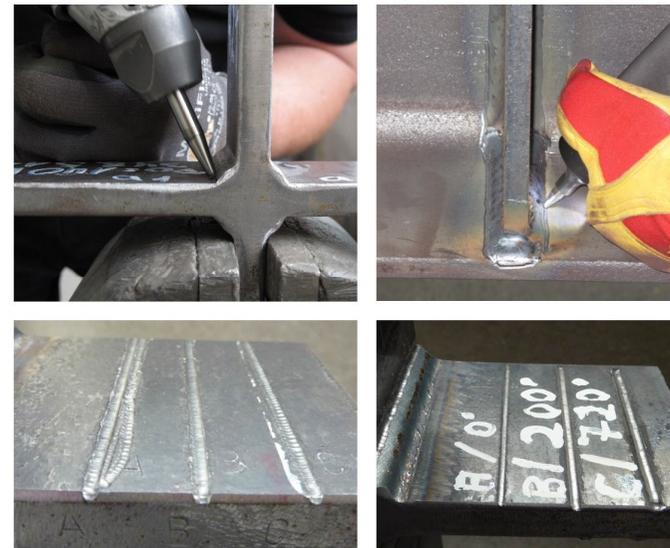


Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
Postfach 10 48 42
40039 Düsseldorf
Sohnstr. 65
40237 Düsseldorf



fosta@stahlforschung.de
www.stahlforschung.de



Entwicklung eines einfachen Qualitäts- sicherungstests für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren

Development of a simple quality assurance
test for the application of high frequency
mechanical impact treatment techniques

Forschung für die Praxis P 872

Forschungsvorhaben P 872 / S 24/10176/10

Entwicklung eines einfachen Qualitätssicherungstests für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren

Development of a simple quality assurance test for the application of high frequency mechanical impact treatment techniques

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Dipl.-Ing. Philipp Weidner

Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Dr.-Ing. Konrad Kudla, SFI

Dipl.-Ing. Stephanie Breunig

Verantwortlich für die FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

Dr. Gregor Nüsse M.Sc.

Das Forschungsvorhaben wurde an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine am Karlsruher Institut für Technologie und am Institut für Konstruktion und Entwurf an der Universität Stuttgart mit fachlicher Begleitung und mit finanzieller Förderung durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, aus Mitteln der Stiftung Stahlanwendungsforschung, Essen, durchgeführt.

© 2020 Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Düsseldorf

Printed in Germany

Bestell-Nr. P 872
ISBN 978-3-946885-71-9

Ansprechpartner bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.:
Dr. Gregor Nüsse M.Sc.
Tel.: +49 (0)211 / 6707-856

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, bleiben vorbehalten. Ohne schriftliche Genehmigung des Verlages sind Vervielfältigungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen nicht gestattet.

Kurzdarstellung

Die ermüdungsfestigkeitssteigernde Wirkung von höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH) konnte an einer Vielzahl von für die Nachbehandlung geeigneter Konstruktionsdetails nachgewiesen werden.

Eine zuverlässige Anwendung von HFH-Verfahren setzt neben anerkannten Regeln für die Bemessung und der Qualifizierung von Anwendern auch die Qualifizierung und Qualitätssicherung des Geräts bzw. seiner Betriebseinstellungen voraus. Darüber hinaus ist der Nachweis einer ausreichenden Nachbehandlungsqualität am Bauteil erforderlich. Hierbei scheinen zunächst drei verschiedene Ansätze möglich, die im Rahmen dieser Kurzstudie und einem parallel dazu laufenden DAST-Forschungsprojekt untersucht wurden. Insbesondere wurden die nachfolgend dargestellten Ansätze auf ihre Wirksamkeit und einfache Durchführbarkeit hin überprüft:

1. Analog zum Almen-Test beim Kugelstrahlen sollte ein auf die HFH-Verfahren angepasster Teststreifen entwickelt werden. Nach erfolgter HFH-Behandlung des Teststreifens sollte anhand der Durchbiegung dieses Teststreifens die Intensität der Nachbehandlung bestimmt bzw. überprüft werden können.
2. Ermittlung der Eindringtiefe. Anhand eines Abgleichs einer 3D-Lasermessung vor und nach der Nachbehandlung kann die Eindringtiefe ermittelt werden. Die Eindringtiefe soll als Parameter zur Abschätzung der Intensität der Nachbehandlung dienen.
3. Untersuchungen mit Härtemessungen an nachbehandelten und unbehandelten Schweißnahtübergängen haben Differenzen in der Härte ergeben. Eventuell kann die Qualität der Nachbehandlung anhand des Härtevergleichs beurteilt werden.

Ziel dieser Kurzstudie ist es, ein einfaches und praxisgeeignetes Qualitätssicherungsverfahren zu entwickeln, das unter den üblichen Herstellbedingungen angewendet werden kann. Die Wirksamkeit der Anwendung der HFH-Verfahren soll ebenfalls gewährleistet werden.

Im Ergebnis wird eine Kombination, bestehend aus einer einfachen Sichtprüfung der Nachbehandlungspur am Bauwerk und einer Stichprobe mit definiertem Härteprüfungsaufwand für die Qualitätssicherung der höherfrequenten Hämmerverfahren vorgeschlagen. Im Rahmen der Sichtprüfung müssen dann entsprechende Lehren zur Messung und Dokumentation der Eindringtiefen zum Einsatz kommen. Weiterführende Eigenspannungsmessungen könnten gegebenenfalls zur Verifizierung zulässiger Härtewerte beitragen und Aufschluss über die eingebrachten Druckeigenspannungen infolge variierten Intensitäten geben.

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.

März 2020

Abstract

The effect of increased fatigue strength by application of high frequency mechanical impact treatments (HFMI) could be verified on several types of welded joints, which are appropriate for this kind of post-weld treatment. In addition to accepted guidelines for the fatigue design of treated welds, the qualification of users as well as the qualification and quality assurance of the equipment is necessary for a reliable application of these techniques. Therefore, generally three methods are generally considered. In this study and in a parallel running DAST research project, specimens have been used to verify the efficiency and feasibility:

1. According to the Almen Test known from shot peening, a test strip for high frequency mechanical impact treatment was developed. Based on the deflection of this test strip, the intensity of a post-weld treatment could be checked.
2. Based on a comparison of 3D-laser-measurements before and after a post-weld treatment, the depth of indentation can be determined. The depth of indentation is a relevant parameter for the estimation of the quality of a treatment.
3. Investigations of hardness measurements on treated and untreated welds have shown differences in the hardness values. A possibility has been investigated to evaluate the quality of a treatment based on measured hardness values.

The objective of this study was to develop simple and practice-friendly procedures for quality assurance tests, which may also be applied on site. Based on these procedures the process reliability of the high frequency mechanical impact treatment techniques can be ensured.

As a result, a combination consisting of a simple visual inspection of the post-treatment track on the structure and a random sample with defined hardness testing effort is proposed for the quality assurance of the higher-frequency hammering methods. Within the scope of the visual inspection, appropriate gauges must then be used to measure and document the indentation depths. Further residual stress measurements could, if necessary, contribute to the verification of permissible hardness values and provide information about the residual compressive stresses introduced as a result of varying intensities.

FOSTA - Research Association for Steel Application

March 2020

Inhaltsverzeichnis / Content

1	Einleitung - Introduction	1
2	Aktueller Stand der Forschung und Entwicklung – Current state of research and development	3
2.1	Visuelle Inspektion – Visual inspection.....	3
2.1.1	Empfehlung - Recommendation.....	3
2.1.2	Beurteilung – Evaluation of method.....	4
2.2	Spurtiefenmessung mithilfe einer Tiefenlehre – Measurement of depth of groove with depth gauge	5
2.2.1	Empfehlung - Recommendation.....	5
2.2.2	Beurteilung der Methode – Evaluation of method	6
2.3	Almen-Test - Almen-Test.....	7
3	Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study	9
3.1	Allgemein - General.....	9
3.2	Almen-Test – Almen-Test.....	10
3.2.1	Motivation für den Einsatz des Almen-Tests beim Kugelstrahlen – Motivation for the use of the Almen-Test for shot peening applications	10
3.2.2	Almen-Test als Qualitätssicherungstest beim Kugelstrahlen – Almen-Test as quality assurance test for shot-peening applications	11
3.2.3	Almen-Test zur Qualitätssicherung bei der Anwendung der HFH-Verfahren – Almen-Test for quality assurance test of HFMI-treatments	13
3.3	3D-Laser-Scan – 3D-Laser-Scan	15
3.3.1	Allgemein - General.....	15
3.3.2	Vorgehensweise – Approach	15
3.3.3	Durchführung - Execution.....	17
3.3.4	Messergebnisse – Measured results.....	19
3.3.5	Motivation - Motivation	24
3.3.6	Entwicklung und Durchführung – Development and execution	24
3.3.7	Ergebnisse und Beurteilung der 3D-Laser-Messungen – Results of 3D-laser-measurements and evaluation of results.....	25
3.4	Visuelle Inspektion – Visual inspection.....	26
3.4.1	Durchführung - Execution.....	26
3.4.2	Beurteilung – Evaluation of method.....	27
3.5	Härtemessungen – Hardness measurements	27
3.5.1	Motivation - Motivation	27

3.5.2	Allgemeines zur Härteprüfung nach Vickers nach [2] – General information on Vickers hardness testing according to [2].....	29
3.5.3	Anforderungen an die Probe – Requirements concerning the specimen	29
3.5.4	Vorgehen bei der Härtemessung – Approach of hardness measurements.....	30
3.5.5	Durchführung der Härtemessungen – Execution of hardness measurements.....	32
3.6	Auswertung der Härtemessungen an den mit PIT-nachbehandelten Spuren – Evaluation of Vickers hardness of PIT-treated grooves.....	35
3.6.1	Härtemessungen im Querschnitt unter der Nachbehandlungsspur – Vickers hardness at cross section below PIT-groove.....	35
3.6.2	Härtemessungen im Längsschnitt unter der Nachbehandlungsspur - Vickers hardness at longitudinal section below PIT-groove.....	36
3.6.3	Geometrie der Pineindrücke - Geometry of indentation.....	38
3.6.4	Schlussfolgerung - Conclusion.....	40
3.7	Auswertung der Härtemessungen an Behandlungsspuren der mit HiFIT-nachbehandelten Proben – Evaluation of Vickers hardness of HiFIT-treated grooves.....	40
3.7.1	Härtemessungen im Querschnitt unter der Nachbehandlungsspur - Vickers hardness at cross section below HiFIT-groove.....	40
3.7.2	Härtemessungen längs unter der Nachbehandlungsspur - Vickers hardness at longitudinal section below HiFIT-groove.....	41
3.8	Vergleich der Härtemessungen der beiden Verfahren – Comparison of Vickers hardness of the two HFMI-treatments.....	42
3.8.1	Vergleich der Härtemessungen im Querschnitt unter den HiFIT- und PIT-behandelten Proben – Comparison of Vickers hardness values of cross sections below HiFIT- and PIT-grooves.....	42
3.8.2	Auswertung der Härtemessungen im Längsschnitt unter den HiFIT- und PIT- Behandlungsspuren - Comparison of Vickers hardness at longitudinal sections below HiFIT- and PIT-grooves.....	43
3.8.3	Schlussfolgerung - Conclusion.....	44
3.8.4	Ausblick - Outlook.....	45
4	Ermüdungsversuche unter Variation der Intensität – Fatigue tests under variation of intensity.....	47
4.1	Allgemeines – General information.....	47
4.2	Nachbehandlung - HFMI-treatment.....	49
4.3	Versuchsdurchführung – Experimental procedure.....	50
4.4	Versuchsergebnisse – Test results.....	50
4.5	Zusammenfassung – Conclusion.....	51

5 Fazit und Ausblick – Conclusion and outlook.....53

Abbildungsverzeichnis / List of figures

<i>Abbildung 1.1: Die vier Aspekte der Qualitätssicherung zur Anwendung der HFH-Verfahren</i>	2
<i>Abbildung 2.1: HiFIT Spur</i>	4
<i>Abbildung 2.2: PIT Spur</i>	4
<i>Abbildung 2.3: HiFIT Spur am Grundmaterial</i>	5
<i>Abbildung 2.4: PIT Spur am Schweißnahtübergang</i>	5
<i>Abbildung 2.5: Spurtiefenmessung mit Lehre gemäß [6]</i>	6
<i>Abbildung 3.1: Übersicht möglicher Testverfahren</i>	10
<i>Abbildung 3.2: Bogenhöhe der Almen-Testplättchen in Abhängigkeit der Strahlzeit mit unterschiedlicher Strahlintensität (oben) und verschiedenen Korndurchmessern (unten) [13]</i>	12
<i>Abbildung 3.3: Dauerfestigkeit von Stumpfstößen aus verschiedenen hochfesten Baustählen nach dem Kugelstrahlen mit unterschiedlicher Strahlintensität und unterschiedlichen Korngrößen des Strahlmittels [13]</i>	13
<i>Abbildung 3.4: Vorversuche Almen-Test in Blechquerrichtung</i>	14
<i>Abbildung 3.5: Vorversuche Almen-Test in Blechlängsrichtung</i>	14
<i>Abbildung 3.6: HFH-Behandlung am Nahtübergang der Quersteifen, PIT (links) und HiFIT (rechts)</i>	16
<i>Abbildung 3.7: HFH-Behandlung am Grundmaterial der Steifen, PIT (links) und HiFIT (rechts), Intensitäten: niedrig (A), optimal (B) und hoch (rechts)</i>	16
<i>Abbildung 3.8: Kontur-Plot eines PIT-behandelten Probekörpers</i>	17
<i>Abbildung 3.9: Kontur-Plot der HiFIT-behandelten Steife, Behandlung mit verschiedenen Intensitäten</i>	17
<i>Abbildung 3.10: Nahtgeometrieparameter vor der HFH-Behandlung</i>	18
<i>Abbildung 3.11: Definition der Nahtgeometrieparameter nach der HFH-Behandlung</i>	18
<i>Abbildung 3.12: Erklärung Box-Plot [8]</i>	19
<i>Abbildung 3.13: Gemessene Kerbradien vor und nach der HFH-Behandlung</i>	20
<i>Abbildung 3.14: Gemessene Eindrücktiefen in vertikaler und in Anstellrichtung</i>	21
<i>Abbildung 3.15: Vertikale Eindrücktiefe (oben) und horizontale Eindrucksbreite (unten) für verschiedene Intensitäten einer HiFIT-Behandlung (A: 0°, B: 200°, C: 270°)</i>	22
<i>Abbildung 3.16: 3D-Laser-Scan-Gerät</i>	24
<i>Abbildung 3.17: Messfeld</i>	24
<i>Abbildung 3.18: Gemessene Abweichungen vor und nach der HFH-Behandlung (Isometrie)</i>	25
<i>Abbildung 3.19: Gemessene Abweichungen vor und nach der HFH-Behandlung (Querschnitt)</i>	26
<i>Abbildung 3.20: Nachbehandelter Schweißnahtübergang mit Restkerbe</i>	26
<i>Abbildung 3.21: Härtemessungen an nachbehandelten Proben aus S355J2 aus [12]</i>	28
<i>Abbildung 3.22: Prüfprinzip der Härteprüfung nach Vickers gemäß [2]</i>	29
<i>Abbildung 3.23: Härtemessungen im Rahmen eines Vorversuchs am Grundwerkstoff (GWS)</i>	30
<i>Abbildung 3.24: 3 Nachbehandlungsspuren unterschiedlicher Intensität</i>	31
<i>Abbildung 3.25: Anordnung der Makroschliffe an den PIT-Behandlungsspuren</i>	32
<i>Abbildung 3.26: Einzelner Härteeindruck HV1</i>	32
<i>Abbildung 3.27: Isometrie Längsschliff durch die HFH-Spur</i>	33
<i>Abbildung 3.28: Isometrie Querschliff durch die HFH-Spur</i>	33
<i>Abbildung 3.29: Drei Reihen Härtemessungen in Längsrichtung</i>	34
<i>Abbildung 3.30: Zwei Spuren Härtemessungen in Querrichtung</i>	34
<i>Abbildung 3.31: Drei Reihen Härtemessungen in Längsrichtung</i>	34
<i>Abbildung 3.32: Härtemessungen in Querrichtung</i>	34

<i>Abbildung 3.33: Unverändertes Gefüge</i>	35
<i>Abbildung 3.34: Durch HFH verändertes Gefüge im randnahen Bereich</i>	35
<i>Abbildung 3.35: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität, PIT</i>	36
<i>Abbildung 3.36: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen, PIT</i>	37
<i>Abbildung 3.37: Streubereich und Mittelwerte der Härtemessungen, PIT</i>	37
<i>Abbildung 3.38: Eindrücktiefen (PIT-Verfahren) in Abhängigkeit der Intensität</i>	38
<i>Abbildung 3.39: Eindrücktiefen für die drei verschiedenen Intensitäten am Makroschliff (PIT-Verfahren) in [mm]</i>	39
<i>Abbildung 3.40: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität, HiFIT</i>	41
<i>Abbildung 3.41: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen, HiFIT</i>	42
<i>Abbildung 3.42: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität (HiFIT)</i>	42
<i>Abbildung 3.43: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität (PIT)</i>	42
<i>Abbildung 3.44: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen (HiFIT)</i>	43
<i>Abbildung 3.45: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen (PIT)</i>	43
<i>Abbildung 3.46: Streubereich und Mittelwerte der Härtemessungen (HiFIT)</i>	44
<i>Abbildung 3.47: Streubereich und Mittelwerte der Härtemessungen (PIT)</i>	44
<i>Abbildung 4.1: Ermüdungsversuch an HFH-behandelter Quersteife am KIT</i>	48
<i>Abbildung 4.2: Anrisse HFH-behandelter Proben bei Versuchende.</i>	49
<i>Abbildung 4.3: Wöhlerdiagramm: Gemeinsame Darstellung der in [2] durchgeführten Ermüdungsversuche mit den im Projekt geprüften Proben</i>	49
<i>Abbildung 4.4: Wöhlerdiagramm der in [11] durchgeführten Ermüdungsversuche bei unterschiedlichen Behandlungsintensitäten.</i>	51

Tabellenverzeichnis / List of tables

<i>Tabelle 3.1: Lokale Nahtgeometrie vor der HFH-Behandlung</i>	23
<i>Tabelle 3.2: Lokale Nahtgeometrie nach der HFH-Behandlung</i>	23
<i>Tabelle 3.3: Geometrie des Eindruckes für verschiedene Intensitäten (HiFIT-Verfahren)</i>	23

1 Einleitung - Introduction

Kurzfassung

Dieses Kapitel gibt einen einleitenden Überblick über das Forschungsprojekt „Entwicklung eines einfachen Qualitätssicherungstests für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren“. Es werden die Aspekte der Qualitätssicherung zur Anwendung der HFH-Verfahren erläutert.

Abstract

This chapter gives an introductory overview of the research project „Development of a simple quality assurance test for the application of high frequency mechanical impact treatment techniques“. The aspects of quality assurance for the application of HFMI-Treatments are annotated.

Beim Vergleich der Anforderungen an die Anwendung von höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH-Verfahren) mit bereits existierenden Fertigungsverfahren im Stahlbau, wie z.B. dem Schweißen, ergeben sich die verschiedenen Kriterien der Qualitätssicherung zur erfolgreichen Anwendung dieser Verfahren. Abbildung 1.1 zeigt die Übersicht über die vier verschiedenen Aspekte, in die sich die Qualitätssicherung in Hinblick auf eine verlässliche, reproduzierbare und vom Anwender unabhängige Wirksamkeit der HFH-Verfahren aufteilen lässt.

Zunächst sollte das Gerät und dessen Zubehör auf die Reproduzierbarkeit der gewünschten Ergebnisse und die hierbei erzielte Qualität geprüft werden. Durch etwaige Verschleißerscheinungen kann es beim PIT-Gerät z.B. zu Druckluftverlusten innerhalb des Systems oder zu einer verminderten Schlagkraft des Muskels im Laufe der Zeit kommen. Diese Verschleißerscheinungen gilt es mithilfe geeigneter Kontrollmechanismen Gerät zu identifizieren bzw. auszuschließen.

Neben der Qualitätssicherung der Gerätewirkung, muss auch der Anwender qualifiziert sein. Dies kann durch Anwenderschulungen in Verbindung mit Zertifizierungen des Anwenders erfolgen. Im Rahmen der DVS AG werden diese Maßnahmen derzeit diskutiert. Darüber hinaus sollte auch das Prüfpersonal, das die Anwendung der Verfahren am Bauteil prüft, ausreichend geschult und qualifiziert sein.



Abbildung 1.1: Die vier Aspekte der Qualitätssicherung zur Anwendung der HFH-Verfahren

Figure 1.1: Four aspects of quality assurance for the application of HFMI-Treatments

Diese Kurzstudie widmet sich der 1. Spalte und somit der Qualitätssicherung der Anwendung des Verfahrens am Bauteil. Mithilfe eines einfachen Tests, der unter Fertigungsbedingungen durchführbar sein soll, soll vom Anwender selbst bzw. vom Prüfpersonal festzustellen sein, ob die durch die HFH eingetragenen Druckeigenstressungen in ausreichender Größe und an den richtigen Positionen am Bauteil eingebracht werden konnten. Dies ist, zusammen mit der erzielten Randschichtverfestigung, die Voraussetzung für die Ermüdungsfestigkeitssteigerung des Bauteils.

2 Aktueller Stand der Forschung und Entwicklung – Current state of research and development

Kurzfassung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die derzeitigen Aktivitäten im Bereich der Forschung und Entwicklung zum Thema Qualitätssicherung bei der Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren. Die verschiedenen Ansätze werden im Folgenden vorgestellt und diskutiert.

Abstract

This chapter gives an overview of the current activities concerning the quality assurance for high frequency impact treatments. Existing approaches are introduced and discussed in the following.

Aufgrund der Notwendigkeit der Qualitätssicherung bei der Anwendung der HFH-Verfahren hat sich bereits die Working Group 2 des International Institute of Welding (IIW) mit der Frage der Reproduzierbarkeit und der Beurteilung der Wirksamkeit einer HFH-Nachbehandlung am Bauteil befasst. Die vorläufige IIW-Richtlinie „IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints“ [6] unterscheidet zwei Möglichkeiten der Qualitätssicherung, die der qualitativen Beurteilung und die der quantitativen Beurteilung.

