



Schlussbericht

Untersuchungen zur Auswirkung variierender Ausführungsqualitäten einer HFH-Nachbehandlung und Beurteilung einfacher Methoden zur Überprüfung der Nachbehandlungsspur

Auftraggeber:

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstraße 17

76187 Karlsruhe

Auftragnehmer

Universität Stuttgart

Institut für Konstruktion und Entwurf

Pfaffenwaldring 7

70569 Stuttgart

**Leiterin der Forschungs-
stelle:**

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Sachbearbeiter:

Stephanie Breunig, Lisa-Marie Gölz

Inhalt

1	Projektbeschreibung	1
1.1	Ziele des Forschungsvorhabens	1
1.2	Arbeitsschritte zur Erreichung der Ziele	2
1.2.1	Übersicht der Arbeitspakete.....	2
1.2.2	AP1 Durchführung von HFH-nachbehandelten Ermüdungsversuchen mit unterschiedlicher Intensität (PIT-Verfahren)	2
1.2.3	AP2 Zerstörungsfreie Messung der Qualität über Eigenspannungsmessungen und mobile Härtemessungen	3
1.2.4	AP3 Zerstörungsfreie Messung der Qualität über Eigenspannungsmessungen, mobile Härtemessungen und visuelle Prüfung zur Kalibrierung und Absicherung von AP1 und AP2	4
1.2.5	AP4 Versuchsplanung, Versuchsdurchführung, Auswertung und Dokumentation in Form eines Schlussberichts (Planungsleistungen des Instituts)	5
1.3	Versuchsmatrix	5
2	Aktueller Stand der Forschung	6
2.1	Vorhergehende Untersuchungen	6
2.2	Untersuchungen zur mobilen Härte	7
3	Versuchskörperherstellung und Nachbehandlungsqualität	9
3.1	Versuchskörpergeometrie.....	9
3.2	Fertigung der Versuchskörper	10
3.3	Nachbehandlung der Versuchskörper mit variierter Qualität.....	10
4	Ermüdungsversuche (AP1)	14
4.1	Durchführung der Versuche.....	14
4.2	Versuchsergebnisse und Auswertung	15
4.2.1	Allgemeines.....	15
4.2.2	Ergebnisse unbehandelter Proben	15
4.2.3	Ergebnisse HFH-behandelter Proben	16
4.2.4	Auswertung der Versuchsergebnisse	18
5	Eigenspannungs – und Härtemessungen (AP2).....	20
5.1	Eigenspannungsmessungen.....	20
5.1.1	Allgemeines.....	20
5.1.2	Durchführung der Eigenspannungsmessungen	20
5.1.3	Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen	22
5.1.4	Zusammenfassung	24
5.2	Härtemessungen	24
5.2.1	Allgemeines.....	24
5.2.2	Durchführung der Härtemessungen	25
5.2.3	Ergebnisse der Härtemessungen	27
5.3	Korrelation Eigenspannungen und Härte	28
6	Visuelle Prüfung, Eigenspannungs- und Härtemessungen (AP3)	29
6.1	Visuelle Prüfung	29

6.2	Eigenspannungsmessungen	31
6.2.1	Allgemeines	31
6.2.2	Durchführung der Eigenspannungsmessungen	31
6.2.3	Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen	31
6.2.4	Zusammenfassung.....	33
6.3	Härtemessungen	35
6.3.1	Allgemeines und Durchführung der Härtemessungen.....	35
6.3.2	Ergebnisse der Härtemessungen.....	35
6.3.3	Zusammenfassung.....	37
6.4	Übersicht über Eigenspannungen und Härte in Abhängigkeit von der Restkerbe	37
7	Silikonabdrücke	40
8	Zusammenfassung	42
8.1	Zusammenfassung der Untersuchungen	42
8.2	Vorschlag zur Bewertung der Hammerspur	43
8.3	Ausblick.....	43
9	Danksagung	45
10	Literaturverzeichnis.....	46

1 Projektbeschreibung

1.1 Ziele des Forschungsvorhabens

Die Effektivität der Schweißnahtnachbehandlung mittels Höherfrequenten Hämmerverfahren (HFH) konnte neben dem Forschungsprojekt „Anwendung der Höherfrequenten Hämmerverfahren im Stahlwasserbau“ für S235, für normal- und hochfeste Baustähle bereits an mehreren Kerbdetails gezeigt werden. Der Zuwachs der Ermüdungsfestigkeit wird maßgeblich durch die Einbringung von Druckeigenstressungen erzielt, aber auch die Materialverfestigung in dem nachbehandelten Bereich trägt einen Teil dazu bei.

Ein Hindernis für die gegenwärtige Anwendung der HFH-Verfahren in der Praxis stellt die derzeit eingeschränkte Möglichkeit zur Feststellung einer ausreichenden Ausführungsqualität des Verfahrens am nachbehandelten Bauteil dar. Denn wie bei jedem Verfahren, das im Bauwesen angewandt wird, braucht es auch dafür ein Verfahren zur Feststellung der ausreichenden Güte der Ausführung, so dass man künftig beim Ermüdungsnachweis die Ermüdungsfestigkeitssteigerung tatsächlich ansetzen kann. Mit Hilfe eines einfachen Qualitätssicherungsverfahrens soll sichergestellt werden, dass das angewandte Verfahren am Bauteil den gewünschten Effekt wirklich erzielt.

Erste Ansätze in Richtung eines Qualitätssicherungskonzepts konnten bereits im Rahmen einer FOSTA-Kurzstudie [15] erprobt werden. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass man mittels stationären Härtemessungen eine deutliche Aufhärtung durch die HFH-Verfahren gegenüber dem Grundwerkstoff feststellen kann. Dabei konnte für PIT-nachbehandelte Proben keine Variation der Intensität durch die Härtemessungen abgeleitet werden. Bei HiFIT-nachbehandelten Proben konnte ein deutlicher Einfluss der Behandlungsintensität durch die Härtewerte nachgewiesen werden. Daraus lässt sich auch ableiten, dass die Härte ein zuverlässiger Parameter ist, um feststellen zu können, dass eine Behandlung stattgefunden hat. Jedoch wurden die Härtemessungen aufgrund der Vereinfachung zunächst nur auf nachbehandeltem Grundwerkstoff (siehe Abbildung 2) durchgeführt. Folglich war nun ein weiterer Schritt erforderlich, um das Härtemessverfahren [3] als Qualitätssicherungsmethode zu bewerten: die Durchführung der Härtemessungen auf nachbehandelten Schweißnahtübergängen. Falls sich trotz der räumlich eingeschränkten Geometrie am HFH-nachbehandelten Schweißnahtübergang herausstellen sollte, dass die Durchführbarkeit von Härtemessungen möglich und mit geringem Aufwand verbunden ist, sollten in einem weiteren Schritt geeignete Härtebereiche bzw. Härtegrenzwerte bei nachbehandelten Schweißnähten definiert werden. In diesem Forschungsprojekt erfolgte die Nachbehandlung durch das PIT-Verfahren [8].