Die qualitative Beurteilung sieht eine visuelle Inspektion vor, die durch eine Farbeindringprüfung zur Sichtbarmachung evtl. noch nicht behandelte Einbrandkerben unterstützt werden kann. Zur quantitativen Bewertung der Nachbehandlungsspur wird die Messung der Eindringtiefe empfohlen. Auch der Almen-Test dient laut der vorläufigen IIW-Richtlinie [6] bereits als Maßnahme zur Überprüfung der Qualität der HFH-Behandlung. Im Folgenden werden die empfohlenen Ansätze erläutert und beurteilt.

2.1 Visuelle Inspektion – Visual inspection

2.1.1 Empfehlung - Recommendation

Gemäß dem Entwurf der IIW-Richtlinie [6], kann die visuelle Prüfung zur Qualitätssicherung herangezogen werden. Die Richtlinie gibt Empfehlungen und Angaben zur Beschaffenheit der Nachbehandlungsspur. Es wird eine gleichmäßige und glänzende Nachbehandlungsspur empfohlen. Eine Nachbehandlungsspur an der einzelne Pineindrücke zu erkennen sind, gilt laut IIW-Richtlinie [6] als nicht ausreichend nachbehandelt. In diesem Fall muss durch eine Wiederholung der Nachbehandlung eine Verbesserung erzielt werden.

Außerdem wird darauf hingewiesen, dass mit der Behandlung alle relevanten Kerben abgedeckt werden sollen.

2.1.2 Beurteilung – Evaluation of method

Die visuelle Prüfung kann in einem ersten Schritt dazu dienen, die Qualität der Nachbehandlung zu beurteilen. Restkerben und Abplatzungen oder unzureichend gehämmerte Bereiche können dabei von geschultem Personal durch visuelle Prüfung erkannt werden.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Nachbehandlungsspuren verschiedener HFH-Verfahren, die derzeit auf dem Markt verfügbar sind, bei genauer Betrachtung optisch stark voneinander abweichen können.

So weist zum Beispiel eine mit HiFIT nachbehandelte Schweißnaht eine durchgängige, gleichmäßige Spur auf, deren Verlauf sich am Verlauf des Schweißnahtübergangs orientiert und sich gegenüber dem unbehandelten Bereich durch eine glänzende Oberfläche abhebt. Die Spur einer HiFIT-Behandlung ist in Abbildung 2.1 dargestellt.



Abbildung 2.1: HiFIT Spur
Figure 2.1: HiFIT groove



Abbildung 2.2: PIT Spur
Figure 2.2: PIT groove



Abbildung 2.3: HiFIT Spur am Grundmaterial

Figure 2.3: HiFIT groove on basic material



Abbildung 2.4: PIT Spur am Schweißnahtübergang

Figure 2.4: PIT groove at the weld toe

Bei der mit dem PIT-Verfahren nachbehandelten Schweißnaht in Abbildung 2.2 sind die einzelnen Pineindrücke deutlich erkennbar. Durch die vom HiFIT-Verfahren abweichende Behandlungsweise, bei der das Gerät wiederholend mit Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen am Schweißnahtübergang entlang geführt wird, ergibt sich eine flächigere und optisch weniger tief wirkende Behandlungsspur, siehe Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4.

In [7] wurden die Eindringtiefen der beiden Verfahren HiFIT und PIT an einem Stahl S235 miteinander verglichen. Die Ergebnisse des Vergleichs sind im nachfolgenden Kapitel 2.2.2 beschrieben.

Durch den visuellen Vergleich der zwei betrachteten Verfahren HiFIT und PIT wird deutlich, dass sich die Optik der Nachbehandlungsspur unterscheidet. Die Optik der Nachbehandlungsspur ist auf die Behandlungsweise der verschiedenen Verfahren zurückzuführen.

2.2 Spurtiefenmessung mithilfe einer Tiefenlehre – Measurement of depth of groove with depth gauge

2.2.1 Empfehlung - Recommendation

Ein geometrischer Indikator, der sich nach der Nachbehandlung durch HFH-Verfahren an Schweißnahtübergängen als messbar erweist, ist die Tiefe der sich durch die Nachbehandlung am Schweißnahtübergang einstellenden Behandlungsspur. Daher empfiehlt das IIW im Entwurf zur HFMI-Richtlinie [6] die Eindringtiefe mithilfe einer modifizierten Tiefenlehre, wie sie in Abbildung 2.5 abgebildet ist, zu bestimmen. In [6] sind sowohl für die Tiefe als auch für die Spurbreite Empfehlungswerte gegeben.

Die in der IIW-Richtlinie [6] angegebenen Eindringtiefen sollen Werte von 0,2 - 0,6 mm erreichen. Entsprechende Eindringbreiten sind mit 3 – 6 mm angegeben.

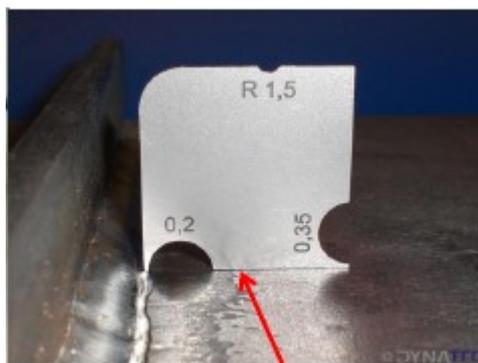


Abbildung 2.5: Spurtiefenmessung mit Lehre gemäß [6]

Figure 2.5: Measurement of depth of groove with depth gauge acc. to [6]

2.2.2 Beurteilung der Methode – Evaluation of method

Es ist festzustellen, dass die Behandlungsspurtiefe von der Geometrie der Schweißnaht bzw. des Schweißnahtübergangs (Nahtanstiegswinkel) und damit auch von der Bauteilgeometrie (Stumpfstoß, Quersteife etc.) abhängig ist. Mit der Tiefenlehre kann lediglich die nach der Nachbehandlung erreichte Eindringtiefe festgestellt werden, die sich sowohl aus der geometrischen Kerbe als auch aus der Nachbehandlungsspur zusammensetzt.

Zudem ist die Eindringtiefe auch abhängig vom verwendeten Werkstoff bzw. dessen Streckgrenze bzw. dessen Verfestigungsverhalten. Höherfeste Baustähle können bei gleicher Intensitätseinstellung, abhängig vom eingesetzten Verfahren, im Gegensatz zu normalfesten Baustählen geringere Eindringtiefen bei gleichen Nachbehandlungsparametern aufweisen. Damit ist eine Klassifizierung in Abhängigkeit der zu behandelnden Werkstoffe erforderlich. Hinzu kommt, dass die optimale Eindringtiefe der Behandlungsspur vom verwendeten HFH-Verfahren sowie der Geometrie und Größe des Pinradius abhängig ist, wie bereits in 2.1.2 beschrieben. Unterschiede ergeben sich auch daraus, dass beim untersuchten HiFIT-Verfahren die Behandlungsintensität über einen Geräteinternen Regler eingestellt wird, wohingegen beim PIT-Verfahren die Intensität mit der Verweildauer an der nachzubehandelnden Stelle korreliert.

In [12] wurden die zwei HFH-Verfahren HiFIT und UIT und deren Eindruckgeometrien gegenübergestellt. Die Auswertung zeigte, dass sich bei der Betrachtung der Eindringtiefen Unterschiede in der Tiefe von teilweise 0,1 mm für beide Verfahren ergaben. Ähnlich den Beobachtungen bei den Härteverläufen in [12], die in Kapitel 3.5 beschrieben sind, war auch hier festzustellen, dass das UIT-Verfahren weniger tiefe Eindringtiefen erreichte als das HiFIT-Verfahren. Der Unterschied in den erzielten Eindringtiefen spiegelt sich jedoch in den experimentell ermittelten Ermüdungsfestigkeiten verschiedener Projekte, wie z.B. für HiFIT- und PIT-behandelte Proben in [7], nicht wieder.

Als Kritikpunkt kann angeführt werden, dass beim beschriebenen Qualitätssicherungstest die Abgrenzungskriterien der Qualität bezogen auf die Tiefe der Behandlungsspur anhand numerischer Untersuchungen zur Nahtgeometrieänderung

sowie auf Erkenntnissen zur Randschichtveränderung formuliert wurden, Ermüdungsversuche unter Variation der Eindringtiefe bislang jedoch nicht durchgeführt wurden.

Weiterführende Untersuchungen in Hinblick auf die vorliegenden Eindringtiefen sind in 3.3.7 beschrieben.

2.3 Almen-Test - Almen-Test

Ein weiteres Verfahren, das in der vorgeschlagenen IIW-Richtlinie [6] zur quantitativen Beurteilung empfohlen wird, ist der modifizierte Almen-Test. Auf dessen ursprüngliche Anwendung und Entwicklung bzgl. der Anwendung zur Qualitätssicherung der HFH-Verfahren und die erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

Kurzfassung

Im Laufe der Bearbeitung der Kurzstudie zur „Entwicklung eines Qualitätssicherungstests für die Anwendung der höherfrequenten Hämmerverfahren“ entstanden neben der Idee, den Almen-Test für die HFH-Anwendung zu modifizieren, weitere Konzepte für einen einfachen Qualitätssicherungstest. So können optische 3D-Messungen Aufschluss über die genaue Geometrie der Nachbehandlungsspuren geben, aber auch ein Ansatz, der die Untersuchung der Werkstoffeigenschaften im nachbehandelten Bereich vorsieht, erscheint vielversprechend. Die Untersuchungen, deren Ergebnisse und Beurteilungen sind im Folgenden erläutert.

Abstract

Further concepts of simple tests have been developed besides the idea of using a modified Almen-Test during the progress of the brief study “Development of a simple quality assurance test for the application of high frequency mechanical impact treatment techniques”. Optical 3D-Measurements were pursued that give information about the exact geometry of the groove as well as investigations on material properties in the area close to the surface. This chapter describes the conducted investigations, the results and the evaluation.

3.1 Allgemein - General

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht über die Methoden, die zur Bestimmung der Qualität einer HFH-Behandlung untersucht wurden. Abbildung 3.1 zeigt drei Ansätze, die im Laufe der Bearbeitung der Kurzstudie schwerpunktmäßig verfolgt wurden. Sowohl der beim Kugelstrahlen etablierte Almen-Test als auch die optische 3D-Vermessung des nachbehandelten Schweißnahtübergangs stellen messbare Indikatoren dar. Als weiterer messbarer Indikator wird der Ansatz, die Qualität einer Nachbehandlung über die Härte beurteilen zu können, verfolgt.

Die Überprüfung der Anwendbarkeit und Praktikabilität dieser Verfahren konnte nur im Rahmen von Anwendungsstudien an konkreten Bauteilen bzw. Proben überprüft werden.

Zunächst wird für das jeweilige Verfahren überprüft, ob eine Intensitätsvariation der HFH-Behandlung über das jeweilige Testverfahren messbar ist. Eine Anwenderspezifische Beeinflussung des Tests sollte ausgeschlossen werden. Ein weiteres Kriterium ist die Handhabbarkeit und Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Testverfahrens. Dabei soll der finanzielle Aufwand in einem angemessenen Verhältnis zur Belastbarkeit der erzielten Aussage hinsichtlich der Qualität der Nachbehandlung stehen.

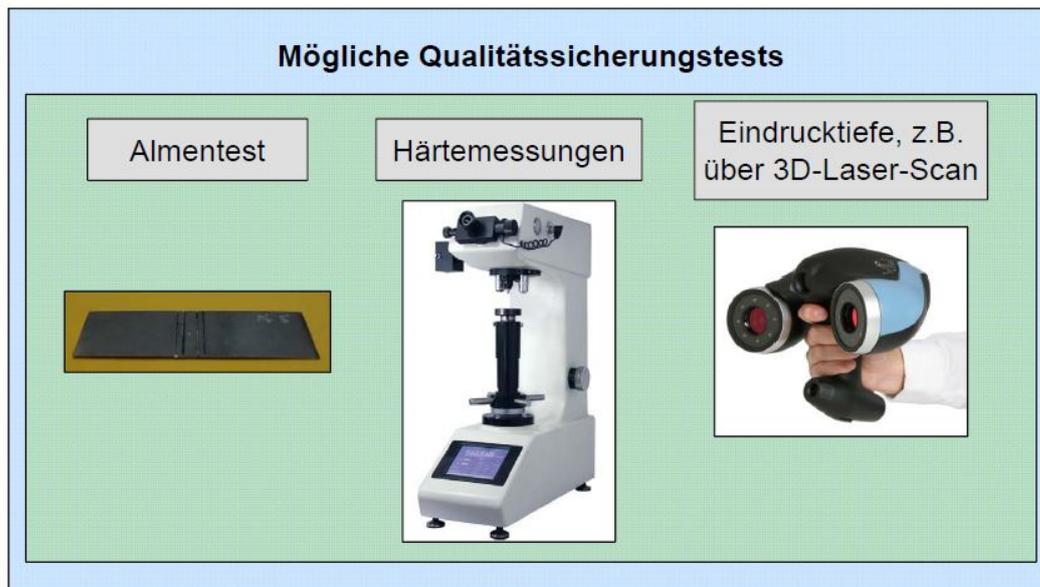


Abbildung 3.1: Übersicht möglicher Testverfahren

Figure 3.1: Overview of possible approaches

3.2 Almen-Test – Almen-Test

3.2.1 Motivation für den Einsatz des Almen-Tests beim Kugelstrahlen – Motivation for the use of the Almen-Test for shot peening applications

Beim Kugelstrahlen handelt es sich um ein Verfahren zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit ermüdungsbeanspruchter Bauteile. Dies wird durch eine gezielte plastische Verformung der Oberfläche erreicht, die zu Druckeigenstressungen in der Randschicht des Bauteils führt. Darüber hinaus kann zudem die Oberfläche gereinigt und eine bestimmte Oberflächentopographie erzeugt werden.

Beim Kugelstrahlen wird die plastische Verformung dadurch erzeugt, indem ein rundes Strahlmittel mit voreingestellter Intensität auf die Oberfläche des zu behandelnden Details geschleudert wird. Als Parameter sind dabei vor allem der Strahlendruck bzw. die Abwurfgeschwindigkeit, der Strahlmitteldurchsatz sowie der Auftreffwinkel von Bedeutung. Das runde Strahlmittel besteht je nach Anwendungsfall aus Drahtkorn, Stahlgusskorn, Keramik- oder Glasperlen. Zudem kann die Korngröße bzw. die Korngrößenverteilung variiert werden. Es ist dabei zu beachten, dass die Größe der Körner abhängig von der Größe und der Geometrie des zu behandelnden Details ist und die Härte vom zu behandelnden Detail und Strahlmittel ungefähr gleich sein müssen, um genügend hohe Druckeigenstressungen zu erzeugen.

Es stehen zwei verschiedene Varianten zur Verfügung:

- Die Schleuderradanlage beschleunigt das Strahlmittel durch die Zentrifugalkraft und wird meist bei großflächigen Bauteilen verwendet, da der Abwurfsektor sehr groß ist.

- Alternativ kann das Strahlmittel auch mithilfe einer Strahldüse beschleunigt werden. Dies geschieht durch Druckluft und ermöglicht eine deutlich gezieltere Bearbeitung um verschiedene Koordinatenachsen.

Da das Strahlmittel aus einer großen Menge einzelner Körner besteht, können alle Werte nur statistisch betrachtet werden. Die Korngrößen werden in Form einer Korngrößenverteilung festgelegt und können anhand von Siebanalysen überwacht werden. Außerdem kann der Strahlmitteldurchsatz, d.h. die Strahlmittelmenge pro Zeiteinheit, gemessen werden. Allerdings ist der Energieverlust des Strahlmittels bis zum Auftreffen auf das Bauteil unbekannt und auch der genaue Auftreffort kann nicht genau vorhergesagt werden. Daher wird zusätzlich der Überdeckungsgrad \bar{U} als Strahlparameter definiert, der den prozentualen Anteil der vom Strahlmittel getroffenen Fläche angibt. Dieser Wert nähert sich asymptotisch dem 100%-Grenzwert an. Um eine genauere experimentelle Aussage über die in die Bauteiloberfläche eingebrachte Energie treffen zu können, wird der Almen-Test verwendet.

3.2.2 Almen-Test als Qualitätssicherungstest beim Kugelstrahlen – Almen-Test as quality assurance test for shot-peening applications

3.2.2.1 Vorgehen - Procedure

Die Behandlungsintensität wird beim Kugelstrahlen mithilfe von sogenannten Almenstreifen gemessen. Bei den Almenstreifen handelt es sich um genormte Testplättchen (Länge $76^{\pm 0,4}$ mm, Breite $19^{0,1}$ mm), die in drei Dicken, N = 0,79 mm, A = 1,29 mm und C = 2,39 mm, für unterschiedliche Intensitäten verfügbar sind und aus Federstahl SAE1070 bestehen. Diese Testplättchen werden einseitig mit den gleichen Einstellungen (z. B. Abstand, Strahlwinkel, Strahlgeschwindigkeit, etc.) wie das Bauteil gestrahlt. Aufgrund der eingebrachten Druckeigenspannung krümmt sich das Plättchen zur gestrahlten Seite hin. Mit einer Messuhr wird die Bogenhöhe ermittelt, die mit zunehmender Strahlzeit zunimmt und gegen einen Sättigungs-Grenzwert läuft, siehe Abbildung 3.2. Anhand der gemessenen Bogenhöhe können die Strahlintensität und damit näherungsweise die eingebrachten Druckeigenspannungen bestimmt werden.

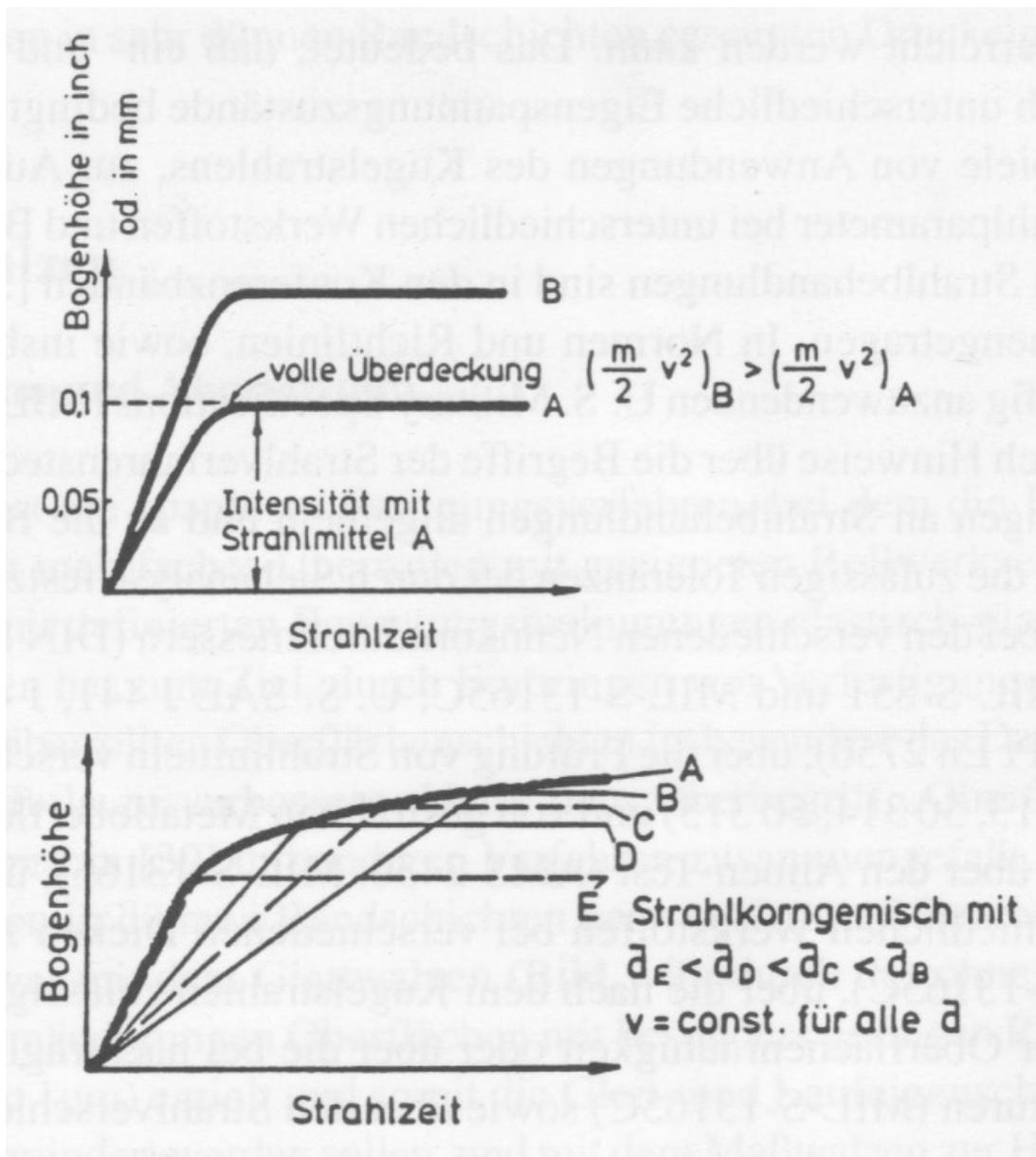


Abbildung 3.2: Bogenhöhe der Almen-Testplättchen in Abhängigkeit der Strahlzeit mit unterschiedlicher Strahlintensität (oben) und verschiedenen Korndurchmessern (unten) [13]

Figure 3.2: Arch height of Almen-Test plates depending on the blasting time with varied blast intensity (above) and varied grain diameter (below) [13]

3.2.2.2 Vorteile - Advantages

Der Almen-Test ist ein geeigneter Test, um Bestrahlungsintensitäten auf einfache und reproduzierbare Art zu messen und erlaubt eine Abschätzung der eingebrachten Druckeigenspannungen. Exemplarisch sind in Abbildung 3.3 die sich für Stumpfstöße verschiedener hochfester Baustähle ergebenden Dauerfestigkeiten in Abhängigkeit der Bestrahlungsintensität dargestellt. Mit zunehmender Intensität nähern sich dabei die ermittelten Dauerfestigkeiten einem Grenzwert an.