Neben der Untersuchung zur Eignung eines Qualitätssicherungstests wurde in der FOSTA-Kurzstudie [15] und dem parallel dazu laufenden Projekt „Entwicklung einer DASt-Richtlinie für Höherfrequente Hämmerverfahren“ [9] der Ansatz geprüft, inwieweit sich eine Intensitätsvariation auf die Steigerung der Ermüdungsfestigkeit auswirkt. In diesem Projekt konnte mittels einer kleinen Stichprobe festgestellt werden, dass die Auswirkungen einer vom Standard abweichenden Nachbehandlung durch Variation der Intensität oder der Nachbehandlungsdauer im Streuband der „normal“ nachbehandelten Ermüdungsfestigkeit liegen. Deshalb war ein weiteres Ziel dieses Forschungsprojekts mit Hilfe einer geeigneten Stichprobengröße, den Effekt einer variierenden Nachbehandlungsintensität auf die Ermüdungsfestigkeit zu überprüfen.

Demnach ergaben sich die drei wesentlichen Ziele des Forschungsprojekts:

- Identifizierung des Einflusses auf die Ermüdungsfestigkeit mit variierender Intensität nachbehandelter Ermüdungsversuche an der unbelasteten Quersteife
- Messungen des Eigenspannungszustands und Härteprüfung an den mit variierter Intensität hergestellten Versuchskörpern (Messungen am nachbehandelten Schweißnahtübergang) und Beurteilung der Korrelation
- Ableitung eines Qualitätssicherungstests mittels Härtemessungen und / oder Sichtprüfung, falls erforderlich mit Definition von Härtegrenzwerten bzw. Härtebereichen bei nachbehandelten Schweißnähten

1.2 Arbeitsschritte zur Erreichung der Ziele

1.2.1 Übersicht der Arbeitspakete

Die zur Erreichung der Forschungsziele vorgesehenen Arbeitspakete wurden während des Projekts modifiziert und sind im Ablaufdiagramm in Abbildung 1 dargestellt. Die Arbeitspakete werden in den nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

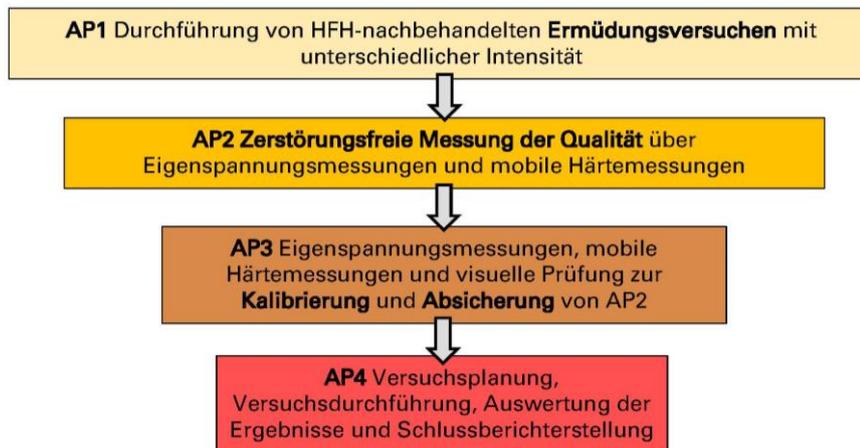


Abbildung 1: Übersicht über die modifizierten Arbeitspakete

1.2.2 AP1 Durchführung von HFH-nachbehandelten Ermüdungsversuchen mit unterschiedlicher Intensität (PIT-Verfahren)

Am Detail der unbelasteten Quersteife aus S235JR+N wurden 30 Ermüdungsversuche vorgenommen, um die Auswirkungen einer variierenden Intensität der Nachbehandlung auf die Ermüdungsfestigkeit feststellen zu können. Dazu diente das folgende in Tabelle 1 dargestellte Versuchsprogramm. Aus dem BAW-Projekt von 2013 [10] liegt bereits eine Datenbasis für normale Nachbehandlungsintensitäten und den Zustand as-welded (unbehandelt) vor. Daher wurden in diesem Projekt nur 5 Ermüdungsversuche mit einer normalen Nachbehandlungsintensität durchgeführt und zusätzlich dienten 5 weitere Ermüdungsversuche ohne Nachbehandlung, im Zustand as-welded, als Referenz für die Auswertung der Ermüdungsversuche.

Tabelle 1: Versuchsprogramm der Ermüdungsversuche in Arbeitspaket AP1

Prüfkörper für Ermüdungsversuche	Zustand der HFH-Nachbehandlung
5	as-welded
5	Normale Intensität
10	Hohe Intensität
10	Geringe Intensität

Die für alle Arbeitspakete benötigten Versuchskörper (48 Stück) wurden im Rahmen des Projekts von der Firma Schachtbau Nordhausen hergestellt, die Planung der Versuchskörper und die Dokumentation der Versuchskörperfertigung wurden von der Forschungsstelle übernommen. Das gewählte HFH-Nachbehandlungsverfahren für dieses Projekt war PIT [8]. Die HFH-Nachbehandlung der Versuchskörper erfolgte durch die PITEC Deutschland GmbH (ehemals PITec GmbH).

1.2.3 AP2 Zerstörungsfreie Messung der Qualität über Eigenspannungsmessungen und mobile Härtemessungen

Neben der Möglichkeit einer Qualitätskontrolle durch die Sichtprüfung wurden in AP2 zwei verschiedene zerstörungsfreie Messmethoden zur Qualitätssicherung untersucht. Durch Eigenspannungsmessungen [6] können erhöhte Druckeigenspannungen und durch Härtemessungen [3] erhöhte Härtewerte im Bereich der HFH-Nachbehandlung aufgezeigt werden.