Außerdem kann die Strahlanlage anhand des Almen-Tests überwacht werden, wobei sich beispielsweise die Abnutzung des Strahlmittels mit einer einhergehenden Änderung der Intensität bemerkbar macht.

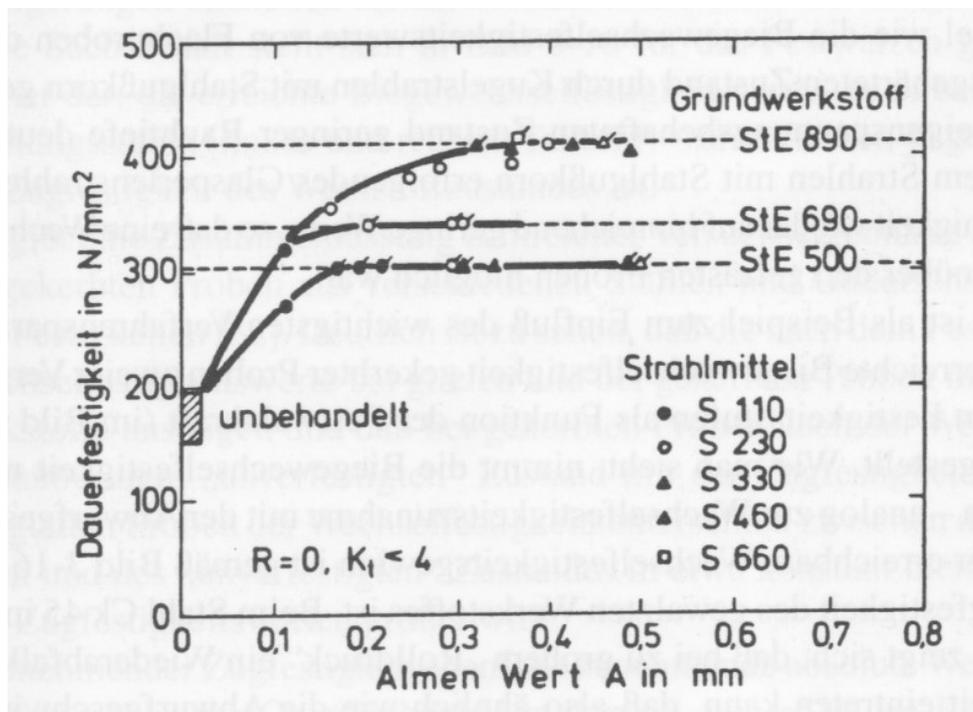


Abbildung 3.3: Dauerfestigkeit von Stumpfstoßen aus verschiedenen hochfesten Baustählen nach dem Kugelstrahlen mit unterschiedlicher Strahlintensität und unterschiedlichen Korngrößen des Strahlmittels [13]

Figure 3.3: Fatigue limit of butt joints of high-strength steels after shot peening with varied beam intensity and different particle sizes of blasting abrasive [13]

3.2.2.3 Nachteile - Disadvantages

Der Almen-Test lässt keine Rückschlüsse auf den Zustand der oberflächennahen Schichten zu und ist damit nicht ausreichend zur eindeutigen Kennzeichnung einer Kugelstrahlbehandlung. Zudem verändern sich die realen Werte der Eigenspannungen im Bauteil, wenn die Härte von den Normhärten der Testplättchen abweicht. Es muss außerdem beachtet werden, dass derselbe Almen-Intensitätswert mit verschiedenen Kombinationen von Strahlgeschwindigkeit, Korndurchmesser und Strahlzeit erreicht werden kann.

3.2.3 Almen-Test zur Qualitätssicherung bei der Anwendung der HFH-Verfahren – Almen-Test for quality assurance test of HFMI-treatments

3.2.3.1 Entwicklung und Durchführung – Development and implementation

Zur Untersuchung als mögliches Qualitätssicherungsverfahren beim Kugelstrahlen von Stahlkonstruktionen wurden Untersuchungen in Anlehnung an den originalen

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

Almen-Test, sowie an einem auf das PIT-Verfahren angepassten Almen-Test durchgeführt.

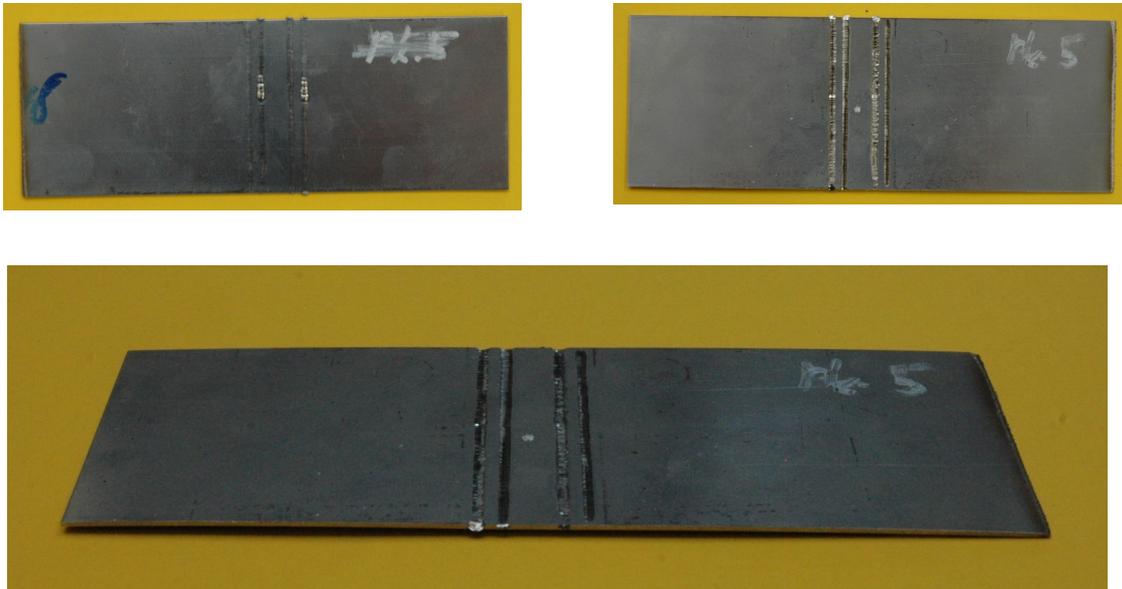


Abbildung 3.4: Vorversuche Almen-Test in Blechquerrichtung

Figure 3.4: Preliminary Almen-Test in transverse direction of the plate



Abbildung 3.5: Vorversuche Almen-Test in Blechlängsrichtung

Figure 3.5: Preliminary Almen-Test in longitudinal direction of the plate

Hierzu dienten die in Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 abgebildeten standardisierten Messstreifen. Diese Messstreifen aus S235 und 1.4310 (nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel Stahl) unterschiedlicher Dicke wurden sowohl in Längs- als auch in Querrichtung mit einer definierten Dauer mit dem PIT-Verfahren nachbehandelt. Schon während der Durchführung konnte festgestellt werden, dass die

Durchbiegung der Teststreifen durch die Geräteführung sehr stark beeinflussbar ist.

Anschließend wurden die Durchbiegungen vermessen und es konnte kein plausibler Zusammenhang der Durchbiegungen der einzelnen Teststreifen mit den definierten Nachbehandlungsparametern abgeleitet werden. Es ergaben sich sowohl positive und negative Krümmungen bei den untersuchten Teststreifen. Dies lässt darauf schließen, dass das angedachte Verfahren zum einen nicht reproduzierbar ist und zum anderen stark durch den Anwender beeinflussbar ist.

3.2.3.2 Beurteilung der Ergebnisse – Evaluation of results

Die untersuchte Methode hat sich nicht als zielführend erwiesen, da der Test durch die Geräteführung stark beeinflussbar ist. Ein Sättigungsgrad konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht erreicht werden.

Es wurde deshalb nach Alternativen gesucht. Diese sind in den Kapiteln 3.3, 3.4 und 3.5 erläutert.

3.3 3D-Laser-Scan – 3D-Laser-Scan

3.3.1 Allgemein - General

Um die Anwendbarkeit des 3D-Laser-Scans zu prüfen, wurden Probekörper, die im abgeschlossenen Forschungsprojekt „Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau“ [7] als Reserve dienten, verwendet. Dieses Forschungsprojekt wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) an beiden Forschungsstellen durchgeführt, wobei schwerpunktmäßig das Konstruktionsdetail „Quersteife“ nach EC3 Teil 1-9 [1] untersucht wurde. Die Probekörper sind aus dem Werkstoff S235JR hergestellt und die Steifen sind beidseitig über Kehlnähte angeschlossen. Die Herstellung der Probekörper sowie die zugehörigen Versuchsergebnisse sind in [7] dargestellt.

Im Lieferumfang des HiFIT-Gerätes ist eine Lehre zur Kontrolle der Eindringtiefe enthalten. Unter Verwendung dieser Lehre lassen sich der Mindestsollwert sowie der zulässige Höchstwert der Eindringtiefe nach der HiFIT-Behandlung überprüfen. Die Lehre wurde basierend auf Untersuchungen in [10] und [12] entwickelt. Als einfache Methode zur Qualitätssicherung wird demzufolge zunächst die lokale Nahtgeometrie am Schweißnahtübergang vor und nach der HFH-Behandlung für die beiden untersuchten Verfahren vermessen.

3.3.2 Vorgehensweise – Approach

Für beide Verfahren wird jeweils ein Probekörper an den Schweißnahtübergängen zum Grundmaterial einer HFH-Behandlung unterzogen, Abbildung 3.6. Die Behandlung erfolgt durch die Firmen Pitec und DYNATEC, wobei die Intensitätseinstellungen auf die Festigkeitskennwerte der zu behandelnden Probekörper abgestimmt und dokumentiert wurden. Die Wirksamkeit der durchgeführten Behandlung sowie die geeignete Geräteeinstellung wurde anhand eines Ermüdungsversuchs am jeweiligen Probekörper überprüft, indem die Ergebnisse den in [7] dokumentierten Ergebnissen gegenübergestellt wurden. Darüber hinaus wurden an

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

beiden Probekörpern an einer der beiden Steifen drei Behandlungsspuren unterschiedlicher Intensität im Grundmaterial gelegt, Abbildung 3.7. In Hinblick auf die Intensitäten wird neben der am Nahtübergang zugrunde gelegten Einstellung (optimale Behandlungsparameter, Behandlungsspur B, mittlere Spur in Abbildung 3.7) eine hohe (Behandlungsspur C, rechte Spur in Abbildung 3.7) sowie eine niedrige Intensität (Behandlungsspur A, linke Spur in Abbildung 3.7) gewählt.



Abbildung 3.6: HFH-Behandlung am Nahtübergang der Quersteifen, PIT (links) und HiFIT (rechts)

Figure 3.6: HFMI- treatment at the weld toe of transverse stiffeners, PIT (left) and HiFIT (right)

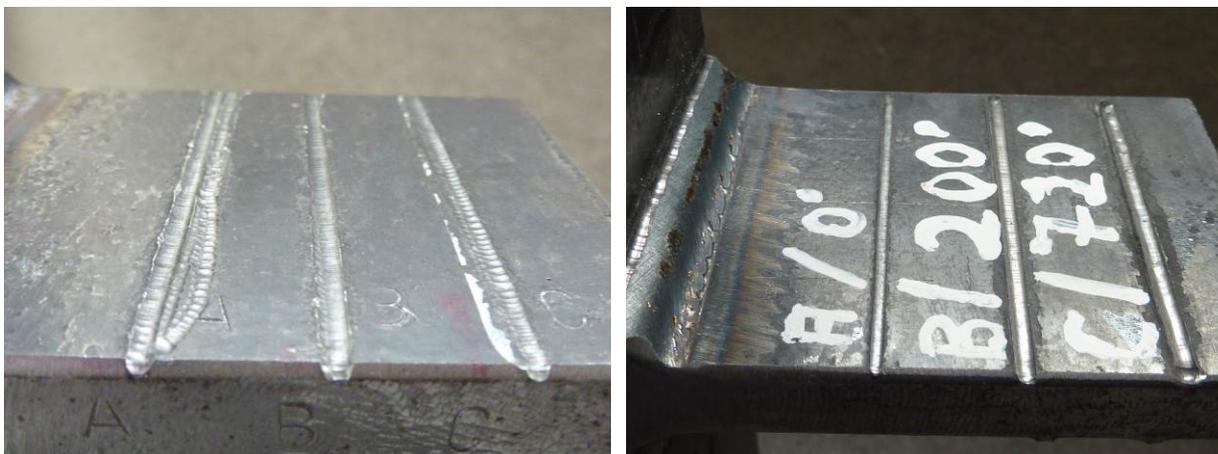


Abbildung 3.7: HFH-Behandlung am Grundmaterial der Steifen, PIT (links) und HiFIT (rechts), Intensitäten: niedrig (A), optimal (B) und hoch (rechts)

Figure 3.7: HFMI-treatment at the base material of the transverse stiffeners, PIT (left) and HiFIT (right), Intensities: low (A), optimal (B) and high (right)

Die lokale Nahtgeometrie am Schweißnahtübergang wird vor und nach der HFH-Behandlung mit den beiden untersuchten Verfahren optisch vermessen. Darüber hinaus erfolgt eine optische Vermessung der mit unterschiedlichen Intensitäten hergestellten Behandlungsspuren in Abbildung 3.7. Die Durchführung der Messungen sowie die Messergebnisse sind nachfolgend dargestellt.

3.3.3 Durchführung - Execution

In Abbildung 3.8 ist beispielhaft der Kontur-Plot eines optisch vermessenen HFH-behandelten Probekörpers dargestellt.

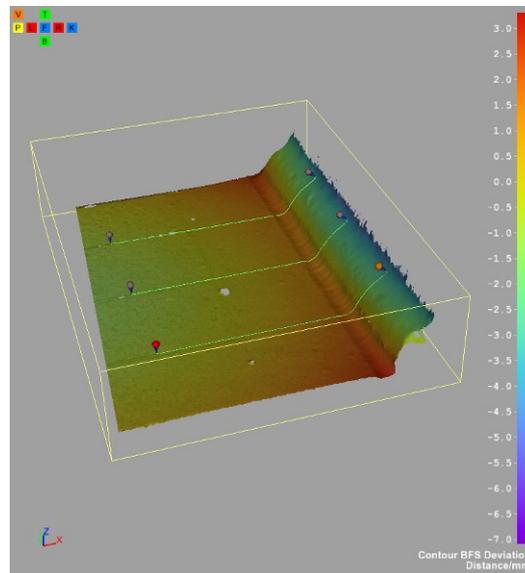


Abbildung 3.8: Kontur-Plot eines PIT-behandelten Probekörpers

Figure 3.8: Contour-Plot of a PIT-treated sample

Mithilfe eines 3D-Viewer und -Konverter werden Schnitte an den optisch vermessenen Oberflächen geführt und aus diesen die lokale Geometrie im CAD-Programm vermessen. An den Probekörpern werden die Geometrien im Bereich des Nahtübergangs sowie im Bereich der Steifen mit variierender Behandlungsintensität (siehe Abbildung 3.9) in den Drittelpunkten vermessen.

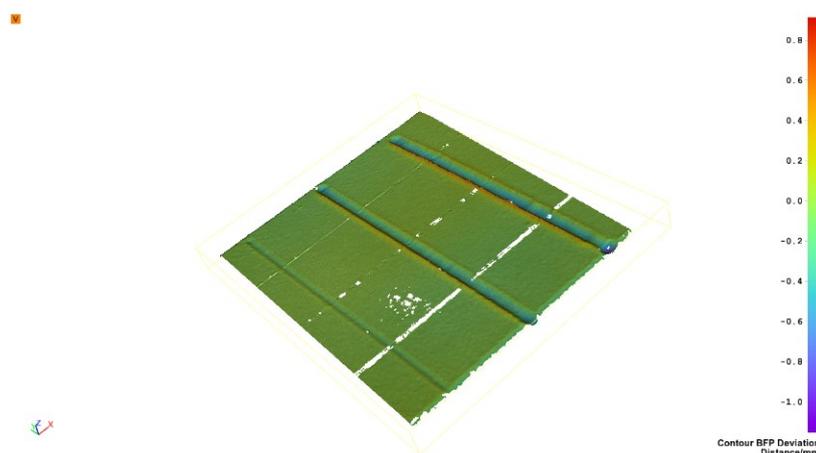


Abbildung 3.9: Kontur-Plot der HiFIT-behandelten Steife, Behandlung mit verschiedenen Intensitäten

Figure 3.9: Contour-Plot of a HiFIT-treated stiffener, treatment with various intensities

Aus dem Profil der Proben vor der Nachbehandlung werden der Nahtanstiegswinkel und der Kerbradius ermittelt, Abbildung 3.10. Der Kerbradius ist als der kleinste Radius des Kreises definiert, der die Kontur der Nahtgeometrie am Nahtübergang annähert. Anhand der Profile des Probekörpers nach der HFH-Behandlung werden der Kerbradius, die Eindringtiefe in vertikaler und horizontaler Richtung, der Winkel in Anstellrichtung des Geräts sowie die Eindringtiefe und -breite in Anstellrichtung bestimmt, siehe Abbildung 3.11. Die zugehörigen Parameter werden nachfolgend erläutert.

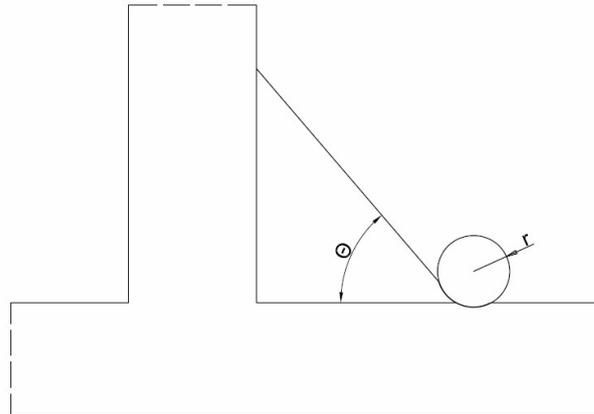


Abbildung 3.10: Nahtgeometrieparameter vor der HFH-Behandlung

Figure 3.10: Weld toe geometry parameters before HFMI-treatment

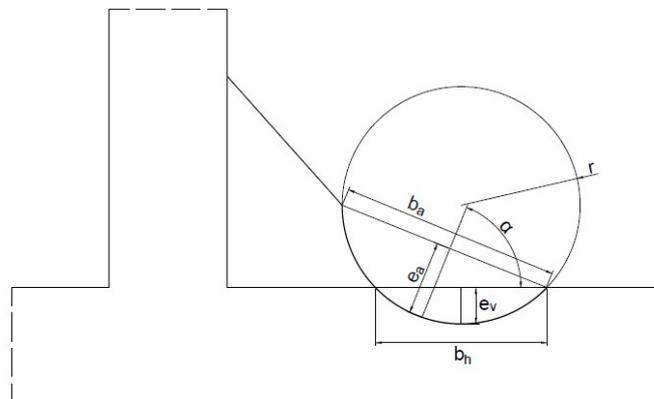


Abbildung 3.11: Definition der Nahtgeometrieparameter nach der HFH-Behandlung

Figure 3.11: Definition of weld toe geometry parameters after HFMI-treatment

- ϑ Nahtanstiegswinkel
- r Kerbradius
- b_h horizontale Eindringbreite
- e_v vertikale Eindringtiefe
- b_a Eindringbreite in Anstellrichtung

- e_a Eindrucktiefe in Anstellrichtung
- α Anstellwinkel α

3.3.4 Messergebnisse – Measured results

Durch die Vermessung der Nahtgeometrie vor der HFH-Behandlung kann die aus der HFH-Behandlung resultierende Eindrucktiefe sowie die Veränderung des Kerbradius ermittelt werden. Vorhandene Kerben aus dem Schweißvorgang können somit berücksichtigt werden.

Die Messwerte sind in Abbildung 3.13, Abbildung 3.14 und Abbildung 3.15 grafisch aufbereitet. Die verwendeten Box-Plots veranschaulichen die Lage, die Konzentration und die Variation der einzelnen Messreihen (siehe Abbildung 3.12). Der Inhalt einer Box entspricht 50 % der Messwerte. Der Median ist durch eine Strichmarkierung in der Box dargestellt.

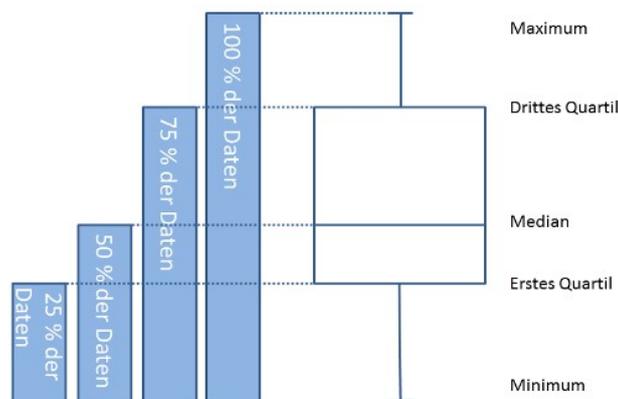


Abbildung 3.12: Erklärung Box-Plot [8]

Figure 3.12: Explanation of box plot [8]

In Abbildung 3.13 ist der Einfluss des jeweiligen Hämmerverfahrens auf die Größe des gemessenen Kerbradius und in Abbildung 3.14 sind die Eindrucktiefen in vertikaler Richtung und in Anstellrichtung dargestellt. Zur Ermittlung der Anstellrichtung werden die beiden Übergangspunkte vom Radius zum Grundmaterial sowie vom Radius zum Nahtanstieg durch eine Gerade verbunden. Ein auf der Gerade stehendes Lot bis zum tiefsten Punkt des Radius beschreibt die Eindrucktiefe in Anstellrichtung. Die Anstellrichtung ist definiert als der Winkel zwischen diesem Lot und der Oberfläche des Grundmaterials.

Durch die Anwendung beider Verfahren wird der Kerbradius vergrößert, wobei die gemessenen Werte nur geringfügig streuen. Die gemessenen Kerbradien der HiFIT-behandelten Probe sind, verglichen mit der PIT-behandelten Probe, geringer, wobei im letzteren Fall bereits im Ausgangszustand vor der HFH-Behandlung ein deutlich größerer Kerbradius vorliegt.

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

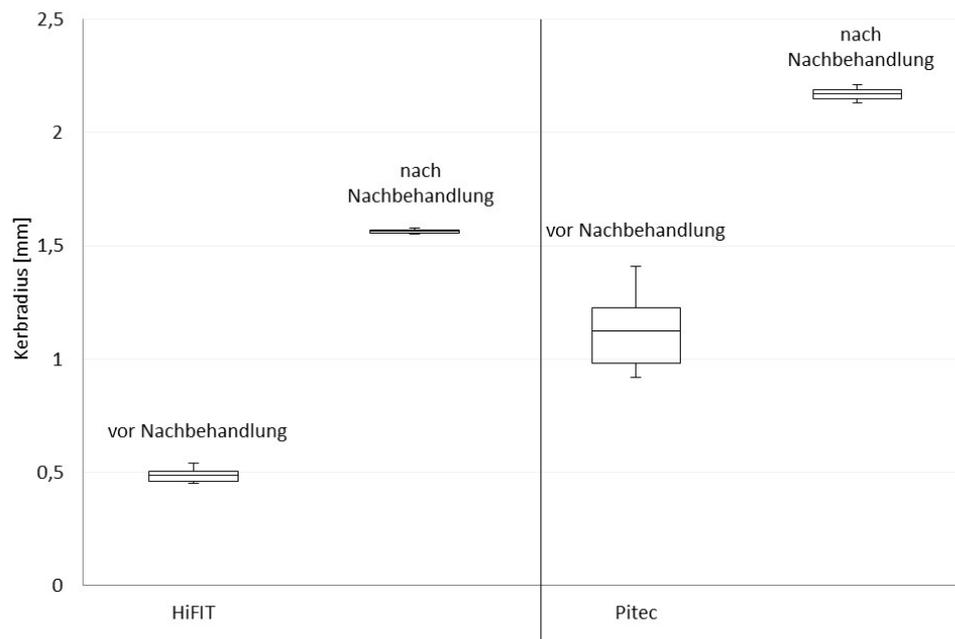


Abbildung 3.13: Gemessene Kerbradien vor und nach der HFH-Behandlung

Figure 3.13: Measured notch radii before and after HFMI-treatment

Beim HiFIT-Verfahren ist die Eindringtiefe in vertikaler Richtung e_v unwesentlich größer als beim PIT-Verfahren, Abbildung 3.14. Die Streuung der vertikalen Eindringtiefe e_v ist bei beiden Verfahren sehr gering, während die Eindringtiefe in Anstellrichtung e_a , besonders beim PIT-Verfahren, deutliche Abweichungen vom Mittelwert aufweist. Generell ist die Eindringtiefe in Anstellrichtung größer als die vertikale Eindringtiefe.

Sofern für beide Verfahren das Erreichen einer definierten Eindringtiefe als Maß für die erreichte Behandlungsqualität herangezogen werden soll, ist basierend auf den durchgeführten Messungen sowie den ermittelten Streuungen, die vertikale Eindringtiefe e_v als Kennwert zu empfehlen. Diesbezüglich beziehen sich bisherige Empfehlungen auf Untersuchungen an Stumpfstoßen und Längssteifen [10], [12], wobei eine Erweiterung auf Quersteifen denkbar ist. Dies könnte beispielsweise über die Herstellung einer Beziehung von Nahtanstiegswinkel und vertikaler Eindringtiefe erreicht werden.

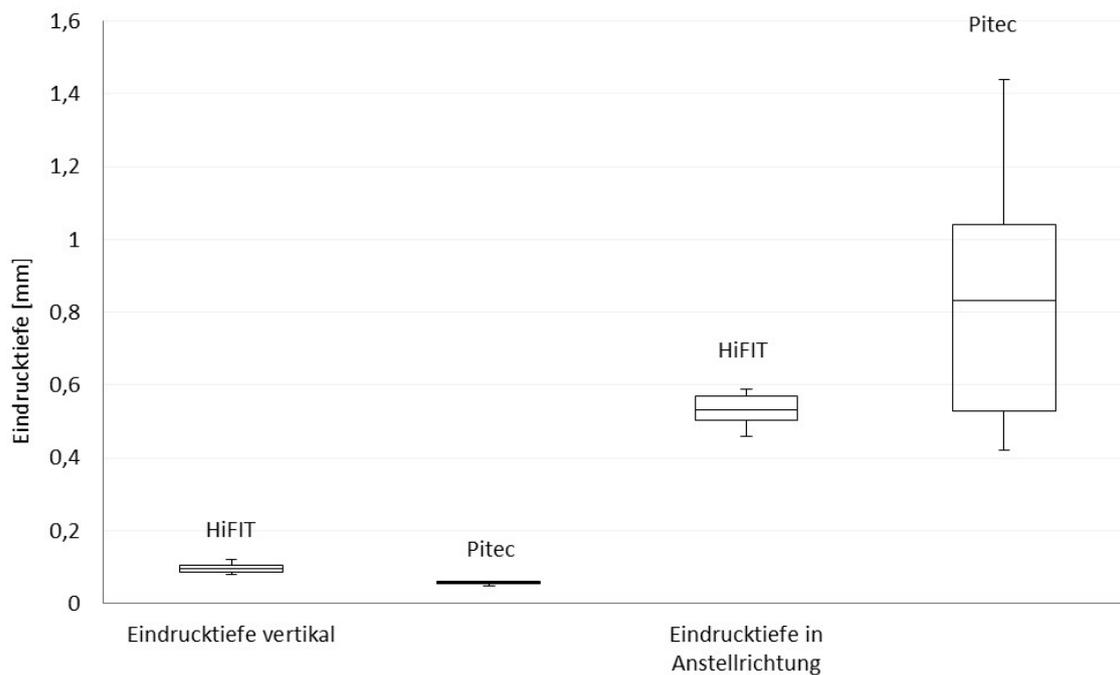


Abbildung 3.14: Gemessene Eindrucktiefen in vertikaler und in Anstellrichtung

Figure 3.14: Measured depths of indentation in vertical and in setting direction

Abbildung 3.15 zeigt die Auswertung der HiFIT-behandelten Steife für die drei verschiedenen Behandlungsintensitäten. Die Intensität wird bei diesem Verfahren durch einen Regler mit einer Innensechskantschraube eingestellt. Die Einstellung für die Stelle A in Abbildung 3.9 entspricht 0° , für Stelle B entspricht sie 200° und für Stelle C entspricht sie 270° .

Mit zunehmender Intensität nimmt die Eindrucktiefe in vertikaler und in horizontaler Richtung zu. In Abbildung 3.15 ist zu erkennen, dass die Eindrucktiefe in vertikaler Richtung im Vergleich zur horizontalen Eindruckbreite mit zunehmender Intensität stärker zunimmt. Dies ist auch in Tabelle 3.3 anhand der Zunahme der Mittelwerte ersichtlich. Die Standardabweichung fällt gering aus.

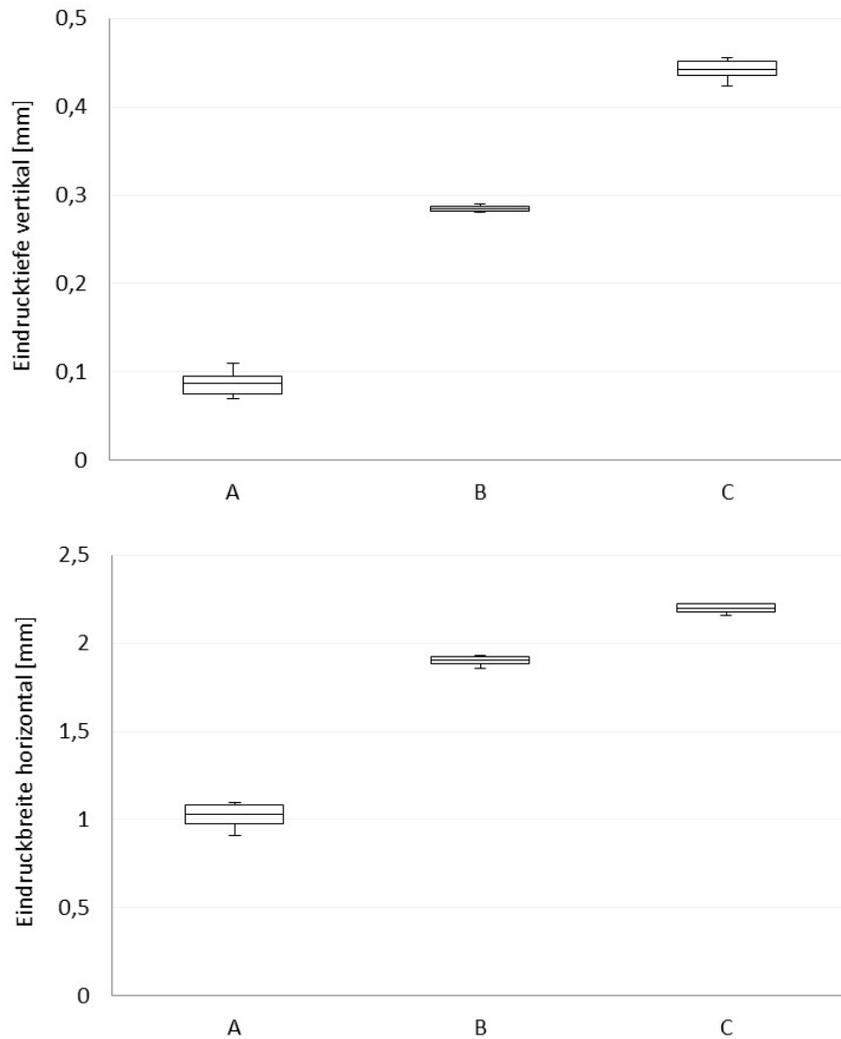


Abbildung 3.15: Vertikale Eindrucktiefe (oben) und horizontale Eindruckbreite (unten) für verschiedene Intensitäten einer HiFIT-Behandlung (A: 0°, B: 200°, C: 270°)

Figure 3.15: Vertical depth of indentation (above) and horizontal width (below) for different intensities of a HiFIT-treatment (A: 0°, B: 200°, C: 270°)

In Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 sind alle Messergebnisse für die beiden Verfahren vor und nach der HFH-Behandlung unter Angabe von Mittelwert und Standardabweichung aufgeführt. Tabelle 3.3 zeigt die Eindrucktiefen für die unterschiedlichen Intensitäten bei der HiFIT-behandelten Probe.

Tabelle 3.1: Lokale Nahtgeometrie vor der HFH-Behandlung

Table 3.1: Local weld geometry before HFMI treatment

		HiFIT		PIT	
		Mittelwert	σ	Mittelwert	σ
Nahtanstiegswinkel	Θ [°]	57,67	3,51	55,0	2,0
Kerbradius	R [mm]	0,49	0,05	1,12	0,26

Tabelle 3.2: Lokale Nahtgeometrie nach der HFH-Behandlung

Table 3.2: Local weld geometry after HFMI treatment

		HiFIT		PIT	
		Mittelwert	σ	Mittelwert	σ
Kerbradius	r [mm]	1,56	0,01	2,17	0,04
Eindrucktiefe	e_v [mm]	0,1	0,02	0,06	0,01
Eindruckbreite	b_h [mm]	1,06	0,09	1,0	0,17
Anstellrichtung	α [°]	63,33	4,04	63,67	5,86
Eindrucktiefe in Anstellrichtung	e_a [mm]	0,53	0,07	0,84	0,54
Eindruckbreite in Anstellrichtung	b_a [mm]	2,35	0,11	2,81	0,3

Tabelle 3.3: Geometrie des Eindruckes für verschiedene Intensitäten (HiFIT-Verfahren)

Table 3.3: Geometry of indentation for different intensities (HiFIT treatment)

Intensitätsstufe	Mittelwert		Standardabweichung	
	Eindrucktiefe e_v [mm]	Eindruckbreite b_h [mm]	Eindrucktiefe e_v [mm]	Eindruckbreite b_h [mm]
A/0°	0,08	1,03	0,02	0,12
B/200°	0,29	1,91	0,00	0,05
C/270°	0,44	2,20	0,02	0,04

3.3.5 Motivation - Motivation

Ähnlich dem Spurentiefenmessgerät, das in 2.2.1 beschrieben ist, zielt die 3D-Laser-Scan-Messung darauf ab, die durch die HFH-Nachbehandlung veränderte Geometrie an der Kerbe des Schweißnahtübergangs zu erfassen.

Der Unterschied zum Verfahren mit der Spurtiefenlehre in 2.2.1 jedoch ist, dass hier sowohl der Zustand vor der Nachbehandlung durch HFH, als auch die Geometrie nach der Nachbehandlung gescannt und erfasst werden. Im Nachhinein werden die Werte einander gegenübergestellt und die tatsächlich erreichte Eindrückung ohne den Einfluss der Schweißkerbe ermittelt.

Ziel war es, diese Untersuchungen zunächst an einer stationären Messeinheit durchzuführen und die Genauigkeit zu überprüfen. Bei positiven Ergebnissen könnte diese 3D-Messung anhand eines Handgerätes, wie es derzeit z. B. von der Fa. Creaform auf dem Markt angeboten wird, erfolgen. Die Meßgenauigkeit der Handgeräte ist derzeit allerdings auf 0,1mm begrenzt, was für die zu bestimmende Eindrücktiefe deutlich im relevanten Messbereich liegt. Auch die Definition des Abgleiches und damit die Schwierigkeit, die erfassten Punktwolken übereinander zu legen, erscheint beim Handgerät derzeit nicht möglich.

3.3.6 Entwicklung und Durchführung – Development and execution

Die 3D-Laser-Scan Messung wurde stationär mit dem Gerät, wie es in Abbildung 3.16 dargestellt ist, bei der Firma ATIS durchgeführt. Die Messgenauigkeit des Gerätes liegt bei einer Feldgröße von 200 mm x 200 mm bei 0,02 mm. Abbildung 3.17 zeigt das vorgegebene Messfeld. Die Messung wurde an vier PIT-nachbehandelten Probekörpern aus dem Forschungsprojekt „Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundeisenbahnbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit“ [8] durchgeführt.



Abbildung 3.16: 3D-Laser-Scan-Gerät
Figure 3.16: 3D-Laser-Scan-Device

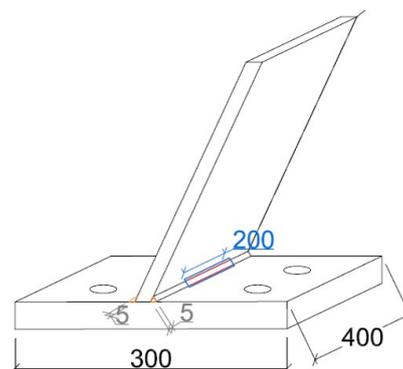


Abbildung 3.17: Messfeld
Figure 3.17: Area of measurement

3.3.7 Ergebnisse und Beurteilung der 3D-Laser-Messungen – Results of 3D-laser-measurements and evaluation of results

In Abbildung 3.18 sind die Abweichungen der Messpunkte vor und nach der Nachbehandlung anhand eines Farbplots dargestellt. Die veränderte Geometrie durch die PIT Nachbehandlung ist deutlich zu erkennen. Dabei zeigt sich, dass der Nahtübergang des Stegblechs Eindrucktiefen zwischen 0,15 – 0,23 mm aufweist. Der am Gurtblech nachbehandelte Schweißnahtübergang weist hingegen sehr viel geringe Eindrucktiefen von 0,01 mm – 0,05 mm auf. Durch die Ermüdungsversuche konnte auch hier die Wirksamkeit der Nachbehandlung des Stegnahtübergangs nachgewiesen werden.

Abbildung 3.19 zeigt die gemessenen Differenzen im Querschnitt des Bauteils. Anhand des Schnitts wird deutlich, dass die relativ geringe Messgenauigkeit von 0,02 mm im vorliegenden Fall zu einem fiktiven Glätten der Nachbehandlungsspur führt, was für das PIT-Verfahren eher untypisch ist und nicht der Realität entspricht. Eine Messgenauigkeit mit einer Genauigkeit von 0,02 mm wird deshalb als unzureichend eingestuft. Andere auf dem Markt erhältliche Handgeräte weisen noch geringere Genauigkeiten auf und lassen derzeit einen geeigneten Einsatz als 3D-Laser-Scan als ungeeignet erscheinen. Hinzu kommt, dass der Kostenaufwand für ein 3D-Laser Handgerät nicht im Verhältnis zu den Erkenntnissen aus den zu ungenauen Messungen steht. Hier können einfachere und kostengünstigere Verfahren, wie z.B. die Eindrucktiefenlehre, ähnliche bzw. bessere Ergebnisse erzielen.

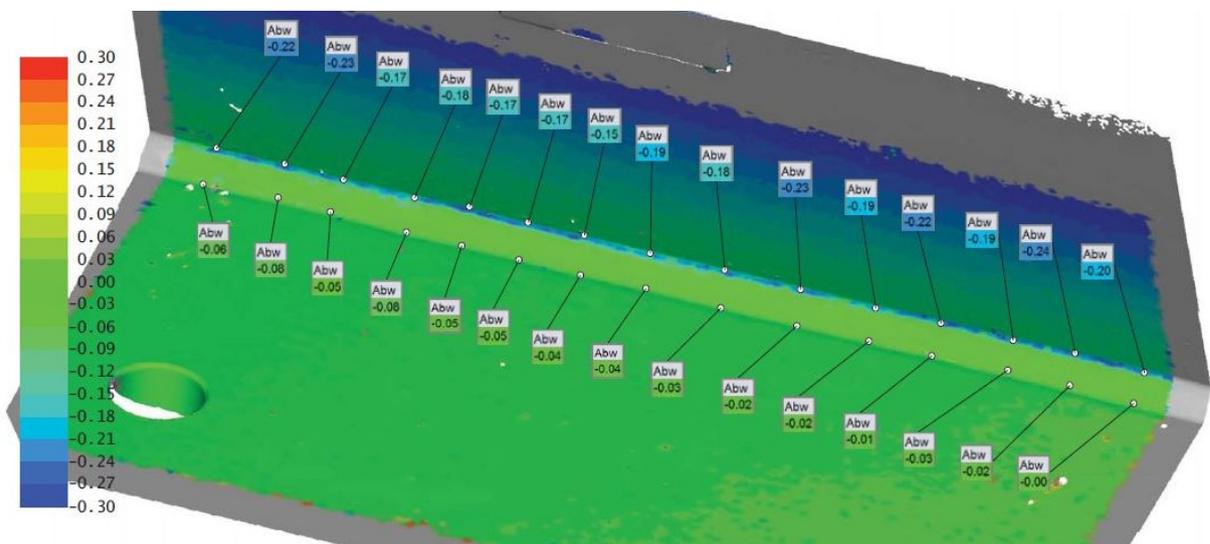


Abbildung 3.18: Gemessene Abweichungen vor und nach der HFH-Behandlung (Isometrie)

Figure 3.18: Recorded difference before and after HFMI-application (Isometric)

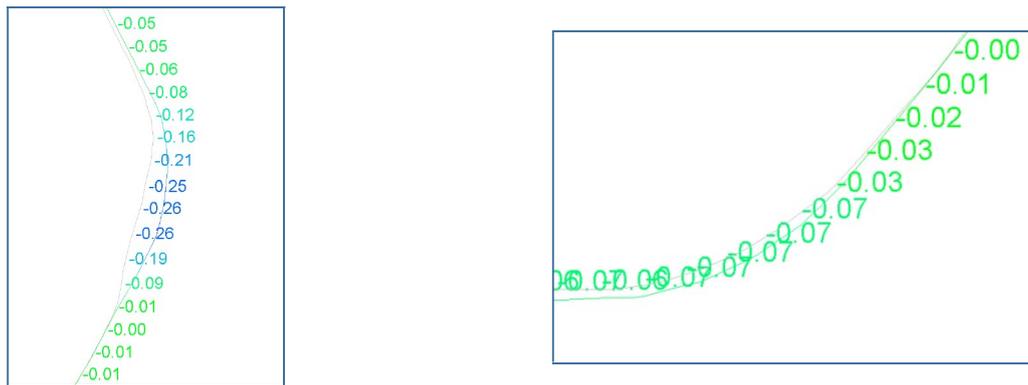


Abbildung 3.19: Gemessene Abweichungen vor und nach der HFH-Behandlung (Querschnitt)

Figure 3.19: Recorded difference before and after HFMI-application (cross section)

3.4 Visuelle Inspektion – Visual inspection

3.4.1 Durchführung - Execution

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen des DAST-Projektes zur „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“ [11] konnten die im Ermüdungsversuch geprüften Versuchsträger herangezogen werden, um die Möglichkeit zur visuellen Prüfung der Nachbehandlungsspur zu beurteilen.

Bei den Versuchsträgern mit eingeschweißter Quersteife kam es durch die behinderte Zugänglichkeit zu Einschränkungen bei der Durchführung der Nachbehandlung, so dass vor allem die Schweißnahtübergänge der Quersteife im Ausrundungsbereich zwischen Steg und Flansch in Hinblick auf die Geräteführung verhältnismäßig schlecht nachbehandelt werden konnten.

Die sich daraus ergebende unzureichende Nachbehandlung dieses Bereiches konnte mit bloßen Auge bzw. mit einer Lupe gut erkannt werden. Abbildung 3.20 zeigt die Nachbehandlungsspur am Schweißnahtübergang der Schweißnaht der Quersteife im beschriebenen Rundungsbereich mit einer deutlichen Restkerbe.



Abbildung 3.20: Nachbehandelter Schweißnahtübergang mit Restkerbe

Figure 3.20: HFMI-treated weld toe with remaining notch

3.4.2 Beurteilung – Evaluation of method

Wie auch beim Schweißen, stellt die Sichtprüfung bei der Anwendung der höherfrequenten Hämmerverfahren eine erste zuverlässige Kontrolle der Qualitätssicherung dar, mit der bereits Behandlungsfehler identifiziert werden können. Restkerben und unzureichend nachbehandelte Bereiche können von geschultem Personal mit bloßem Auge oder aber mit einer Lupe erkannt werden. Auch die Beschaffenheit der Behandlungsspur sowie die Tiefe und die Regelmäßigkeit geben einen ersten Eindruck bezüglich der Qualität der Nachbehandlungsspur.