Die Eigenspannungsmessungen [6] und mobile Härtemessungen [3] wurden an insgesamt 6 Versuchskörpern, siehe Tabelle 2, in der Hammerspur am Schweißnahtübergang durchgeführt. Dabei wurden im ersten Schritt die Eigenspannungsmessungen an den Versuchskörpern bei der SLV Halle vorgenommen. Abschließend wurden im zweiten Schritt mobile Härtemessungen an derselben Stelle, wie die Eigenspannungsmessungen erfolgten, gemacht. Dabei ging es um die Frage, ob die variierte „Qualität“ der Nachbehandlung belegbar ist.

Die Eigenspannungsmessungen wurden an zusätzlichen Versuchskörpern, die nicht für die Ermüdungsversuche herangezogen, aber mit derselben Versuchskörperserie gefertigt und nachbehandelt wurden, durchgeführt. Der Grund für die Fertigung zusätzlicher Versuchskörper war, dass die durch das höherfrequente Hämmern eingebrachten Druckeigenspannungen bei der Entstehung von Ermüdungsrissen nicht mehr vorhanden sind, d.h. Eigenspannungsmessungen sind nur an Versuchskörpern, die noch nicht auf Ermüdung getestet wurden, sinnvoll.

Tabelle 2: Versuchsprogramm in Arbeitspaket AP2

Prüfkörper für Eigenspannungsmessungen	Prüfkörper für mobile Härtemessungen	Zustand der HFH-Nachbehandlung
2	2	Normale Intensität
2	2	Hohe Intensität
2	2	Geringe Intensität

Für die Härtemessungen wurde das mobile Härtemessverfahren Ultrasonic Contact Impedance (UCI) der Firma NewSonic GmbH (siehe Abbildung 2 b)) angewendet. Die Durchführung der Härtemessungen mittels des mobilen Härtemessverfahrens am HFH-nachbehandelten Bauteil ist für die Praxistauglichkeit besonders erstrebenswert.



Abbildung 2: a) Optik einer mit PIT-nachbehandelten Schweißnaht; b) mobiles Härtemessgerät SonoDur2 (UCI) der Firma NewSonic GmbH

Wie in vorangegangenen Untersuchungen [12] des Instituts für Konstruktion und Entwurf festgestellt wurde, ist die mobile Härtemessung mit der stationären Härtemessung vergleichbar. Deshalb wurde in diesem Projekt auf eine stationäre Härtemessung verzichtet.

Bei der Durchführung der Härteprüfung [4] ist die Oberflächenbeschaffenheit von großer Bedeutung, um unverfälschte Härtewerte zu erhalten. Deshalb sollte in diesem Arbeitspaket zuerst die erforderliche Oberflächenbeschaffenheit für die folgenden Untersuchungen mittels mobiler Härtemessung bestimmt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Untersuchungen war die Durchführung der Messung am HFH-nachbehandelten Schweißnahtübergang, denn bisher wurden die Härtemessungen lediglich am HFH-nachbehandelten Grundwerkstoff (siehe Abbildung 2 a)) vorgenommen.

Abweichend zum Grundwerkstoff ergeben sich durch die Wärmeeinbringung, Aufmischungs- und Abkühlprozesse beim Schweißvorgang im Bereich der Schweißnaht und Wärmeeinflusszone differenzierte Härteverläufe, so dass sich für die Identifizierung der Nachbehandlungsintensität am Schweißnahtübergang durchaus komplexere Härteverläufe ergeben können.

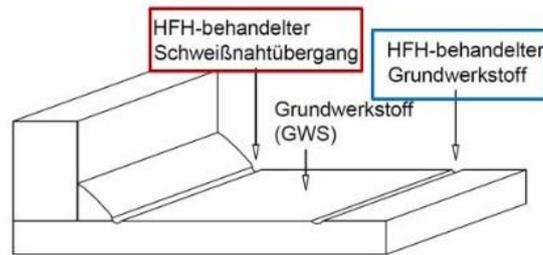


Abbildung 3: Skizze zu HFH-behandeltem Schweißnahtübergang und HFH-behandeltem Grundwerkstoff

Die Ergebnisse der Eigenspannungs- und Härtemessungen aus AP2 zeigten, dass durch die abweichende Intensität veränderte Druckeigenspannungs- und Härteverläufe eingebracht wurden. Um diese Werte zu kalibrieren und abzusichern, wurden weitere Untersuchungen in Arbeitspaket AP3 durchgeführt.

1.2.4 AP3 Zerstörungsfreie Messung der Qualität über Eigenspannungsmessungen, mobile Härtemessungen und visuelle Prüfung zur Kalibrierung und Absicherung von AP1 und AP2

Die Eigenspannungsmessungen [6] und mobilen Härtemessungen [3] an den insgesamt 9 Versuchskörpern in AP3, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind, wurden zur Kalibrierung und Absicherung der Messergebnisse aus AP2 durchgeführt und bewertet. Ziel war, mithilfe der Eigenspannungsmessungen an den Versuchskörpern, an denen anschließend Härtemessungen gemacht wurden, festzustellen, ob die Werte miteinander korrelieren und sich ein Zusammenhang ergibt.

In einem weiteren Schritt dienen die Eigenspannungsmessungen zur Beurteilung, in welchem Maße der ursprüngliche (normaler HFH-Zustand) von dem variierten Zustand abweicht. Dies könnte gegeben falls eine Grenzwertvorgabe für Härtemessungen ermöglichen, die eine Begutachtung der Nachbehandlungsqualität zulässt.

Wie auch bei der Prüfung von Schweißnähten, gibt eine Sichtprüfung erste wichtige Hinweise auf die Ausführungsqualität einer Nachbehandlung und stellt ein wichtiges Kriterium dar. Die visuelle Prüfung wurde bereits in [11] und [15] als sinnvoll für die erste Einschätzung der Ausführungsqualität der HFH-Nachbehandlung betrachtet. Daher wurde auch systematisch eine visuelle Prüfung aller Nähte durchgeführt, dokumentiert und für die Ergebnisse des Arbeitspakets AP3 herangezogen.

Tabelle 3: Versuchsprogramm in Arbeitspaket AP3

Prüfkörper für Eigenspannungsmessungen	Prüfkörper für mobile Härtemessungen	Prüfkörper für visuelle Prüfung	Zustand der HFH-Nachbehandlung
3	3	3	Normale Intensität
3	3	3	Hohe Intensität
3	3	3	Geringe Intensität

1.2.5 AP4 Versuchsplanung, Versuchsdurchführung, Auswertung und Dokumentation in Form eines Schlussberichts (Planungsleistungen des Instituts)

Die Planungs- und Auswertungsleistung für die einzelnen Arbeitspakete wurden durch die Forschungsstelle realisiert. Die Dokumentation der Versuchsplanung, -durchführung, -auswertung und die Ergebnisse wurden in diesem Schlussbericht zusammengefasst.

1.3 Versuchsmatrix

Eine Übersicht über die Anzahl der untersuchten Versuchskörper sowie die Ziele der verschiedenen Arbeitspakete ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Versuchsmatrix

Arbeitspaket	Beschreibung	Ziel der Untersuchung
AP1:	AP1: Ermüdungsversuche 30 Versuchskörper <i>(5 Versuche as-welded/normal HFH-nachbehandelt; 10 Versuche gering/hoch HFH-nachbehandelt)</i>	Einfluss der Qualität bzw. Intensität der Nachbehandlung auf Ermüdungsfestigkeit
AP2:	AP2.1: Eigenspannungsmessungen 6 Versuchskörper <i>(2 Versuche/Qualität, 10 Messpunkte/Versuchskörper)</i>	Korrelation der Ergebnisse aus AP2 mit Versuchsergebnissen aus AP1
	AP2.2: Mobile Härtemessungen 6 Versuchskörper <i>(2 Versuche/Qualität, ca. 45 Messpunkte/Versuchskörper)</i>	
AP3:	AP3.1: Eigenspannungsmessungen 9 Versuchskörper <i>(3 Versuche/Qualität, unterschiedliche Messpunkte/Versuchskörper)</i>	Kalibrierung der Verfahren und Absicherung der Ergebnisse aus AP2
	AP3.2: Mobile Härtemessungen 9 Versuchskörper <i>(3 Versuche/Qualität, ca. 45 Messpunkte/Versuchskörper)</i>	
	AP3.3: Visuelle Prüfung 9 Versuchskörper <i>(3 Versuche/Qualität)</i>	
AP4:	AP4: Planungs- und Auswertungsleistung inkl. Schlussberichtserstellung	

2 Aktueller Stand der Forschung

2.1 Vorhergehende Untersuchungen

Neben Bemessungsvorschlägen und Empfehlungen auf internationaler und nationaler Ebene besteht die Notwendigkeit eines Qualitätssicherungstests für die Anwendung der HFH-Verfahren. Verschiedene Ansätze im Hinblick auf die Sicherung der Nachbehandlungsqualität wurden bereits in der FOSTA-Kurzstudie „Entwicklung eines einfachen Qualitätssicherungstests für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren“ [15] und im DAST-AiF-Forschungsprojekt „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“ [9] überprüft.

In diesen Projekten wurde bereits versucht, eine fehlerhafte HFH-Nachbehandlung durchzuführen und die Auswirkungen dieser vom Optimum abweichenden Nachbehandlung zu erfassen. Dabei hat sich herausgestellt, dass diverse Parameter keinen Einfluss, sei es auf die Geometrie der Spur oder auf die Ermüdungsfestigkeit, haben.

Im Rahmen der FOSTA-Kurzstudie [15] wurden die drei unterschiedlichen Verfahren Almentest, stationäre Härtemessungen und Eindringtiefe über 3D-Laser-Scan zur Überprüfung der Ausführungsqualität der HFH-Behandlung am Grundmaterial S235JR untersucht.

Der Almen-Test, der als Qualitätssicherungstest bei der Nachbehandlung durch Kugelstrahlen eingesetzt wird, ist nicht zielführend bei der Beurteilung von HFH-Nachbehandlungen, da die Geräteführung die Ergebnisse stark beeinflusst. Die Beurteilung der HFH-Nachbehandlungsqualität durch 3D-Laser-Scan-Messungen zeigte ungenaue Ergebnisse. Dazu kommen vergleichsweise sehr hohe Kosten, so dass diese Messungen nicht weiterverfolgt werden.

Die Sicherung der Qualität durch Härtemessungen, die im Vergleich zu 3D-Laser-Scan-Messungen kostengünstig sind, hat sich im Verlauf der FOSTA-Kurzstudie [15] als zuverlässiges und geeignetes Verfahren herauskristallisiert. Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass eine HFH-Behandlung durch erhöhte Härtewerte im oberflächennahen Bereich der HFH-Behandlungsspur am Grundmaterial grundsätzlich nachgewiesen werden kann. In einer weiteren Untersuchung wurde am Grundwerkstoff überprüft, ob unterschiedliche Intensitäten der Nachbehandlung durch Härtemessungen erkannt werden können. Dabei haben sich unterschiedliche Ausprägungen der Härtewerte bei Intensitätsvariationen für die zwei untersuchten HFH-Verfahren gezeigt.

Die durch PIT-nachbehandelten Proben ließen anhand der Härtewerte im Grundmaterial unterhalb der Hämmerspur keine Rückschlüsse auf die variierte Intensität der PIT-nachbehandelten Oberfläche zu, siehe Abbildung 4. Die mit HiFIT-nachbehandelten Proben, wie in Abbildung 5 dargestellt, zeigten in Abhängigkeit der gewählten Nachbehandlungsintensität Härtewerte in unterschiedlichen Härtebereichen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Härte prinzipiell ein zuverlässiger Parameter zur Sicherung der Qualität der Nachbehandlung ist.