Dabei ist zu beachten, dass sich die Hämmer Spuren der verschiedenen Verfahren unterscheiden und auch die Anwendung auf Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen Auswirkungen auf die Optik der Behandlungsspur haben kann.

3.5 Härtemessungen – Hardness measurements

3.5.1 Motivation - Motivation

In [12] konnte bereits anhand von Härtemessungen eine deutliche Verfestigung des randnahen Bereichs durch die beiden höherfrequenten Hämmerverfahren UIT und HiFIT nachgewiesen werden. Betrachtet wurden in [12] die Werkstoffe S355J2 und S690QL und es wurden Härtemessungen nach Vickers (HV_{0,3}) durchgeführt.

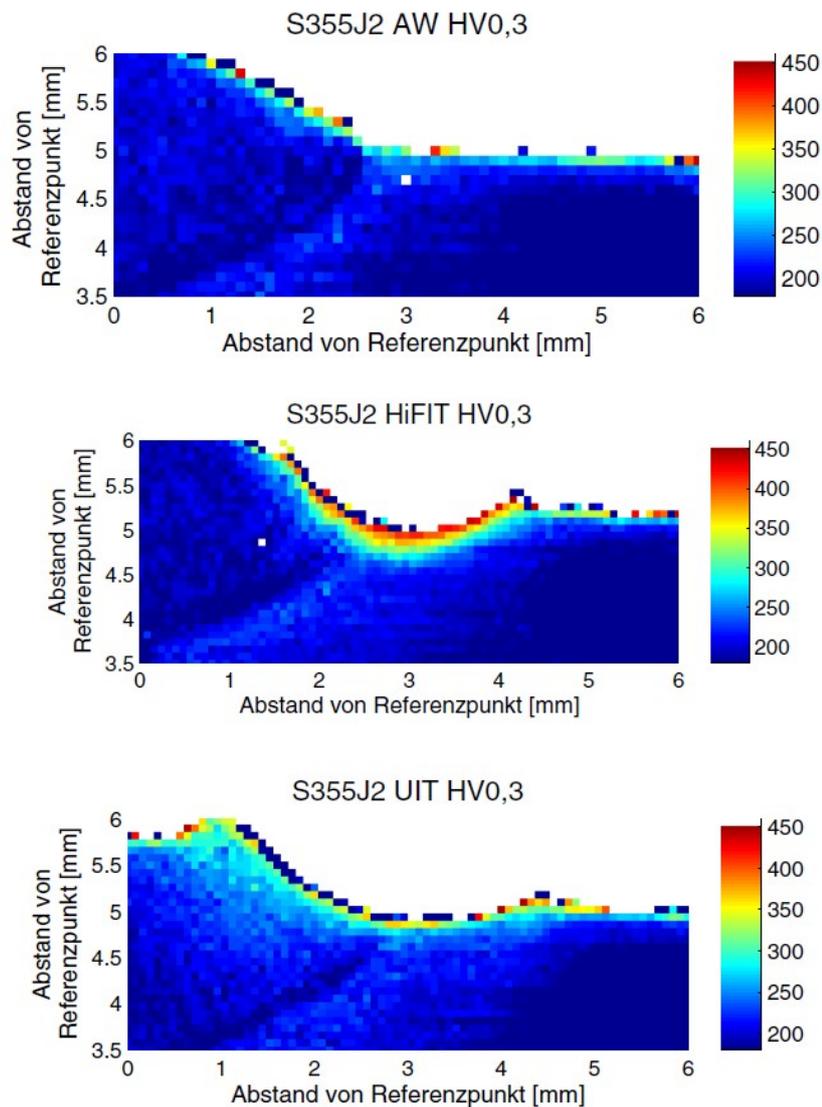


Abbildung 3.21: Härtemessungen an nachbehandelten Proben aus S355J2 aus [12]

Figure 3.21: Hardness measurements of HFMI treated welds of S355J2 acc. to [12]

Die Werte aus den Härtemessungen weichen für die beiden Verfahren leicht voneinander ab, wobei ein deutlicher Anstieg der Härte gegenüber dem Grundwerkstoff für die beiden untersuchten Verfahren zu erkennen ist. Anhand der gemessenen Werte ist erkennbar, dass das HiFIT-Verfahren eine größere Tiefenwirkung hat und auch quantitativ höhere Härtewerte als das UIT Verfahren erreicht.

Abbildung 3.21 zeigt die Ergebnisse der Härtemessungen aus [12] an Proben aus S355J2 ohne Nachbehandlung (AW) sowie mit HiFIT und UIT-Nachbehandlung. Für die Proben aus S355J2 konnte der Anstieg der Vickershärte HV0,3 von 200HV auf 350 HV und 400 HV infolge der Nachbehandlung durch die beiden Verfahren festgestellt werden.

Die Prüfung der Härte stellt ein relativ einfaches, nachvollziehbares und im Vergleich zu den 3D-Laser-Messungen kostengünstiges Verfahren dar. Deshalb ent-

stand im Verlauf des Projektes die Idee, Härtemessungen zur Qualitätssicherung der Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren heranzuziehen.

3.5.2 Allgemeines zur Härteprüfung nach Vickers nach [2] – General information on Vickers hardness testing according to [2]

Die Härteprüfung nach Vickers für metallische Werkstoffe ist in DIN EN ISO 6507 [2] in den Teilen 1 bis 4 geregelt.

Bei dem Prüfverfahren wird ein pyramidenförmiger Diamant mit quadratischer Grundfläche und festgelegtem Winkel der gegenüberliegenden Flächen mit einer definierten Kraft in die Oberfläche des zu prüfenden Bleches gedrückt. Nach der Entlastung werden die Diagonalen d_1 und d_2 , wie sie in Abbildung 3.22 abgebildet sind, vermessen[2].

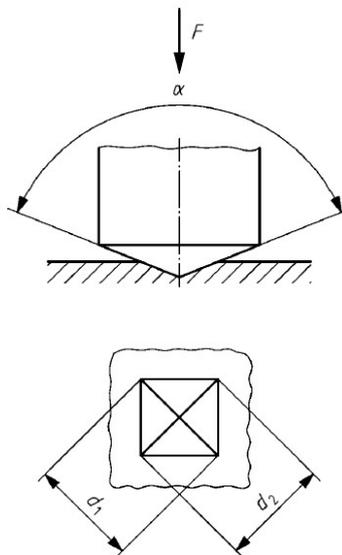


Abbildung 3.22: Prüfprinzip der Härteprüfung nach Vickers gemäß [2]

Figure 3.22: Principle of hardness measurement according to Vickers according to [2]

In Abhängigkeit des Winkels, der Prüfkraft sowie der Längen der Diagonalen wird anschließend die Vickershärte bestimmt.

Dem allgemeinen Hinweis in [2] entsprechend, dass mit abnehmender Diagonalenlänge die Streuung der Ergebnisse aus den Härtemessungen steigt, wurde eine HV1 Härtemessung durchgeführt, die im Vickers-Kleinkrafthärteprüfbereich liegt. Je kleiner die Kraft und der Diamant, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit auf einzelne Körner zu treffen, deren Härtewerte von dem umgebenden Bereich stark abweichen.

3.5.3 Anforderungen an die Probe – Requirements concerning the specimen

In DIN EN ISO 6507 [2] sind Anforderungen an die Probe gestellt, die zur Durchführung einer gültigen Messung einzuhalten sind. Die Anforderungen betreffen

unter anderem die Mindestabmessungen der Probe, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Anforderungen bezüglich einzuhaltender Rand- und Zwischenabstände.

3.5.4 Vorgehen bei der Härtemessung – Approach of hardness measurements

Das Vorgehen zur Prüfung, ob Härtemessungen HV1 nach Vickers als einfaches Qualitätssicherungsverfahren für höherfrequente Hämmerverfahren geeignet sind, gliedert sich in drei Schritte.

Im ersten Schritt wird geprüft, ob ein nennenswerter Unterschied in den Härtewerten des unbehandelten und des behandelten Grundwerkstoffes feststellbar ist. Dies konnte bereits im Rahmen von Vorversuchen an einer Probe aus S235 für beide Nachbehandlungsverfahren überprüft werden. Die Ergebnisse des Vorversuchs sind in Abbildung 3.23 dargestellt.

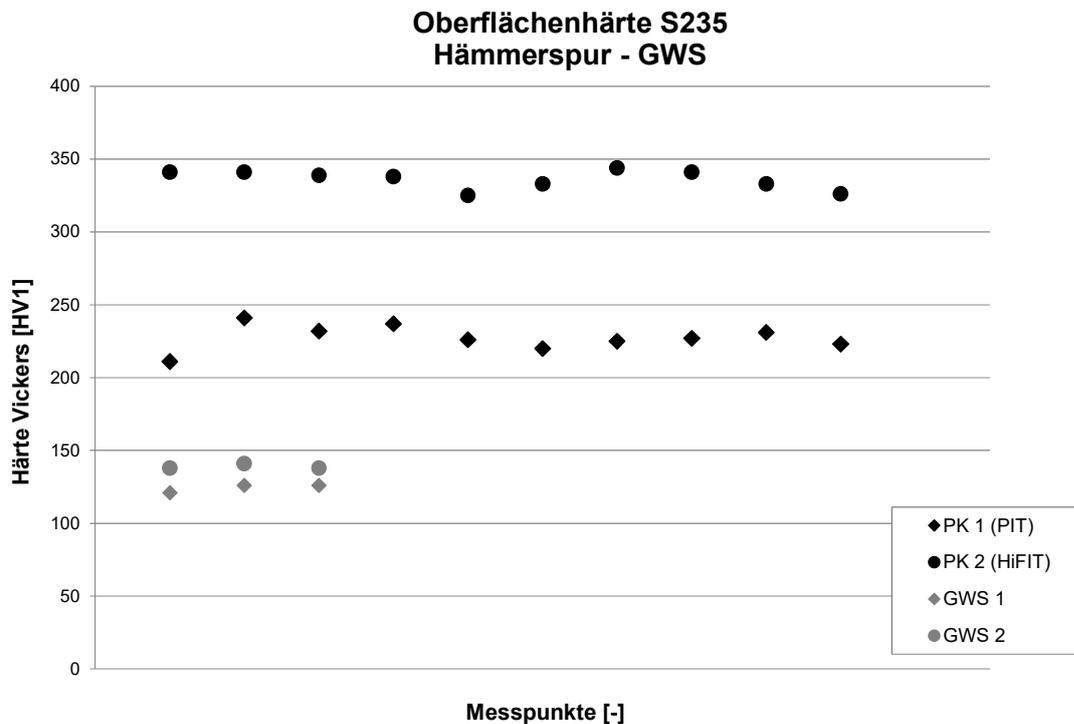


Abbildung 3.23: Härtemessungen im Rahmen eines Vorversuchs am Grundwerkstoff (GWS)

Figure 3.23: Hardness measurements of preliminary test on basic material (GWS)

Aus den an der Bauteiloberfläche gemessenen Härtewerten geht hervor, dass für beide Verfahren ein deutlicher Härteanstieg infolge der Nachbehandlung gegenüber den Härtewerten des Grundwerkstoffes (GWS) zu verzeichnen ist. Das HiFIT-Verfahren erreicht im Mittel einen Härtewert von ca. 330 HV1 und das PIT-Verfahren im Mittel einen Wert von 225 HV1. Die zugehörigen Grundwerkstoffproben weisen Härtewerte im Bereich von 120 und 140 HV1 auf.

In einem weiteren Schritt wird wiederum an Nachbehandlungsspuren am Grundwerkstoff überprüft, ob anhand der Härtewerte Einflüsse aus unterschiedlichen Intensitätseinstellungen der durchgeführten Nachbehandlung zu erkennen sind.

Sind entsprechende Einflüsse feststellbar, so ist das Verfahren der Härteprüfung nach Vickers in einem dritten Schritt auf einen nachbehandelten Schweißnahtübergang zu übertragen.

Demzufolge wurden im 2. Schritt am Grundmaterial der zwei Versuchskörper aus S235 jeweils drei unterschiedliche Behandlungsspuren mit beiden Verfahren eingebracht. Ziel war es drei unterschiedliche Intensitätsniveaus anzuwenden. Dabei repräsentiert die Behandlungsintensität B eine optimale bzw. normale Behandlung. Die mit dem Buchstaben A gekennzeichneten Behandlungsspuren wurden mit einer deutlich geringeren Intensität und die mit C gekennzeichneten Behandlungsspuren mit zu hoher Intensität durchgeführt.



Abbildung 3.24: 3 Nachbehandlungsspuren unterschiedlicher Intensität

Figure 3.24: 3 Grooves of HFMI-treatment with differing intensity

Die drei Behandlungsspuren mit variierender Intensität sind in Abbildung 3.24 zu erkennen. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Verifizierung der drei unterschiedlichen Intensitätsniveaus bzw. deren Auswirkung auf die Ermüdungsfestigkeit anhand von Ermüdungsversuchen noch nicht erfolgte. Es handelt sich hierbei lediglich um die vom Anwender variierte Intensität der Nachbehandlung.

- PIT:

Bei den mit dem PIT-Verfahren nachbehandelten Proben wurde die Intensität über die Variation der Frequenz vorgenommen. Eine Variation der Geräteeinstellungen durch den Anwender ist prinzipiell seitens der Gerätehersteller nicht vorgesehen, deshalb wurde bei den darauffolgenden Untersuchungen in Kapitel 4.2 die Nachbehandlungsdauer variiert. Bei der Behandlungsspur A wurde mit einer geringen Frequenz nachbehandelt, bei der Spur B mit vom Hersteller angegebenen optimalen bzw. normalen Einstellungen und bei der Spur C mit einer vergleichsweise höheren Frequenz.

- HiFIT:

Die Nachbehandlungsspuren der HiFIT-behandelten Proben wurden über einen Verstellmechanismus eingestellt. Die Einstellung für die Behandlungsspur A in Abbildung 3.9 entspricht einer Geräteeinstellung von 0° , für Stelle B entspricht diese 200° und für Stelle C entspricht die Geräteeinstellung 270° .

Um die Härtemessung in der Behandlungsspur am Schweißnahtübergang durchführen zu können, ist nach [2] eine maximal zulässige Oberflächenrauheit und eine ebene Fläche einzuhalten.

Deshalb wurden an den drei Nachbehandlungsspuren eines Probekörpers jeweils ein Längs- und ein Querschliff angefertigt. Die Anordnung der Makroschliffe geht aus Abbildung 3.25 hervor.

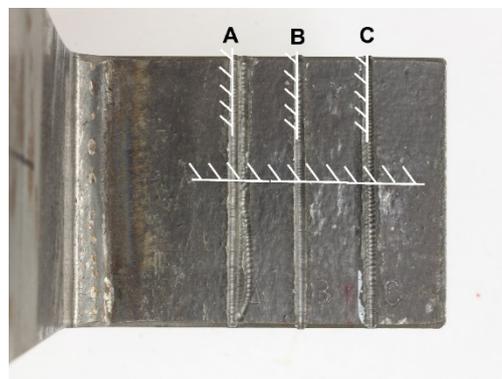


Abbildung 3.25: Anordnung der Makroschliffe an den PIT-Behandlungsspuren

Figure 3.25: Position of macro sections of PIT-grooves

3.5.5 Durchführung der Härtemessungen – Execution of hardness measurements

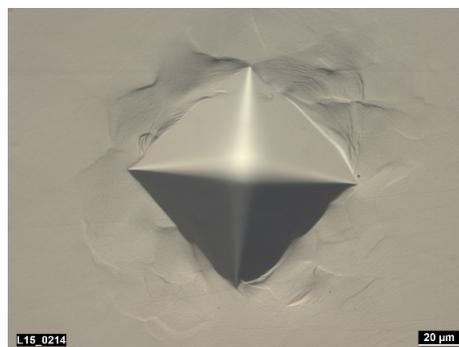


Abbildung 3.26: Einzelner Härteeindruck HV1

Figure 3.26: Single hardness measurement-point HV1

Abbildung 3.27 zeigt den isometrischen Längsschliff, der aus einer Probe angefertigt wurde. Abbildung 3.28 zeigt den zugehörigen Markoschliff des Querschliffs, an dem die Messungen durchgeführt wurden. Die Härtemessungen HV1 wurden am Längsschliff in drei Reihen und am Querschliff in zwei Spuren unter der Blechoberfläche durchgeführt. Die beschriebene und in Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30 dargestellte Anordnung wurde gewählt, um große Streuungen zu vermeiden. Wegen des nach EN ISO 6507-1 [2] einzuhaltenden Mindestabstands des Mittelpunktes des Prüfeindrucks vom Rand der Probe, der 2,5-mal der mittleren Diagonalenlänge entspricht, wurde für die Härtemessungen am Querschliff unter der Behandlungsspur eine versetzte Anordnung gemäß Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30 gewählt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der Einfluss der Rand-schichtverfestigung gemessen werden kann. Dies entspricht bei einer mittleren Diagonalenlänge von $d_M = 0,1$ mm einem einzuhaltenden Abstand von 0,25 mm. Für die ersten beiden Härteeindrücke konnte dieser nach [2] geforderte Mindestabstand nicht eingehalten werden. Die Messwerte liegen jedoch auf der sicheren Seite, denn die Mindestabstände sollen eine verfälschte Messung aufgrund von zum Hohlraum ausweichenden Materials verhindern. Ist der Mindestabstand nicht eingehalten, ergeben sich geringere Härtewerte, so dass diese in Hinblick auf eine in Relation zur Härte definierte Nachbehandlungsintensität auf der „sicheren Seite“ liegen.

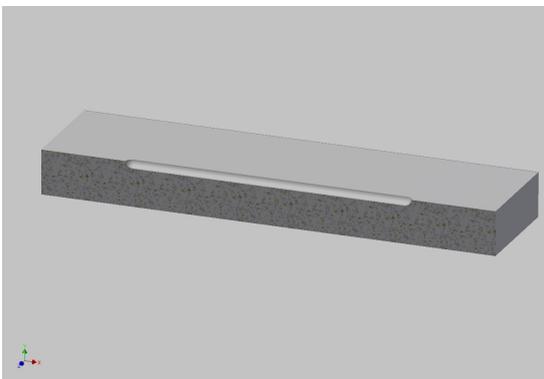


Abbildung 3.27: Isometrie Längsschliff durch die HFH-Spur

Figure 3.27: Isometric longitudinal section through the HFMI groove

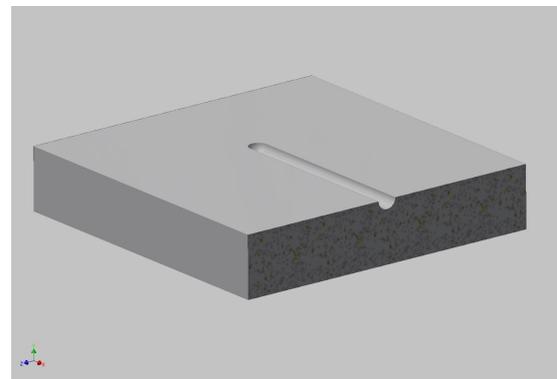


Abbildung 3.28: Isometrie Querschliff durch die HFH-Spur

Figure 3.28: Isometric cross section through the HFMI groove

Gemessen wurde die Härte HV1 nach Vickers, wie es in Abbildung 3.26 dargestellt ist. Abbildung 3.26 lässt Materialaufwürfe des den Eindringpunkt umgebenden Materials erkennen. Dies bestätigt eine eher weiche Gefügestruktur, wie sie bei einem normalfesten Baustahl S235 vorliegt.

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

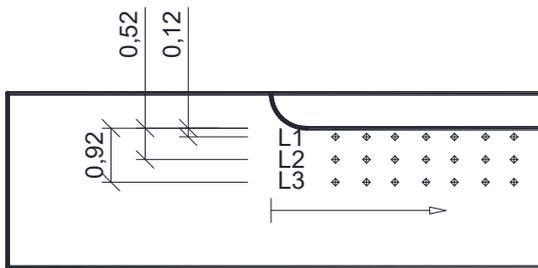


Abbildung 3.29: Drei Reihen Härtemessungen in Längsrichtung

Figure 3.29: Three Rows of hardness measurements in longitudinal direction

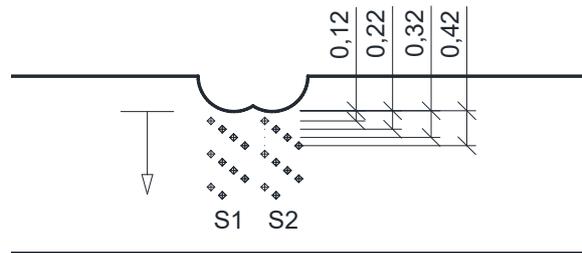


Abbildung 3.30: Zwei Spuren Härtemessungen in Querrichtung

Figure 3.30: Two Lines of hardness measurements in cross section

Um die Messungen noch näher an den Randbereich zu führen, wären HV0,3 Messungen sinnvoll, da sich hierbei die mittlere Diagonallänge und somit der Mindestabstand vom Rand der Probe zum Mittelpunkt des Prüfabdrucks reduzieren lässt. Jedoch ist bei der Anwendung von kleineren Eindringköpfen die Wahrscheinlichkeit größer, einen gegenüber dem Hauptbestandteil des Gefüges wesentlich härteren Martensit zu treffen, der die Ergebnisse für den umgebenden Bereich verfälschen kann.

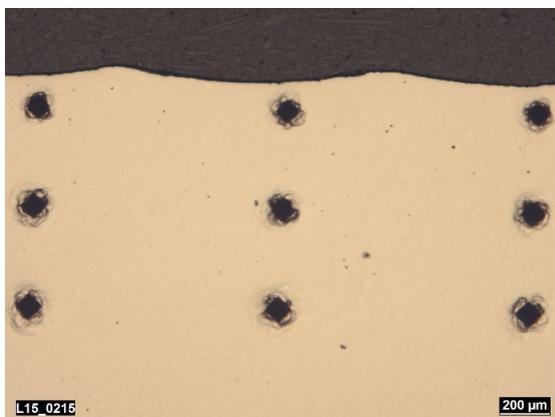


Abbildung 3.31: Drei Reihen Härtemessungen in Längsrichtung

Figure 3.31: Three Rows of hardness measurements in longitudinal direction



Abbildung 3.32: Härtemessungen in Querrichtung

Figure 3.32: Hardness measurements in cross section



Abbildung 3.33: Unverändertes Gefüge

Figure 3.33: Unaffected microstructure

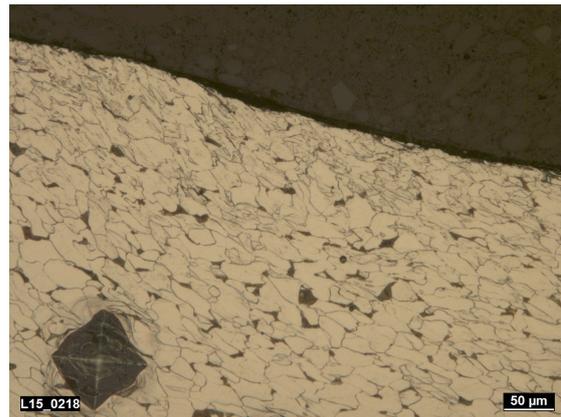


Abbildung 3.34: Durch HFH verändertes Gefüge im randnahen Bereich

Figure 3.34: HFMI affected microstructure close to the surface

Abbildung 3.34 zeigt im randnahen Bereich (oberhalb des Härteeindrucks) das durch die HFH verdichtete und veränderte Gefüge gegenüber der Gefügestruktur zur Prüfkörpermitte hin, das durch die Anwendung des HFH nicht beeinflusst wurde (Abbildung 3.33).

3.6 Auswertung der Härtemessungen an den mit PIT-nachbehandelten Spuren – Evaluation of Vickers hardness of PIT-treated grooves

3.6.1 Härtemessungen im Querschnitt unter der Nachbehandlungsspur – Vickers hardness at cross section below PIT-groove

In Abbildung 3.35 sind die Härtewerte der Messung im Querschnitt unter der Nachbehandlungsspur aufgetragen. Bei der Betrachtung der Härtewerte in Blechdickenrichtung unter der Nachbehandlungsspur ist festzustellen, dass die ersten drei Härtewerte der Behandlungsspur mit der Intensität A mit Werten von 190 - 230HV1 meist über den Werten der Intensitäten B und C liegen. Die einzelnen Messwerte aller Intensitäten weisen allerdings eine große Streuung auf, so dass die Identifizierung der unterschiedlichen Intensitätsniveaus aufgrund der Streuung nicht sinnvoll erscheint.

Aus Abbildung 3.35 geht hervor, dass der Einfluss aus der Verfestigung der Randschicht durch die Anwendung des PIT- Verfahrens eine deutliche Auswirkung auf die Härtewerte auch unter der Randschicht hat. Die Abnahme der Härtewerte mit zunehmender Tiefe ist in Abbildung 3.35 zu erkennen. Die Härte nähert sich den Werten des Grundwerkstoffs an.

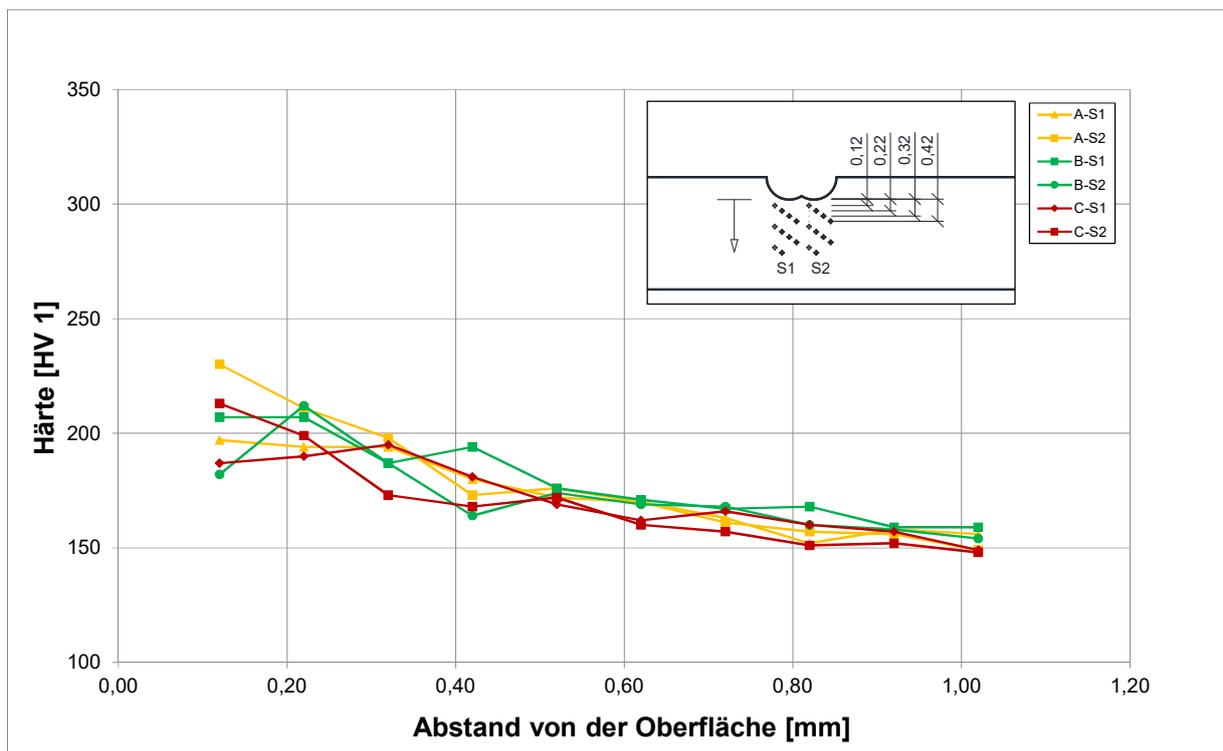


Abbildung 3.35: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität, PIT

Figure 3.35: Hardness values in plate thickness direction depending on the intensity, PIT

3.6.2 Härtemessungen im Längsschnitt unter der Nachbehandlungsspur - Vickers hardness at longitudinal section below PIT-groove

Abbildung 3.36 zeigt die Härtemessungen in drei verschiedenen Tiefen im Längsschnitt unter der Behandlungsspur. Ab einer Tiefe von etwa 0,52 mm unter der nachbehandelten Randschicht ist kaum noch ein Unterschied zwischen den einzelnen Intensitäten zu erkennen. Die Verläufe aller Intensitätsniveaus konvergieren gegen einen Härtewert von etwa 150 – 160HV1 und liegen damit nahe dem für den unbehandelten Grundwerkstoff typischen Wert.

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

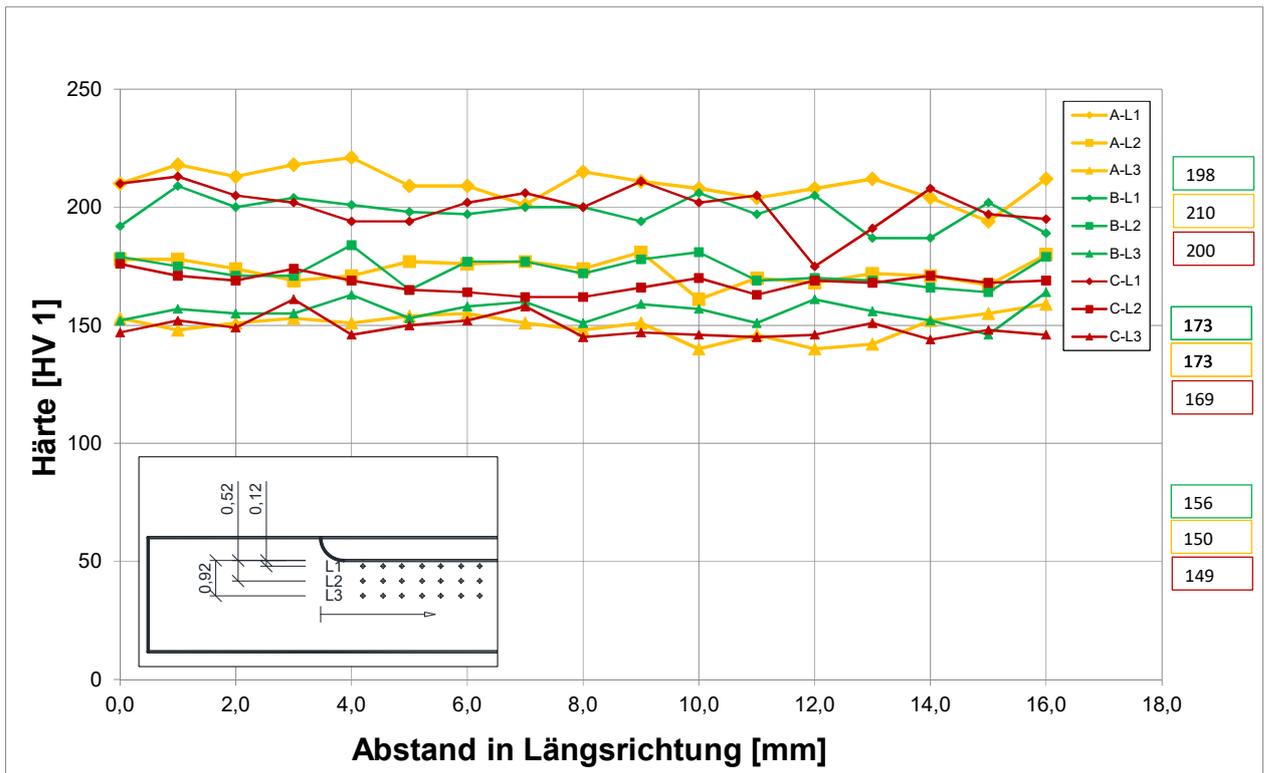


Abbildung 3.36: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen, PIT

Figure 3.36: Hardness values in groove in longitudinal direction in three different depths, PIT

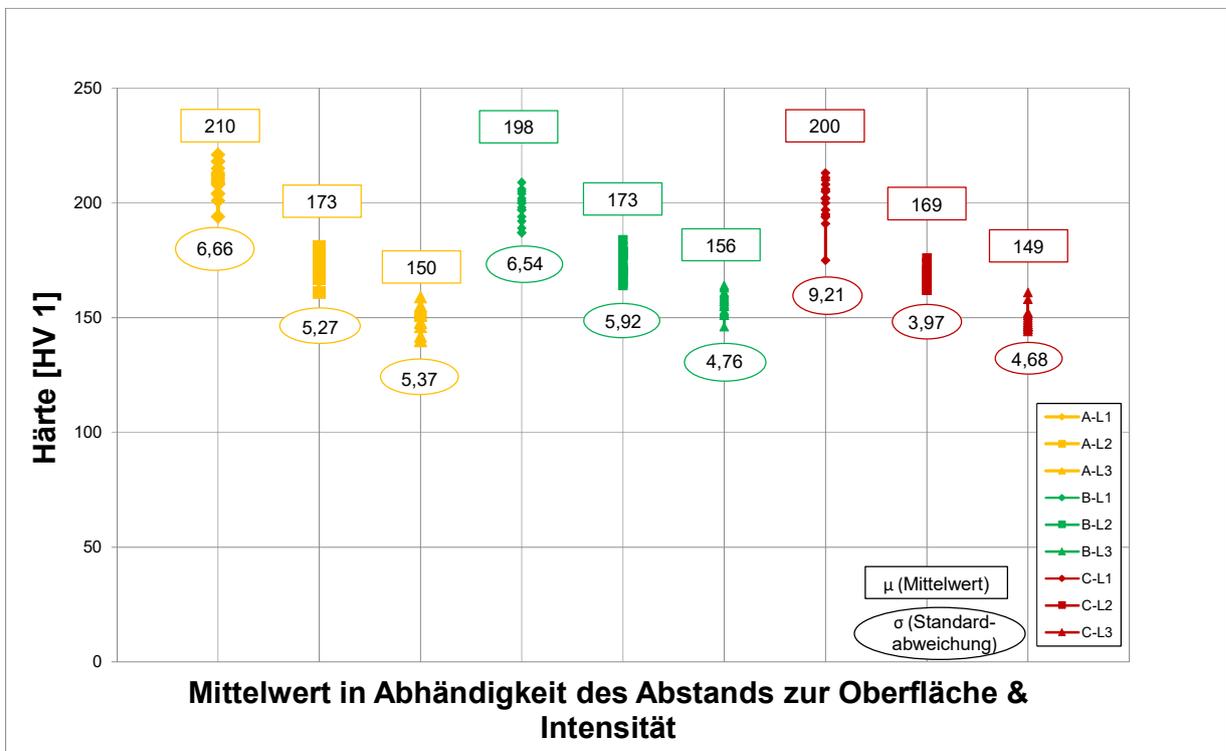


Abbildung 3.37: Streubereich und Mittelwerte der Härtemessungen, PIT

Figure 3.37: Scatter range and average of hardness measurements, PIT

Bei Betrachtung der Mittelwerte der Härtemessungen in Längsrichtung unter der Nachbehandlungsspur mit unterschiedlichen Intensitäten in Abbildung 3.37 ist festzustellen, dass die Mittelwerte der Härtewerte mit dem kleinsten Abstand zur Behandlungsspur mit ca. 5 – 6 % untereinander die größten Differenzen aufweisen. Relativ gesehen stellt dies jedoch nur eine geringe Differenz dar. Die Mittelwerte der jeweiligen Intensitäten lassen jedoch keinen eindeutigen Aufschluss auf die Intensität der Nachbehandlung zu.

Auch die Standardabweichungen weisen nur geringe Unterschiede für die jeweiligen Intensitäten auf. Dies gilt nicht für die Standardabweichung von C-L1, die aufgrund eines Ausreißers relativ groß ist.

3.6.3 Geometrie der Pineindrücke - Geometry of indentation

Die Geometrie der einzelnen Behandlungsspuren wurde anhand der Bilder des Makroschliffs in einem CAD-Programm vermessen. Abbildung 3.39 zeigt die vermessenen Pineindrücke zum einen mit Bezug auf die Blechoberfläche (Messmethode b) und zum anderen mit Bezug auf den Aufwurf (Messmethode a). Dabei ist festzustellen, dass der Pineindruck bei normaler Intensität größer ist, als bei der geringen und der hohen Intensität, siehe Abbildung 3.38. Die geringere Eindringtiefe bei einer hohen Intensität ist auf die höhere Frequenz bei der Nachbehandlungsspur C und die damit einhergehende verminderte Schlagkraft des Pitec-Geräts zurückzuführen.

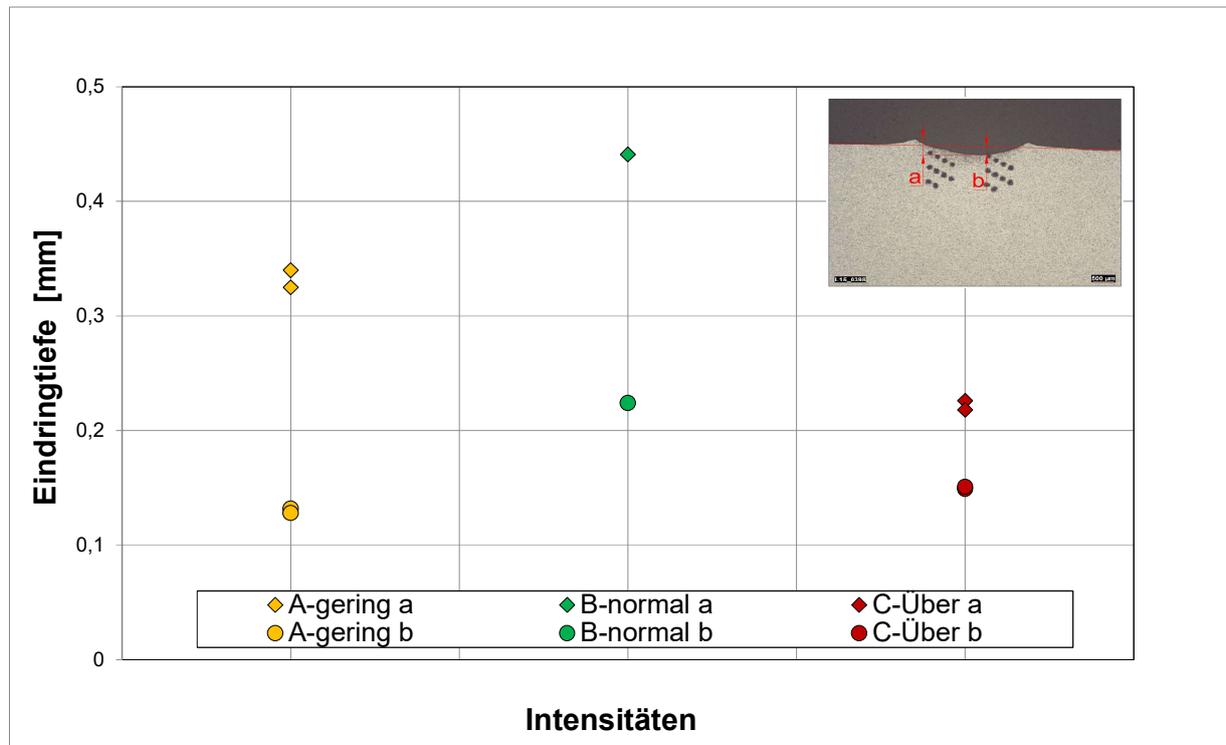


Abbildung 3.38: Eindringtiefen (PIT-Verfahren) in Abhängigkeit der Intensität

Figure 3.38: Depths of indentation (PIT-treatment) depending on intensity

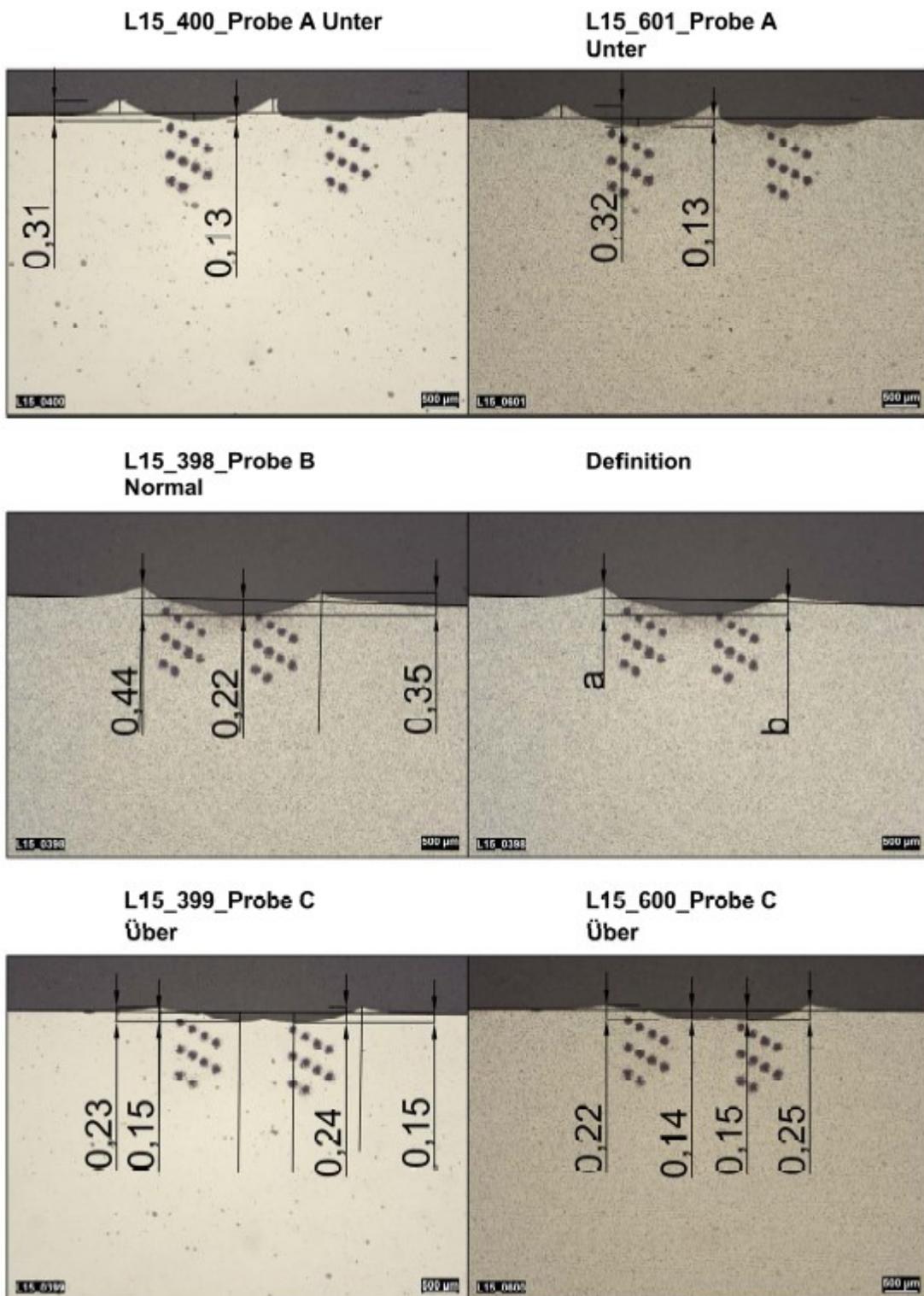


Abbildung 3.39: Eindringtiefen für die drei verschiedenen Intensitäten am Makroschliff (PIT-Verfahren) in [mm]

Figure 3.39: Depths of indentation of three different intensities on macro sections (PIT-groove) in [mm]

3.6.4 Schlussfolgerung - Conclusion

Die Ergebnisse aus den Härtemessungen HV1 zeigen, dass die Härtewerte aufgrund der Aufhärtung des randnahen Bereichs deutlich über den Härtewerten des Grundwerkstoffs liegen. Die HFH-Behandlung ist mithilfe der Härtemessungen nachweisbar. Eine Klassifizierung der Intensität der hier manuell durch den Nachbehandelnden selbst variierten Intensität konnte anhand der Härtemessungen jedoch nicht vorgenommen werden. Die Härtewerte geben keinen eindeutigen Aufschluss über die Intensität. Ursache hierfür kann sein, dass die gewählten Intensitätsvarianten keinen Einfluss auf die Aufhärtung des randnahen Bereichs haben bzw. nicht messbar sind, oder dass die Varianz der Intensität keinen Einfluss auf die Härte und somit die Tiefenwirkung hat. Ob der Einfluss der Intensität der Nachbehandlung auf die Ermüdungsfestigkeit ebenfalls solch einen geringen Einfluss hat, ist zu prüfen.