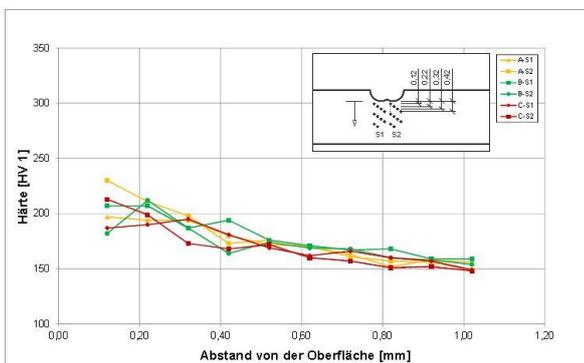


Abbildung 4: Härteverläufe in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität (PIT) [15]

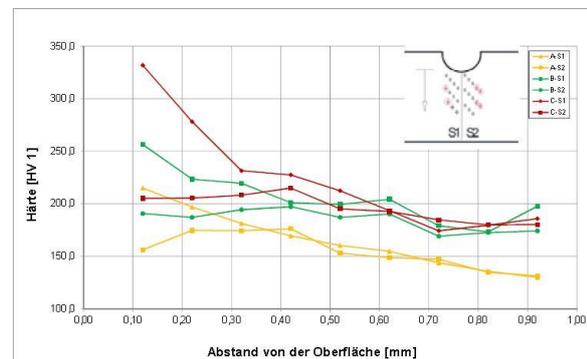


Abbildung 5: Härteverläufe in Bauteildickenrichtung in Abhängigkeit der Intensität (HiFIT) [15]

Innerhalb der FOSTA-Kurzstudie [15] wurden allerdings ausschließlich Grundmaterialbleche nachbehandelt, da keine finanziellen Mittel für geschweißte Proben zur Verfügung standen. Aus diesem Grund und den Erkenntnissen über die unterschiedlichen Verfahren wurde dieses Projekt initiiert, in dem die Härtewerte in Abhängigkeit der Nachbehandlungsintensität an geschweißten Probekörpern untersucht wurden.

Offen blieb auch die Frage, ob die Nachbehandlungsintensität einen Einfluss auf die eingebrachten Druckeigenstressungen und damit ableitend auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Daher waren aus Sicht der Forschungsstellen der FOSTA-Kurzstudie [15] ergänzende Eigenspannungsmessungen und Ermüdungsversuche erforderlich.

Die ersten Ermüdungsversuche unter Variation der Intensität wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“ [9] in Form von wenigen Ermüdungsversuchen an Querstreifen aus dem Werkstoff S355J2 mit einem Spannungsschwingbreitenverhältnis von $R=0,1$ untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sowohl Prüfkörper mit geringer Intensität als auch Prüfkörper mit hoher Intensität im Streubereich der mit normaler bzw. optimaler Intensität behandelten Prüfkörper liegt, was in Abbildung 6 abgebildet ist.

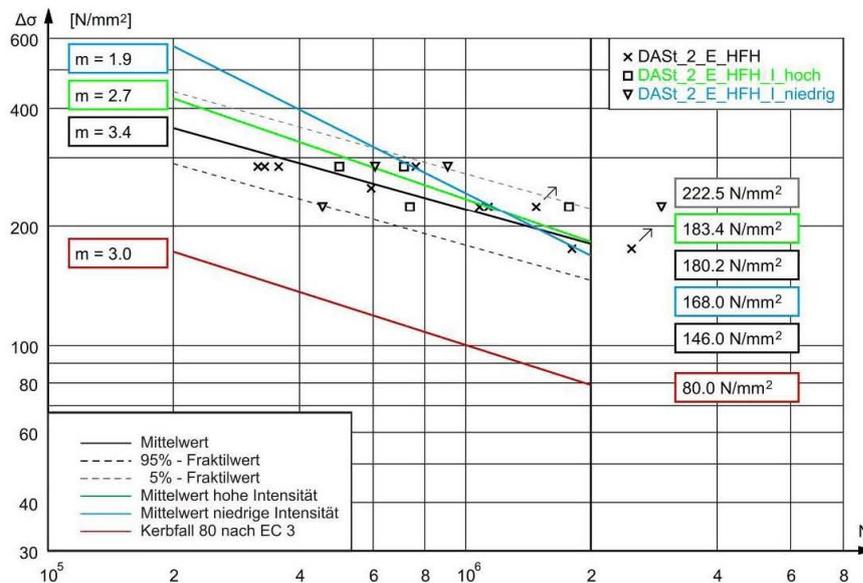


Abbildung 6: Wöhlerdiagramm der Ermüdungsversuche bei unterschiedlicher Intensität [9]

Aufgrund der geringen Anzahl der in [9] durchgeführten Ermüdungsversuche kann keine verallgemeinerte Aussage zur Auswirkung der Nachbehandlungsintensität getroffen werden. Aus diesem Grund wurden in diesem Projekt weitere Versuche zum Ermüdungsverhalten durchgeführt.

2.2 Untersuchungen zur mobilen Härte

Um die Nachbehandlungsqualität, wie in der FOSTA-Kurzstudie [15] beschrieben, mittels Härtmessungen zu sichern, ist es erforderlich, dass diese Methode jederzeit an allen Stellen des Bauteils, in der Fertigung als auch auf der Baustelle, angewendet werden kann, was wiederum bei stationären Härtmessungen nicht immer möglich ist.

Mobile Härtmessungen sind dagegen flexibel einsetzbar und benutzerfreundlich in ihrer Anwendung. Erste Untersuchungen dazu wurden 2016 im Rahmen einer Masterarbeit am Institut für Konstruktion und Entwurf [12] an Prüfkörpern aus dem Werkstoff S355 durchgeführt. Die Nachbehandlung erfolgte nach dem PIT-Verfahren und die mobile Härteprüfung nach dem Ultrasonic Contact Impedance (UCI)-Verfahren.

Insbesondere wurde die Spurgeometrie mit Silikonabdrücken untersucht. Dabei wurde bestätigt, dass aufgrund der Geometrie der Messsonde mobile Härtemessungen mit schmalen Sonden nicht nur in der Spur im Grundmaterial, sondern auch am Schweißnahtübergang möglich sind.

In Abbildung 7 sind die Härtewerte am ungehämmerten Grundwerkstoff (rot) und in der gehämmerten Spur (blau) nach der Oberflächenbehandlung durch Lappen für die stationäre und mobile Härtemessung dargestellt. Dabei wurde in den Untersuchungen [12] festgestellt, dass die Ergebnisse der mobilen mit der stationären Härtemessung im Grundmaterial vergleichbar sind, wohingegen sich bei der gehämmerten Spur 1B geringe Abweichungen bei der mobilen von der stationären Härtemessung ergaben.