3.7 Auswertung der Härtemessungen an Behandlungsspuren der mit HiFIT-nachbehandelten Proben – Evaluation of Vickers hardness of HiFIT-treated grooves

3.7.1 Härtemessungen im Querschnitt unter der Nachbehandlungsspur - Vickers hardness at cross section below HiFIT-groove

Die Untersuchungen in den Abschnitten 3.6.1 und 0 an PIT-behandelten Proben wurden gleichermaßen an HiFIT-behandelten Proben durchgeführt. In Abbildung 3.40 sind die Härtewerte der Messung im Querschnitt unter der Nachbehandlungsspur aufgetragen. Bei der Betrachtung der Härtewerte in Blechdickenrichtung unter der Nachbehandlungsspur ist festzustellen, dass die Härtewerte der Behandlungsspur mit der Intensität A mit Werten von 130 - 220HV1 überwiegend unter den Werten der Intensitäten B und C liegen. Die einzelnen Messwerte aller Intensitäten weisen lediglich im Bereich der ersten drei Werte unter der Oberfläche größere Streuungen auf. Dies wird darauf zurückgeführt, dass von den beiden Messspuren S1 und S2 nur eine Spur direkt unter der Eindruckmitte platziert werden konnte, woraus sich der Unterschied der Messspuren S1 und S2 im oberflächennahen Bereich ergibt. Darüber hinaus lassen die durchgeführten Härtemessungen eine eindeutige Identifizierung der unterschiedlichen Intensitätsniveaus zu, wobei die gemessenen Härtewerte mit steigender Behandlungsintensität zunehmen.

Weiterhin geht aus Abbildung 3.40 hervor, dass der Einfluss aus der Verfestigung der Randschicht durch die Anwendung des HiFIT-Verfahrens eine deutliche Auswirkung auf die Härtewerte auch unter der Randschicht hat. Die Abnahme der Härtewerte mit zunehmender Tiefe ist in Abbildung 3.40 zu erkennen. Die Härte nähert sich den Werten des Grundwerkstoffs an. Bemerkenswert ist, dass für die Behandlungsintensitäten B und C auch 0,9 mm unter der Oberfläche noch Härtewerte gemessen wurden, die um ca. 60HV1 größer als für die Behandlungsintensität A sind.

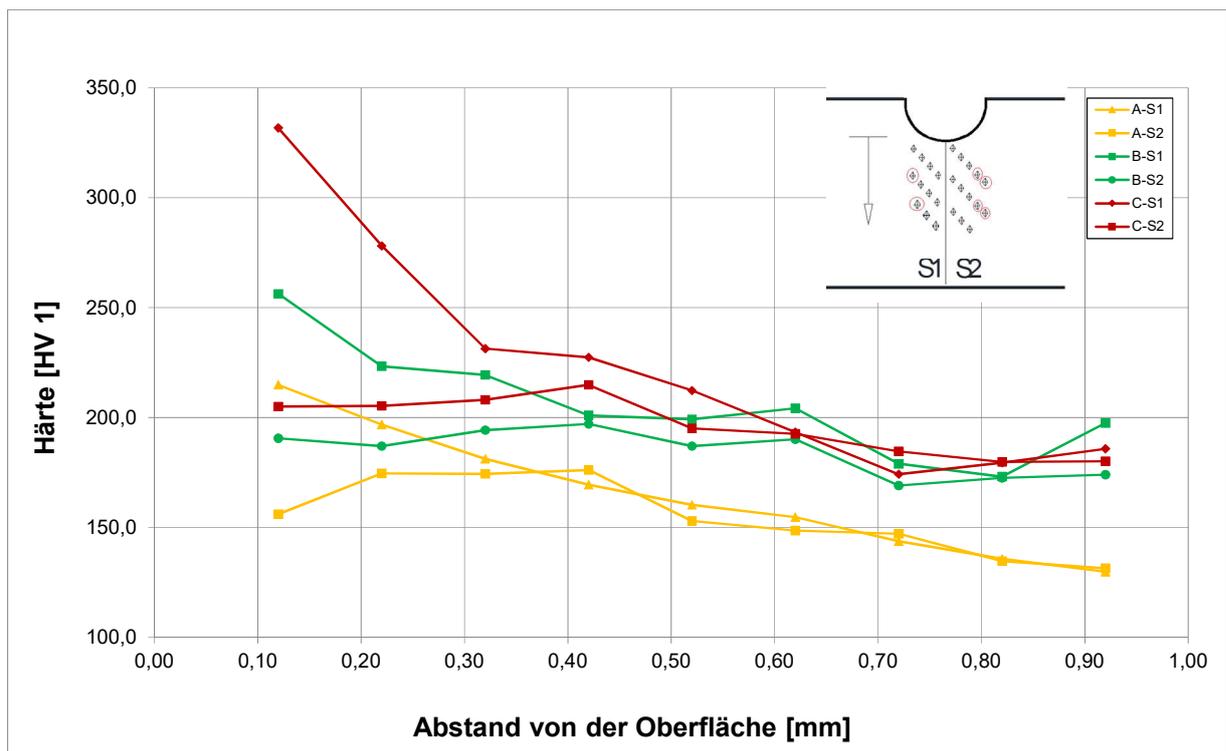


Abbildung 3.40: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität, HiFIT

Figure 3.40: Hardness values in plate thickness direction depending on the intensity, HiFIT

3.7.2 Härtemessungen längs unter der Nachbehandlungsspur - Vickers hardness at longitudinal section below HiFIT-groove

Abbildung 3.41 zeigt die Härtemessungen für das HiFIT-Verfahren in drei verschiedenen Tiefen im Längsschnitt unter der Behandlungsspur. Auch in Längsrichtung ist die variierte Intensität anhand der Härtewerte deutlich festzustellen und dadurch quantifizierbar. Dies zeigt sich am deutlichsten für die hohe Intensität, wobei die Unterschiede zwischen den Behandlungsspuren normaler und geringer Intensität in Tiefenrichtung geringer ausfallen.

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

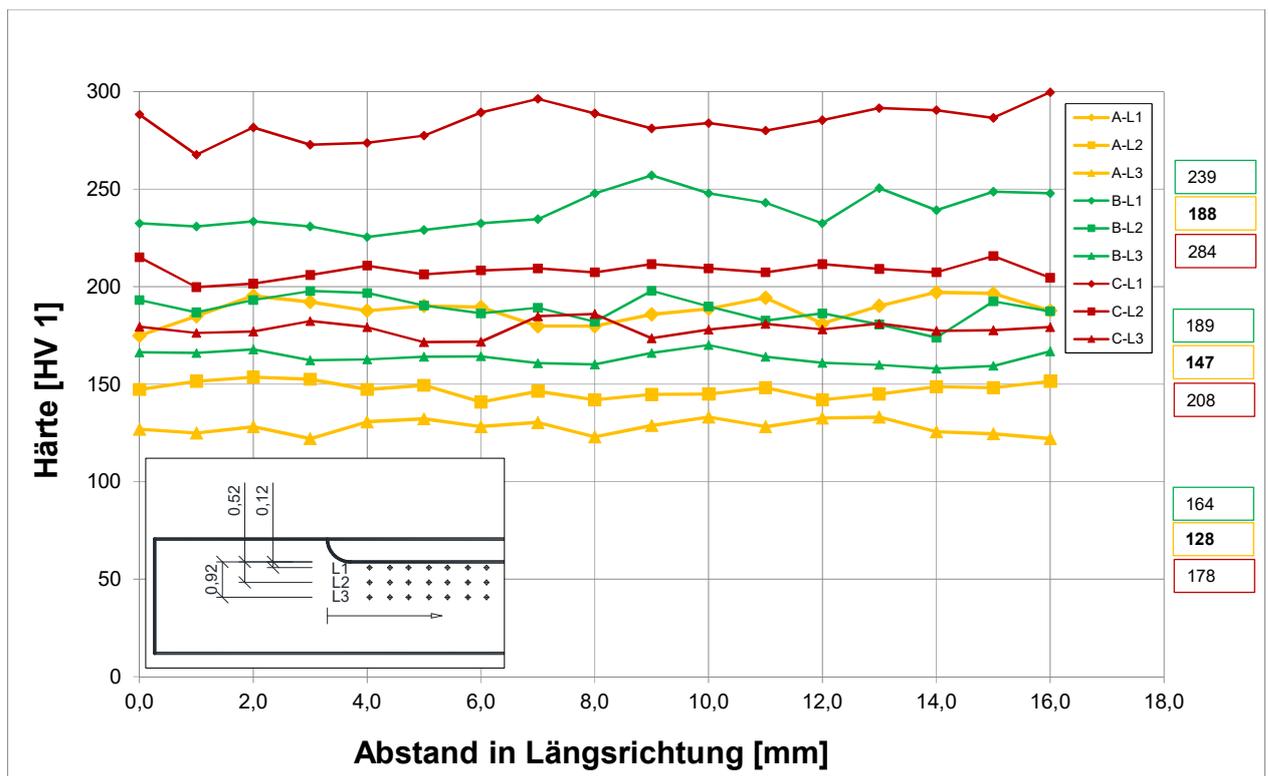


Abbildung 3.41: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen, HiFIT

Figure 3.41: Hardness values in longitudinal groove direction in three different depths, HiFIT

3.8 Vergleich der Härtemessungen der beiden Verfahren – Comparison of Vickers hardness of the two HFMI-treatments

3.8.1 Vergleich der Härtemessungen im Querschnitt unter den HiFIT- und PIT-behandelten Proben – Comparison of Vickers hardness values of cross sections below HiFIT- and PIT-grooves

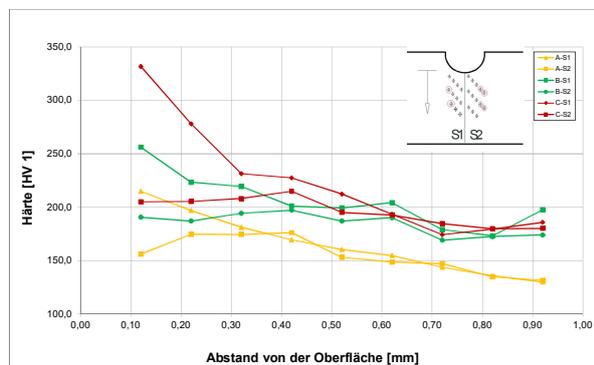


Abbildung 3.42: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität (HiFIT)

Figure 3.42: Hardness values in plate thickness direction depending on the intensity (HiFIT)

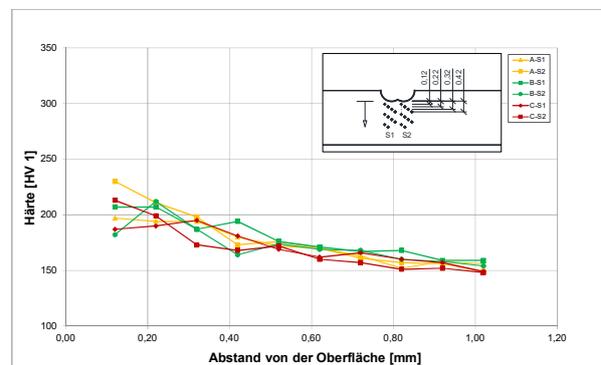


Abbildung 3.43: Härtewerte in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität (PIT)

Figure 3.43: Hardness values in plate thickness direction depending on the intensity (PIT)

Aus den Härtemessungen in Querrichtung unter der HiFIT-Behandlungsspur in Abbildung 3.42 geht hervor, dass die Variation der Intensität bei der HiFIT-Nachbehandlung einen Einfluss auf die gemessenen Härtewerte hat. So liegen die oberflächennahen Härtewerte der mit hoher Intensität erzeugten Behandlungsspur deutlich über den Härtewerten der mit normaler und mit geringer Intensität erzeugten Spuren. Mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche nimmt dieser Effekt ab und die mit normaler und geringer Intensität erzeugten Spuren liegen dicht beieinander. Die mit geringer Intensität erzeugte Spur ist selbst bei einem großen Abstand zur Oberfläche von 0,8 bis 0,9 mm von den mit normaler und hoher Intensität behandelten Spuren zu unterscheiden.

Bei den Ergebnissen der mit PIT-nachbehandelten Proben, die in Abbildung 3.43 dargestellt sind, erscheint der Unterschied für die verschiedenen Intensitäten gering und gibt qualitativ keinen Aufschluss über die Intensität. Auch bei den PIT-behandelten Proben streuen die Messwerte im oberflächennahen Bereich stärker als im oberflächenfernen Bereich. Jedoch fällt auf, dass die Werte insgesamt näher beieinander liegen, als die Härtewerte der HiFIT-behandelten Proben.

3.8.2 Auswertung der Härtemessungen im Längsschnitt unter den HiFIT- und PIT- Behandlungsspuren - Comparison of Vickers hardness at longitudinal sections below HiFIT- and PIT-grooves

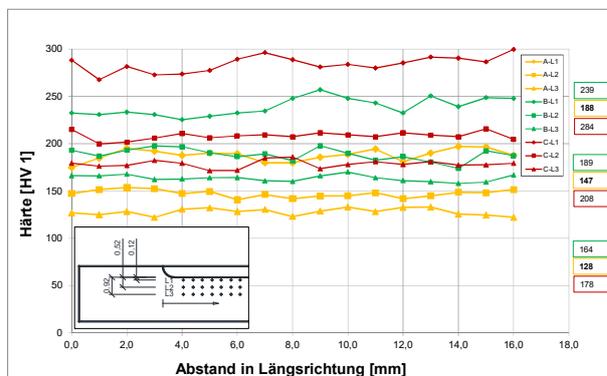


Abbildung 3.44: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen (HiFIT)

Figure 3.44: Hardness values in longitudinal groove direction in three different depths (HiFIT)

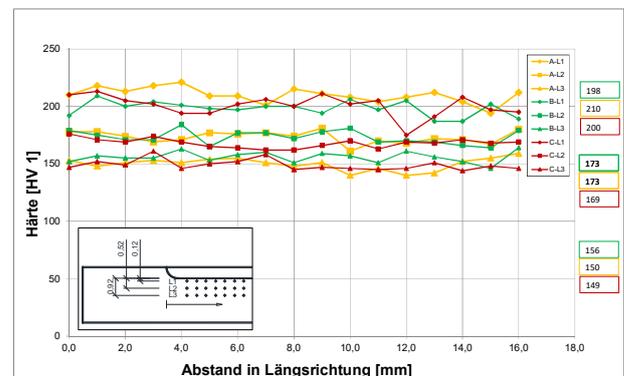


Abbildung 3.45: Härtewerte in Spurlängsrichtung in drei verschiedenen Tiefen (PIT)

Figure 3.45: Hardness values in longitudinal groove direction in three different depths (PIT)

Bei Betrachtung der Härtewerte der HiFIT-Behandlungsspur in Längsrichtung in Abbildung 3.44 fällt auf, dass sich, ähnlich den im Querschnitt gemessenen Härtewerten, die variierte Intensität qualitativ widerspiegelt. Für die hohe Intensität ergibt sich ein Mittelwert von ca. 285HV1 im Abstand von 0,12 mm zur Oberfläche, der deutlich über dem Härtewert des Grundwerkstoffs liegt. Die Unterschiede zwischen den Behandlungsspuren normaler und geringer Intensität sind noch zu erkennen, jedoch weniger deutlich als bei der mit hoher Intensität behandelten Spur.

3 Untersuchungen im Rahmen der Kurzstudie – Investigations in the frame of this short study

Die Differenz zwischen den einzelnen Intensitäten nimmt für beide Verfahren mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche in Tiefenrichtung ab.

In Längsrichtung fällt bei den mit PIT-behandelten Proben unter der Hammerspur im Gegensatz zu den HiFIT-nachbehandelten Proben auf, dass sich die Härtewerte nur geringfügig unterscheiden und nahezu keinen Hinweis auf die Behandlungsintensität liefern. Die Mittelwerte der Messwerte für alle Intensitäten der oberflächennahen Spur liegen mit einer maximalen Abweichung von ca. 6 % untereinander dicht beieinander.

Jedoch ist der Unterschied der Härte im Vergleich zum unbehandelten Grundwerkstoff, die bei ca. 130HV1 liegt, in einer Messtiefe von 0,12 mm mit einem Mittelwert von ca. 200 HV1 noch deutlich zu erkennen.

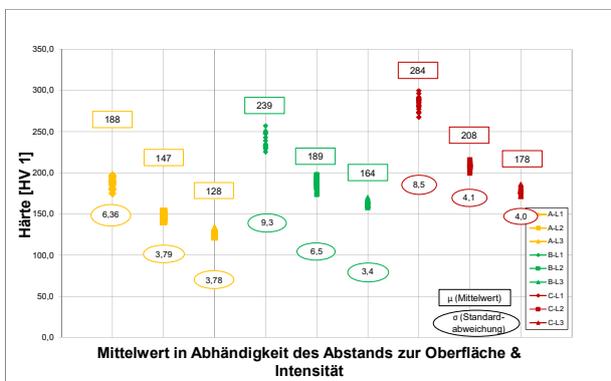


Abbildung 3.46: Streubereich und Mittelwerte der Härtmessungen (HiFIT)

Figure 3.46: Scatter range and average of hardness measurements (HiFIT)

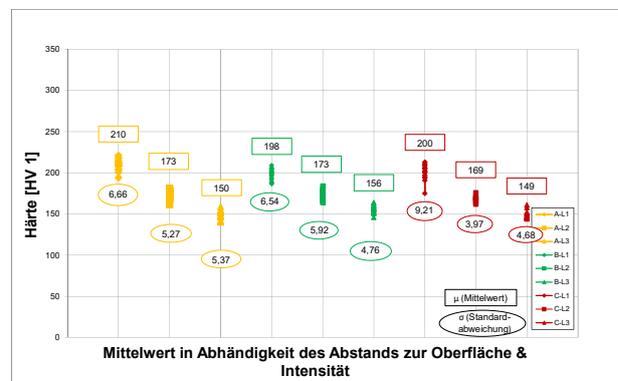


Abbildung 3.47: Streubereich und Mittelwerte der Härtmessungen (PIT)

Figure 3.47: Scatter range and average of hardness measurements (PIT)

Die Gegenüberstellung der Härtmessungen der verschiedenen Verfahren zeigt, dass die Härtewerte nach der PIT-Nachbehandlung aller Intensitäten insgesamt sehr dicht beieinander liegen. Bei der mit dem HiFIT-Verfahren nachbehandelten Spur ist eine Abhängigkeit der gemessenen Härtewerte von der Intensität erkennbar. Bei beiden Verfahren kann durch die Nachbehandlung der Zuwachs der Härte gegenüber dem Grundwerkstoff über die Härtmessung erkannt werden.

3.8.3 Schlussfolgerung - Conclusion

Die Ergebnisse der Härtmessungen an den HiFIT-Proben zeigen, dass die Härte prinzipiell ein geeigneter Parameter ist, die Intensität einer Nachbehandlung qualitativ zu erfassen. Die variierte Intensität bei der HiFIT-behandelten Spur konnte anhand der Härtewerte in einem Abstand von 0,12 mm zur Oberfläche deutlich und qualitativ abgelesen werden. Mit zunehmenden Abstand zur behandelten Oberfläche nahm der Einfluss der Intensität ab.

Die mit HiFIT-behandelten Proben erreichten dabei generell höhere Härtewerte als die mit PIT behandelten Proben. Auch fällt auf, dass die Härtewerte der PIT-Proben insgesamt unabhängig von der Intensität sind und eng beieinander liegen.

Dieser Sachverhalt konnte bereits in [11] für die Verfahren UIT und HiFIT festgestellt werden.

Dies deutet daraufhin, dass die Variation der Intensität bei einer PIT-Behandlung kaum einen Einfluss auf die Aufhärtung der Randschicht hat, da die Härtemessungen an den HiFIT-Proben zeigen, dass die Intensität grundsätzlich messbar ist.

3.8.4 Ausblick - Outlook

Die Effektivität einer HFH-Nachbehandlung basiert hauptsächlich auf der lokalen Eigenspannungsänderung hin zu positiv wirkenden Druckeigenspannungen. Deshalb erweisen sich die eingetragenen Eigenspannungen als der aussagekräftigste Parameter, um die Wirksamkeit einer Nachbehandlung zu bestimmen. Da Eigenspannungsmessungen jedoch sehr teuer und aufwändig sind, erscheint die Erfassung der Wirksamkeit über die vorgestellte Härtemessung von Vorteil. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss aus der Verfestigung der Randschicht durch die Anwendung der HFH-Verfahren eine deutliche Auswirkung auf die Härtewerte auch unter der Randschicht hat und somit Härtemessungen ein geeignetes Verfahren zur Qualitätssicherung darstellen könnten. Unterschiede bezüglich der Intensität einer Nachbehandlung konnten anhand der Härtemessungen nur für das HiFIT-Verfahren nachgewiesen werden.

Ob jedoch die Intensität der Nachbehandlung auch einen Einfluss auf die Höhe der Druckeigenspannungen hat bzw. auf den damit einhergehenden Ermüdungsfestigkeitszuwachs, kann nur anhand von aussagekräftigen Eigenspannungsmessungen und begleitenden Ermüdungsversuchen getroffen werden.

Folgende Schritte sind aus Sicht der Forschungsstellen deshalb zur Verifizierung der Härtemessung als Qualitätssicherungsverfahren noch erforderlich:

- Versuche zur Feststellung der Auswirkungen variierender Intensitäten auf die Eigenspannungszustände
- Auswirkungen der variierenden Intensitäten auf die Ermüdungsfestigkeit

4 Ermüdungsversuche unter Variation der Intensität – Fatigue tests under variation of intensity

Kurzfassung

Im Zuge der Entwicklung eines geeigneten Qualitätssicherungsverfahrens für HFH-behandelte Bauteile stellt sich die Frage nach dem tatsächlichen Einfluss verschiedener Nachbehandlungsintensitäten auf die Ermüdungsfestigkeit. Anhand eines Versuchsprogramms, bestehend aus acht Ermüdungsversuchen unterschiedlicher Nachbehandlungsintensität wurde der Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit überprüft. Die Vorgehensweise und die Versuchsergebnisse sind in diesem Kapitel dargestellt.

Abstract

The question of the influence arises for differing treatment-intensities on the fatigue resistance during the investigations focusing on the development of an appropriate quality assurance test for HFMI-treated joints. Based on a test series of eight specimens, treated with different intensities, the effect of different treatment intensities is investigated. This chapter describes the approach and the results of the test series under varying treatment-intensity.

4.1 Allgemeines – General information

Die Härtemessungen an den Proben, die mit unterschiedlichen Intensitäten behandelt wurden, zeigen, dass anhand der Härtemessungen keine Unterschiede bezüglich der Nachbehandlungsintensität für das PIT-Verfahren festzustellen sind. Wie auch die Untersuchungen in den Kapiteln 3.3 und 3.4 zeigen, sind die Auswirkungen einer Nachbehandlung mit unterschiedlicher Intensität auf die Ermüdungsfestigkeit anhand von Ermüdungsversuchen zu untersuchen.

Ergänzend zu den variierten Intensitätseinstellungen für die Härteuntersuchungen am Grundwerkstoff S235JR werden im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“ [11] zusätzlich Ermüdungsversuche an Querstreifen aus dem Werkstoff S355J2 unter Variation der Behandlungsintensität durchgeführt.

Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, wird die von den beiden Geräteherstellern gewählte Intensitätseinstellung für die Behandlung des Nahtübergangs jeweils anhand eines Ermüdungsversuchs überprüft. Die Versuche werden am KIT auf einer servohydraulischen Prüfmaschine bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ durchgeführt, Abbildung 4.1. Als Abbruchkriterium dient eine definierte Wegzunahme, bei der ein deutlich sichtbarer Anriss vorliegt, Abbildung 4.2. Es ist zu erkennen, dass bei beiden Probekörpern die Anrisse von mehreren HFH-behandelten Nahtübergängen ausgehen. Anhand der Ergebnisse soll gezeigt werden, dass die für den Nahtübergang gewählte Intensitätseinstellung, die der optimalen Intensitätseinstellung B am Grundmaterial entspricht, zu einer vergleichbaren Ermüdungsfestigkeit wie bei den in [11] geprüften Probekörpern führt.

4 Ermüdungsversuche unter Variation der Intensität – Fatigue tests under variation of intensity

Dies stellt die Voraussetzung für die weiteren Untersuchungen zur Vickershärte im Bereich des Eindruckes dar und markiert den Referenzwert in Hinblick auf die verschiedenen untersuchten Intensitätseinstellungen. Die Ergebnisse der zwei durchgeführten Ermüdungsversuche sind im Wöhlerdiagramm in Abbildung 4.3 zusammen mit den Ergebnissen der in [7] durchgeführten Versuche dargestellt. Es zeigt sich, dass beide Probekörper auf dem Beanspruchungsniveau von $\Delta\sigma = 250 \text{ N/mm}^2$ vergleichbare Lebensdauern wie die in [7] geprüften Proben erreichen. Beide im Projekt geprüften Proben erreichen zudem nahezu identische Lebensdauern.



Abbildung 4.1: Ermüdungsversuch an HFH-behandelter Quersteife am KIT

Figure 4.1: Fatigue test on HFMI - treated transverse stiffener at KIT

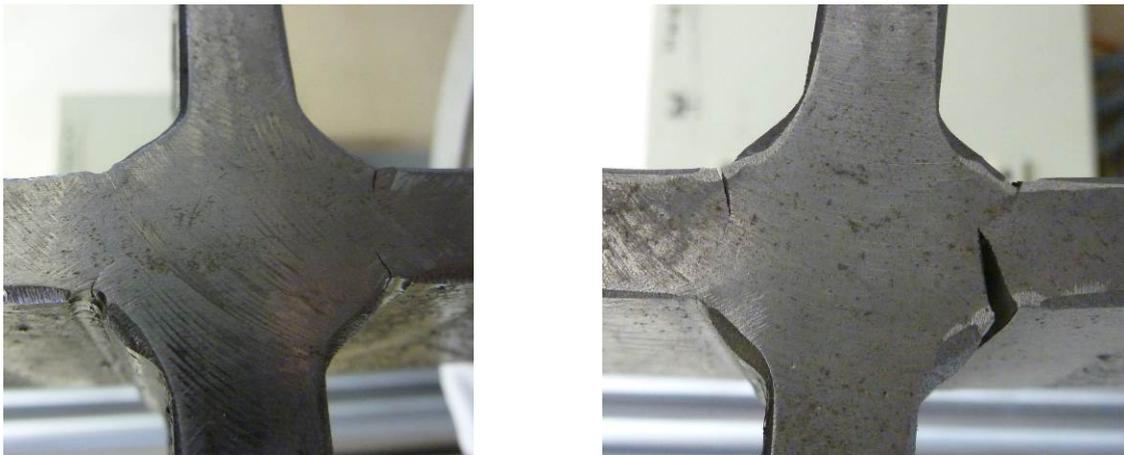


Abbildung 4.2: Anrisse HFH-behandelter Proben bei Versuchende.

Figure 4.2: Fatigue cracks on HFMI - treated specimens at the end of the experiment

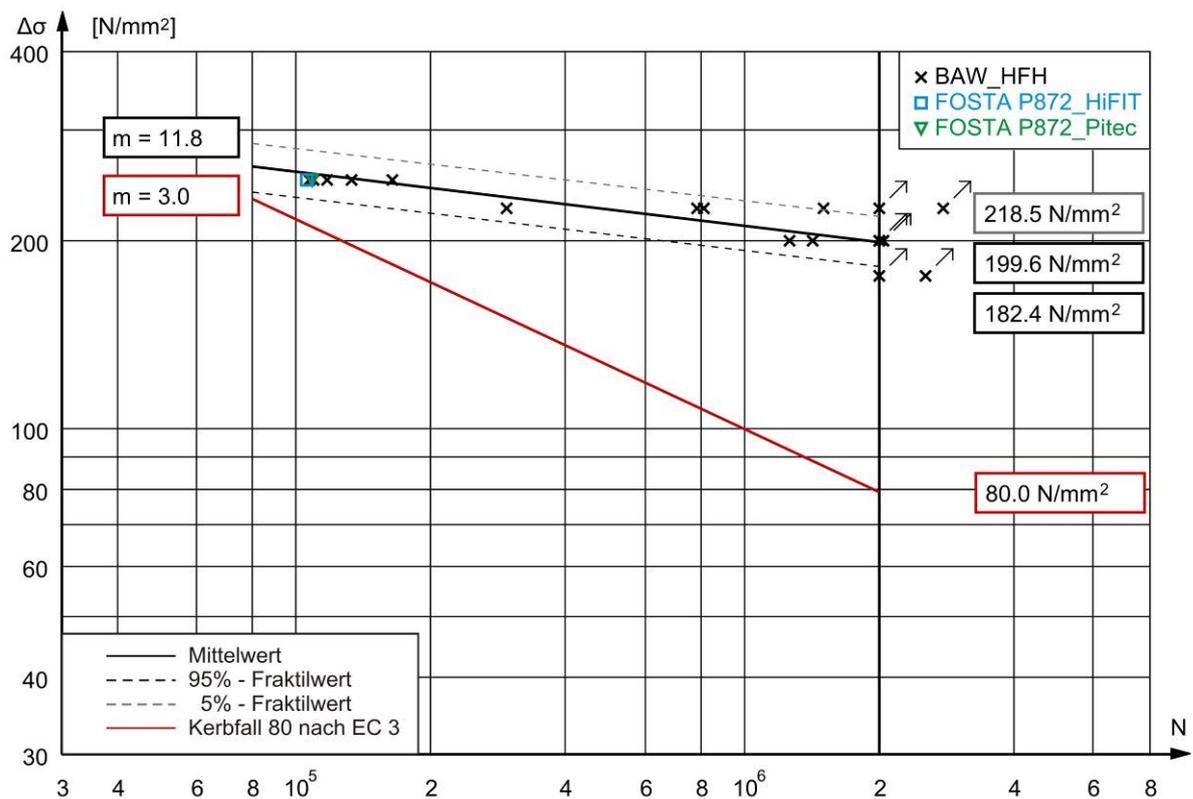


Abbildung 4.3: Wöhlerdiagramm: Gemeinsame Darstellung der in [2] durchgeführten Ermüdungsversuche mit den im Projekt geprüften Proben

Figure 4.3: SN-Curve: Joint presentation of executed fatigue tests with the audited project specimens

4.2 Nachbehandlung - HFMI-treatment

Beim PIT-Verfahren wurde die Intensität über die Behandlungsgeschwindigkeit variiert. Der Richtwert einer angemessenen Behandlung liegt bei 20cm/min, ist

jedoch abhängig von der tatsächlichen Kerbgeometrie. Der PIT-Anwender hat dementsprechend eine Nachbehandlung normaler Intensität vorgenommen und in Abhängigkeit dieser die Nachbehandlungszeit für eine Behandlung mit geringer Intensität halbiert. Für eine Behandlung mit hoher Intensität wurde die Behandlungszeit dementsprechend verdoppelt. So wurde der 60mm lange Schweißnahtübergang in Abhängigkeit der Variation der Intensität folgendermaßen nachbehandelt:

Nachbehandlung mit normaler Intensität: 30 sec

Nachbehandlung mit geringer Intensität: 15 sec

Nachbehandlung mit hoher Intensität: 60 sec

Nach der Behandlung mit geringer Intensität konnten mit bloßem Auge noch Restkerben erkannt werden.

Die Nachbehandlungsspuren der HiFIT-Proben wurden über einen Verstellmechanismus reguliert. Die Einstellung für die Stelle A in Abbildung 3.9 entspricht 0° , für Stelle B entspricht sie 200° und für Stelle C entspricht sie 270° .

4.3 Versuchsdurchführung – Experimental procedure

Die Probekörpergeometrie ist identisch zu den in [11] geprüften Proben. Unterschieden wird auch im Rahmen dieser Versuchsserie zwischen einer optimalen bzw. normalen Behandlungsintensität sowie einer hohen (Serie I_hoch) und einer niedrigen (Serie I_niedrig) Intensität. Die Versuche wurden am KIT auf einer Resonanzprüfmaschine bei einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R = 0,1$ durchgeführt.

4.4 Versuchsergebnisse – Test results

Die Ergebnisse sind im Wöhlerdiagramm in Abbildung 4.4 zusammen mit den Ergebnissen an mit optimaler Intensität behandelten Probekörpern (Serie: DAST_2_E_HFH) dargestellt. Sowohl die mit hoher als auch die mit niedriger Intensität behandelten Probekörper liegen im Streuband der mit optimaler Intensität behandelten Probekörper, wobei für diese Probekörper eine größere Streuung festzustellen ist. Des Weiteren zeigt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Behandlungsintensität und der erreichten Lebensdauer bei diesen Probekörpern. So wurde beispielsweise auf einem Beanspruchungsniveau von 225 N/mm^2 und der niedrigen Behandlungsintensität sowohl die geringste als auch die höchste Lebensdauer erreicht.

Die grüne Linie fasst dabei die mit hoher Intensität erreichte Ermüdungsfestigkeit bei 50% Überlebenswahrscheinlichkeit zusammen, die blaue Linie die mit geringer Intensität nachbehandelten Versuchskörper. Der Unterschied zur schwarzen Wöhlerlinie der mit normaler Intensität behandelten Proben fällt sehr gering aus.

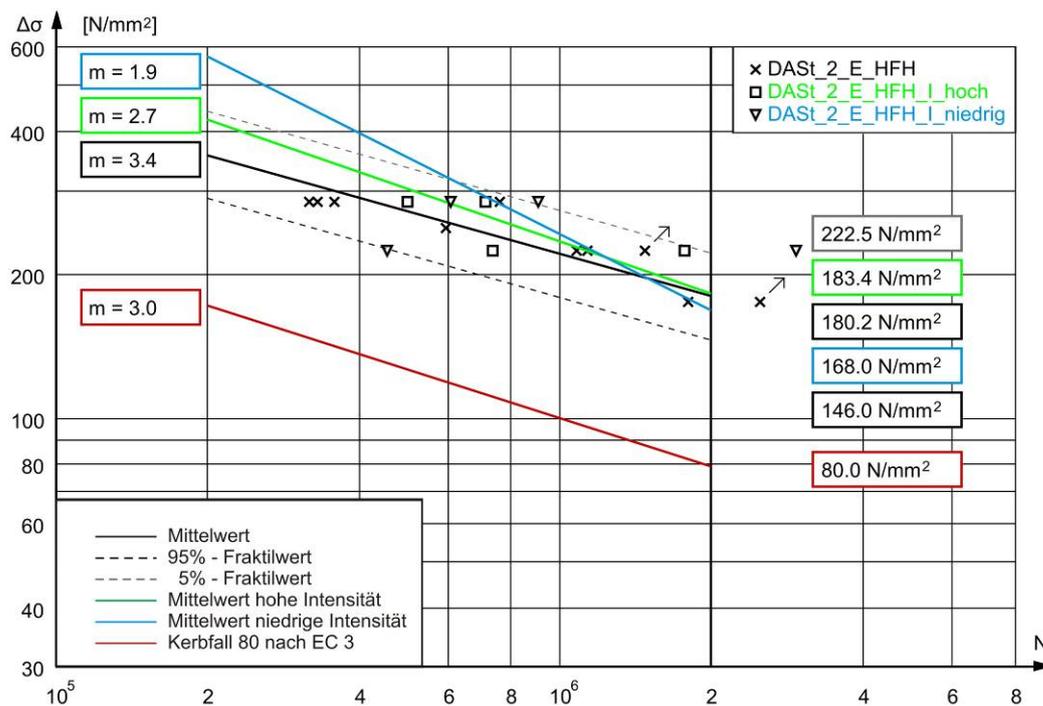


Abbildung 4.4: Wöhlerdiagramm der in [11] durchgeführten Ermüdungsversuche bei unterschiedlichen Behandlungsintensitäten.

Figure 4.4: SN-curve of fatigue tests with different treatment intensities carried out in [11]

4.5 Zusammenfassung – Conclusion

Die ersten Tastversuche zur Ermüdungsfestigkeit von mit variierender Intensität nachbehandelten Schweißnahtübergängen deuten darauf hin, dass die Sensitivität der Ermüdungsfestigkeit in Hinblick auf die Intensität beider getesteten Nachbehandlungsverfahren relativ gering ist. Selbst mit der geringer eingestellten Intensität konnten Ergebnisse erzielt werden, die noch im Streubereich der mit optimaler Intensität behandelten Ermüdungsversuche liegen. Abbildung 4.4 zeigt, dass trotz starker simulierter Abweichungen in der Behandlungsintensität noch Ermüdungsfestigkeitswerte erreicht werden können, die im Streuband normal bzw. optimal behandelte Proben liegen.

Da es sich hierbei lediglich um wenige Versuche handelt, kann aufgrund dieser Versuche noch keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Anhand eines umfangreicheren Versuchsprogramms zum Ermüdungsverhalten und unterstützenden Eigenspannungsmessungen sollte der Einfluss der variierten Intensitäten noch zuverlässig überprüft werden.

5 Fazit und Ausblick – Conclusion and outlook

Kurzfassung

Im Laufe der Bearbeitung der Kurzstudie zur „Entwicklung eines Qualitätssicherungstests für die Anwendung der höherfrequenten Hämmerverfahren“ sind mehrere Ansätze untersucht worden. Auch die Auswirkungen verschiedener Nachbehandlungsintensitäten auf die Ermüdungsfestigkeit wurden anhand eines kleinen Versuchsprogramms überprüft. Dieses abschließende Kapitel fasst die wichtigsten Erkenntnisse der Kurzstudie zusammen, beschreibt offene Punkte und gibt einen Ausblick.

Abstract

Several approaches for a quality assurance test have been investigated during the progress of the short study “Development of a simple quality assurance test for the application of high frequency mechanical impact treatment techniques”. Besides this, possible effects of treatment-quality could be investigated on the fatigue resistance within short test series. This final chapter summarizes the most important findings of the short study, describes open questions and gives an outlook.

Die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren zur Ermüdungsfestigkeitssteigerung kann, wie jedes Verfahren im Stahlbau, nur erfolgreich und verlässlich angewendet werden, wenn eine ausreichende Anwendungsqualität garantiert, nachgewiesen und bestätigt werden kann.

Im Rahmen dieser Kurzstudie sind mehrere mögliche Verfahren auf ihre Eignung in Hinblick für einen einfachen Qualitätssicherungstest für höherfrequente Hämmerverfahren untersucht worden (siehe Kapitel 3.2, 3.3, 3.4 und 3.5). Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

- Eine einfache Sichtprüfung erweist sich zur ersten zuverlässigen Einschätzung der Ausführungsqualität einer Nachbehandlung als sinnvoll.
- Der zur Qualitätssicherung des Kugelstrahlens erfolgreich angewandte Almen-Test hat sich in modifizierter Form für die Anwendung der Hämmerverfahren als stark vom Anwender beeinflussbar und somit als ungeeignet erwiesen.
- Härtemessungen haben gezeigt, dass die beiden HFH-Verfahren gegenüber dem Grundwerkstoff eine deutliche Aufhärtung bewirken. Für PIT-nachbehandelte Proben konnte eine vom Anwender variierte Intensität aufgrund der geringen Abweichungen der Härtewerte der verschiedenen untersuchten Intensitäten nicht abgeleitet werden. Für die HiFIT-nachbehandelten Proben ergab sich ein deutlicher Einfluss der Behandlungsintensität auf die gemessenen Härtewerte. Dies zeigt zum einen, dass die Härtemessungen ein geeignetes Verfahren zur Beurteilung der HFH-Behandlung bzw. der Intensität sein können. Zum anderen geht daraus

hervor, dass die Intensität beim PIT-Verfahren keinen Einfluss auf die erzeugte Aufhärtung hat.

- Anhand der Ermüdungsversuche an Versuchskörpern mit unterschiedlicher Nachbehandlungsintensität konnte gezeigt werden, dass eine variierende Nachbehandlungsqualität zwar einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, dieser sich jedoch im Streubereich der mit normaler bzw. optimaler Intensität behandelte Versuchskörper liegt.

Eine Kombination, bestehend aus einer einfachen Sichtprüfung der Nachbehandlungspur am Bauwerk, wie sie auch bei Schweißverfahren angewandt wird, und Stichproben mit definiertem Härteprüfaufwand könnte für die Qualitätssicherung der höherfrequenten Hämmerverfahren am Bauteil zielführend und ausreichend sein. Im Rahmen der Sichtprüfung können entsprechende Lehren zur Messung und Dokumentation der Eindringtiefen zum Einsatz kommen. Etwaige Richtwerte wurden in [6], [10], und [12] definiert.

Gegebenenfalls könnten weiterführende Eigenspannungsmessungen zur Verifizierung zulässiger Härtewerte beitragen und Aufschluss über die eingebrachten Druckeigenspannungen infolge variiertter Intensitäten geben.

Sollte zukünftig eine Qualitätssicherung über eine Messung von Härtewerten im Bereich der Behandlungspur in Betracht gezogen werden, so wäre ggf. die Definition geeigneter Härtebereiche zielführend. Diese könnten für die jeweiligen HFH-Verfahren mithilfe eines geeigneten und erweiterten Versuchsprogramms ermittelt und anhand von Ermüdungsversuchen und deren Auswertung verifiziert werden. Das Ziel dieser Vorgehensweise könnte eine Definition von Härtegrenzwerten bzw. geeigneter Härtebereiche bei nachbehandelten Schweißnähten sein.

Literaturverzeichnis / Bibliography

- [1] DIN EN 1993-1-9 2010-12. *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung.*
- [2] DIN EN ISO 6507-1: *Metallische Werkstoffe: Härteprüfung nach Vickers*
- [3] Dürr, A.: Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung. Dissertation, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2007.
- [4] Kuhlmann, U., Dürr, A., Bergmann, J., Thumser, R.: *Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung.* FOSTA-AiF-Schlussbericht, 2006.
- [5] Ghahremani, K., Safa, M., Yeung, J., et al. Quality Assurance for Ultrasonic Impact Treatment of welds using handheld 3D laser scanning technology. XIII-2556-14, IIW
- [6] IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, Marquis, Gary B., Barsoum, Zuheir, Springer, 2016.
- [7] Kuhlmann, U., Kudla, K., Ummenhofer, T., Weidner, P., *Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau,* Schlussbericht BAW-Forschungsprojekt, 2013
http://www.baw.de/content/publikationen/www-dokumente-oeffentlich/0/Abschlussbericht_haemmerverf_fertig.pdf
- [8] Kuhlmann U., Breunig S., Pascual, A., Maier, P., Ummenhofer, T., Zinke, T., Mensinger, M., Pfaffinger, M., Fischer, M., Schneider, S., Lenz, K., Beck, T.: Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundeisenbahnbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit, FOSTA/AiF- Schlussbericht P978, Stuttgart, 2017.
- [9] Six Sigma Black Belt: *Boxplot in Excel erstellen – Erklärung und kostenlose Vorlage.* <http://www.sixsigmablackbelt.de/boxplot/>.
- [10] Ummenhofer, T., et al.: *Lebensdauererlängerung neuer und bestehender geschweißter Stahlkonstruktionen.* REFRESH-Projekt, Final report, 2009.
- [11] Ummenhofer, T., Weidner, P., Kuhlmann, U., Breunig, S., *Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren,* DAST-AiF-Forschungsprojekt, 2013-2017.
- [12] Weich, I.: Ermüdungsverhalten mechanisch nachbehandelter Schweißverbindungen in Abhängigkeit des Randschichtzustands, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2009
- [13] Wohlfahrt, H. (Hrsg.): *Mechanische Oberflächenbehandlungen: Grundlagen, Bauteileigenschaften, Anwendungen.* Weinheim: Wiley-VCH, 2000.