Die Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass, wie in Abbildung 8 zu sehen ist, der Einfluss der Härteprüfkraft HV berücksichtigt werden muss. Der Härteverlauf im ungehämmerten Grundwerkstoff (GWS) ist konstant über die Bauteildicke, deshalb hat eine größere Prüfkraft (HV5) keine geringeren Härtewerte zur Folge. Dagegen ist bei der nachbehandelten Spur 1B der Härteverlauf in die Tiefe veränderlich, so dass bei einer größeren Prüfkraft, die einen tieferen Eindruck zur Folge hat, der Härtewert für HV5 geringer, als gegenüber der kleinen Eindringkraft HV1, ist.

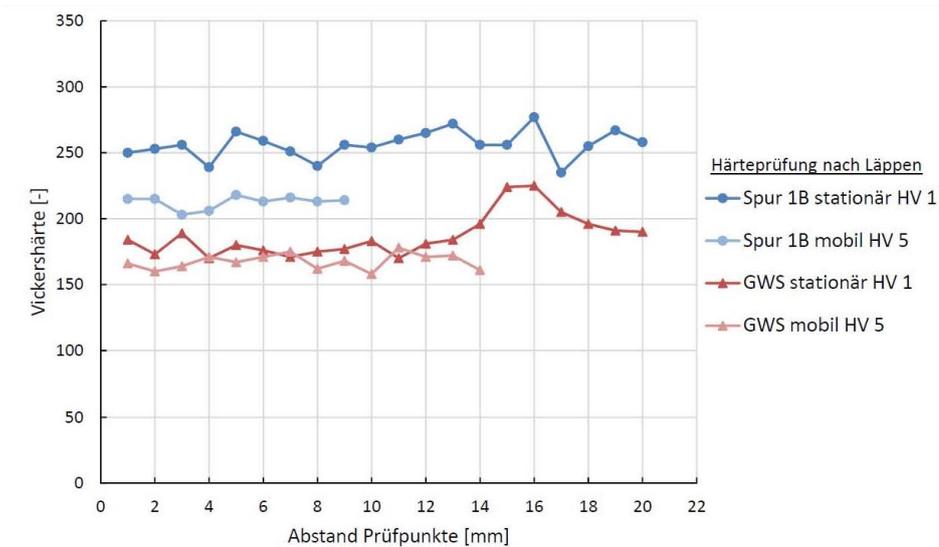


Abbildung 7: Härtewerte aus stationärer und mobiler Härteprüfung in der gehämmerten (blau) und ungehämmerten (rot) Spur am Grundwerkstoff [12]

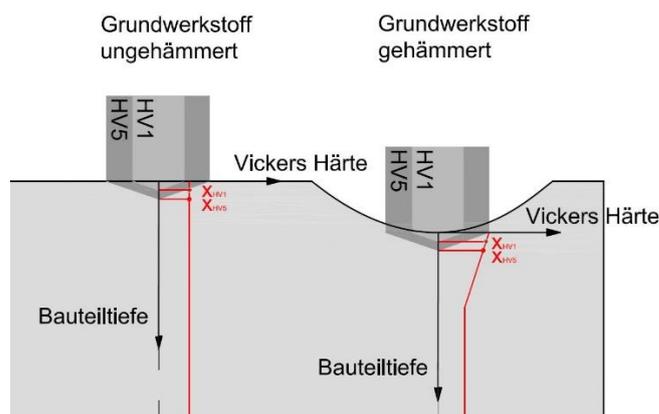


Abbildung 8: Vergleich der Härtemessungen mit HV1 und HV5 am gehämmerten und ungehämmerten Grundwerkstoff

Aus den Untersuchungen am Grundmaterial [12] hatten sich offene Fragestellungen hinsichtlich der Härtemessungen am Schweißnahtübergang ergeben, die innerhalb dieses Projekts geklärt werden sollten. Zu diesen Fragen gehörte, ob der Einfluss der Intensitätsvariationen mittels mobiler Härtemessungen erkennbar war, in welchem Umfang die mobile Härteprüfung am nachbehandelten Schweißnahtübergang erfolgen bzw. welche Beschaffenheit die Oberfläche vorweisen musste.

3 Versuchskörperherstellung und Nachbehandlungsqualität

3.1 Versuchskörpergeometrie

Die Geometrie der Versuchskörper basiert auf dem BAW-Projekt „Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau“ [10]. Das untersuchte Schweißdetail ist die unbelastete Quersteife nach DIN EN 1993-1-9 [5], siehe Abbildung 9.

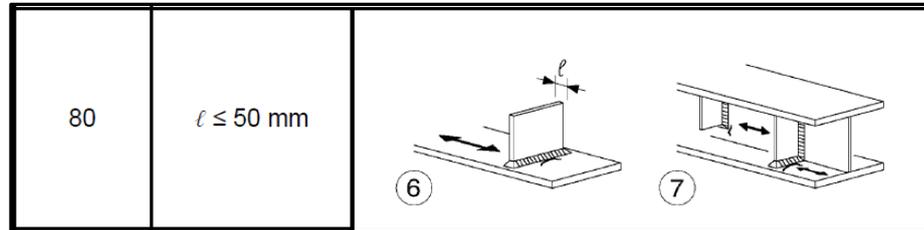


Abbildung 9: Schweißdetail unbelastete Quersteife [5]

Als Werkstoff wurde S235 gewählt. Die Geometrie des Versuchskörpers für die Ermüdungsversuche, Eigenspannungs- und Härtemessungen ist in Abbildung 10 dargestellt.

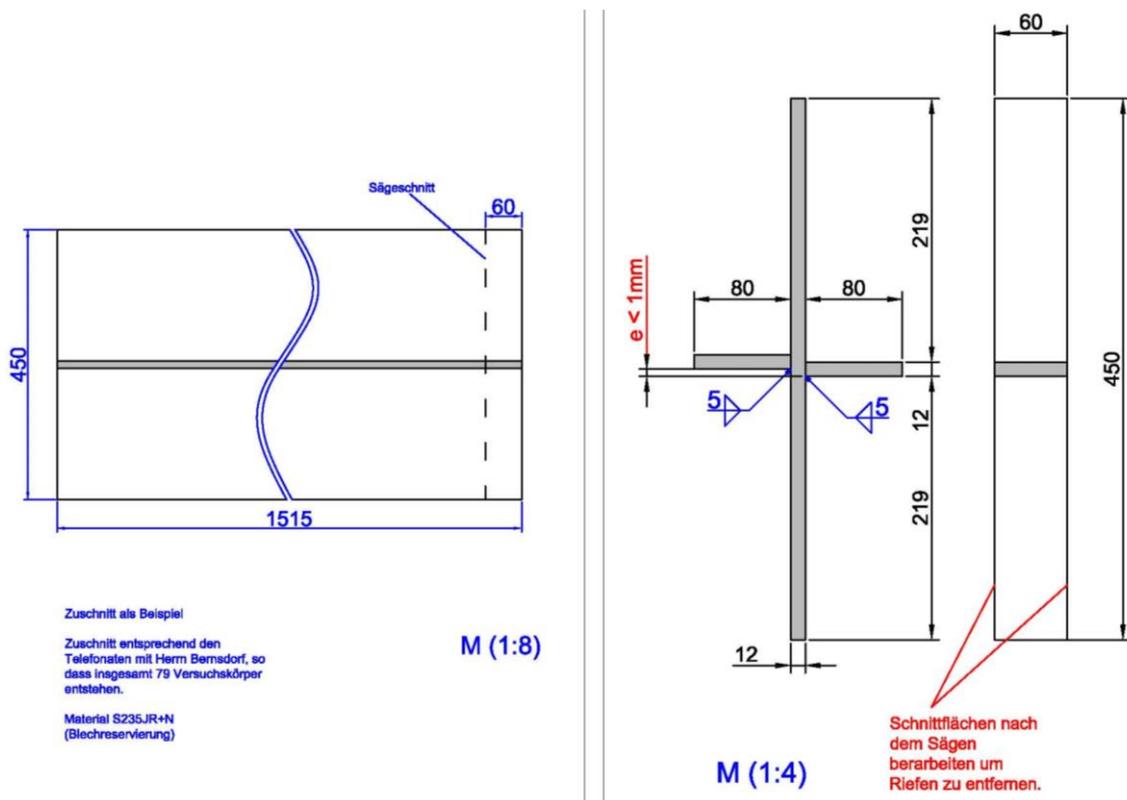


Abbildung 10: Geometrie Versuchskörper für Ermüdungsversuche, Eigenspannungs- und Härtemessungen

3.2 Fertigung der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden bei der Firma Schachtbau Nordhausen in Nordhausen angefertigt. Dafür wurden 930 mm lange Bleche zugeschnitten und die Quersteifenbleche darauf geheftet, siehe Abbildung 11. Um eine möglichst gleichbleibende Qualität der Schweißnaht zu erhalten, wurde mittels Lineareinheit verfahren. Als An- und Auslaufbleche und Führung wurden die noch zu schweißenden Bleche daneben positioniert, so dass die Verfahreinheit entlang fahren konnte, siehe Abbildung 12. Durch die Schrumpfungen während des Schweißvorgangs kam es zum Versatz zwischen den Hilfskonstruktionen, auf denen die Verfahreinheit entlang fuhr, so dass sich an dieser Stelle ein kleiner Versatz in der Schweißnaht ergab, meist auf Höhe von 15-20cm. In manchen Fällen musste dort verschliffen und die Schweißnaht neu angesetzt werden.



Abbildung 11: Geheftete Blechteile

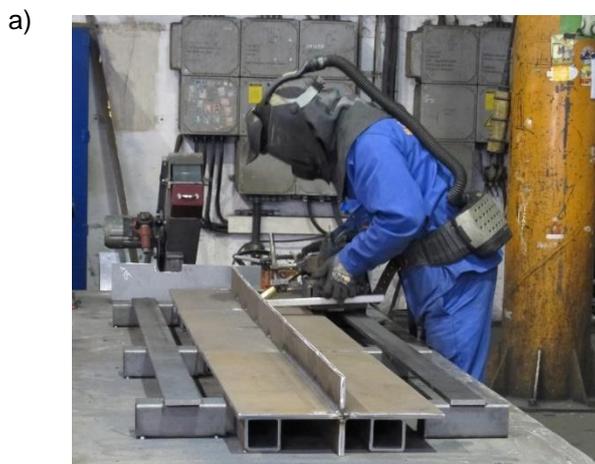


Abbildung 12: a) An- und Auslaufbleche mit Verfahreinheit und Hilfskonstruktion b) Schweißvorgang

3.3 Nachbehandlung der Versuchskörper mit variiertem Qualität

Die Nachbehandlung der Versuchskörper, siehe Abbildung 13, erfolgte bei der Firma PITec GmbH. Für das PIT-Verfahren gibt es kaum Einstellmöglichkeiten am Gerät selbst [13]. Einstellungen zur Verringerung des Luftdrucks sowie zur Erschlaffung der Muskeln müssen durch die Gerätequalifizierung und Verfahrensprüfung abgedeckt werden. Eine falsche Einstellung des Pinradius, der Hämmerfrequenz und des Luftdrucks hat bereits anhand von Ermüdungsversuchen mit dem PIT-Verfahren im Rahmen von DURIMPROVE [1] gezeigt, dass deren Variation keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit am Konstruktionsdetail der unbelasteten Längssteife zeigt.

Die variierte Qualität bzw. die Intensität der Behandlung wurde deshalb durch die Dauer der Nachbehandlung erreicht.

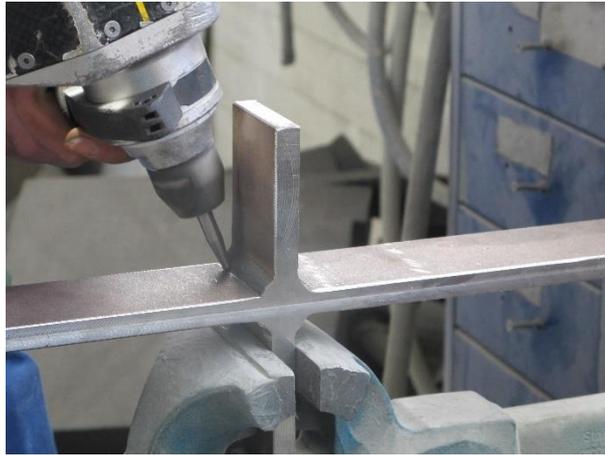


Abbildung 13: Nachbehandlung durch die Firma PITec GmbH

Die Versuchskörper wurden mit drei unterschiedlichen Nachbehandlungsintensitäten normal, gering und hoch nachbehandelt. Ein Richtwert des Geräte-Herstellers für die normale Nachbehandlung ergibt sich zu ca. 20 cm/min. Dieser ist unter Umständen jedoch auch noch von der Geometrie der vorliegenden Schweißnaht abhängig. In Tabelle 5 ist eine Übersicht über die Nachbehandlungsdauern der gewählten Intensitäten dargestellt, die projektspezifisch angepasst wurden. Die Nachbehandlungsdauer für die geringe Nachbehandlung wurde so gewählt, dass Restkerben an vielen Schweißnahtübergängen deutlich sichtbar blieben.

Tabelle 5: Übersicht über die Dauer der Nachbehandlung

Nachbehandlung	Zeit [s]
Normal	40
Gering	15
Hoch	80

Eine Übersicht über die Versuchskörper für die Ermüdungsversuche in AP1 mit den variierten Nachbehandlungsdauern ist in Tabelle 6 zu sehen. Die Geometrie der Versuchskörper aus Tabelle 6 und Tabelle 7 ist gleich und wird in Abbildung 10 dargestellt.

Tabelle 6: Nachbehandlungsparameter der Versuchskörper für Ermüdungsversuche

Bezeichnung	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Intensität	Untersuchung im AP
B.2.1	40	40	40	40	normal	AP1
B.2.2	40	40	40	40	normal	AP1
B.2.3	40	40	40	40	normal	AP1
B.2.4	40	40	40	40	normal	AP1
B.2.5	40	40	40	40	normal	AP1
B.4.1	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.2	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.3	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.4	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.5	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.6	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.7	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.8	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.9	80	80	80	80	hoch	AP1
B.4.10	80	80	80	80	hoch	AP1
B.2.6	15	15	15	15	gering	AP1
B.2.7	15	15	15	15	gering	AP1
B.2.8	15	15	15	15	gering	AP1
B.2.9	15	15	15	15	gering	AP1
B.2.10	15	15	15	15	gering	AP1
B.3.1	15	15	15	15	gering	AP1
B.3.2	15	15	15	15	gering	AP1
B.3.6	15	15	15	15	gering	AP1
B.3.5	15	15	15	15	gering	AP1
B.3.7	15	15	15	15	gering	AP1

In Tabelle 7 ist eine Übersicht über die Prüfkörper gegeben, die für den Bezug der Ermüdungsversuche zu den Eigenspannungs- und mobilen Härtemessungen hergestellt wurden, sowie das zugehörige Arbeitspaket AP2 oder AP3. Am Prüfkörper B.2.2 wurden nach dem Ermüdungsversuch noch Eigenspannungsmessungen durchgeführt, um zu belegen, dass die durch die Nachbehandlung eingebrachten Eigenspannungen im Bereich von Ermüdungsrissen nicht mehr vorhanden sind. Die Geometrie der Prüfkörper ist identisch zu den Prüfkörpern der Ermüdungsversuche.

Tabelle 7: Nachbehandlungsparameter der Prüfkörper für Begleituntersuchungen

Bezeichnung	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Zeit [s]	Intensität	Untersuchung im AP
ES.2.1	60	60	30	67	normal	
ES.2.2	60	45	40	30	normal	
ES.4.1	80	80	80	80	hoch	
ES.4.2	80	80	80	80	hoch	AP3
ES.4.3	80	80	80	80	hoch	AP3
ES.4.4	80	80	80	80	hoch	AP2
ES.4.5	80	80	80	80	hoch	AP2
ES.4.6	80	80	80	80	hoch	
ES.4.7	80	80	80	80	hoch	
ES.4.8	80	80	80	80	hoch	AP3
ES.2.3	40	40	40	40	normal	AP3
ES.2.4	40	40	40	40	normal	AP2
ES.2.5	40	40	40	40	normal	AP2
ES.2.6	40	40	40	40	normal	AP3
ES.2.7	40	40	40	40	normal	AP3
ES.2.8	40	40	40	40	normal	
ES.3.1	15	20	20	15	gering	AP3
ES.3.3	15	15	15	15	gering	AP3
ES.3.4	15	15	15	15	gering	AP2
ES.3.5	15	15	15	15	gering	AP2
ES.3.6	15	15	15	15	gering	AP3
ES.3.7	15	15	15	15	gering	
ES.3.8	15	15	15	15	gering	
B.2.2	40	40	40	40	normal	AP3

4 Ermüdungsversuche (AP1)

4.1 Durchführung der Versuche

Die Durchführung des Ermüdungsversuchsprogramms fand in der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (MPA) statt. Zur Prüfung stand eine Universalprüfmaschine des Typs Schenck 400 zur Verfügung, deren maximale dynamische Prüflast bei 320 kN liegt. Die Prüfkörper wurden, wie in Abbildung 14 zu sehen, mit vier servohydraulisch betriebenen Spannbacken in der Prüfeinrichtung befestigt, wobei die unteren Spannbacken die Zugbeanspruchung aufbringen.

Im Vorfeld der Schwingbeanspruchung wurde jeder Prüfkörper mit einer statischen Beanspruchung in Höhe der Oberlast F_0 belastet. Zum einen um den Prüfkörper, bzw. das verwendete Material auf sein elastisches Verhalten zu überprüfen, zum andern um eventuell auftretenden Schlupf in der Verbindung zu kompensieren.

Aufgrund der geringen Verformung des Prüfkörpers unter der zyklischen Beanspruchung konnte der Prüfstand mit einer Frequenz von bis zu 11 Hz gefahren werden.

Die Messeinrichtung erfolgte durch zwei Dehnmessstreifen (DMS), die links und rechts an der unteren Prüfkörperhälfte im Abstand von 25 mm der HFH-nachbehandelten Quersteiffennaht angebracht wurden. Diese dienen zur Überprüfung der Dehnung und zur Ermittlung des technischen Anrisses. Außerdem konnte mithilfe der beiden DMS der Biegeanteil des Prüfkörpers ermittelt werden.

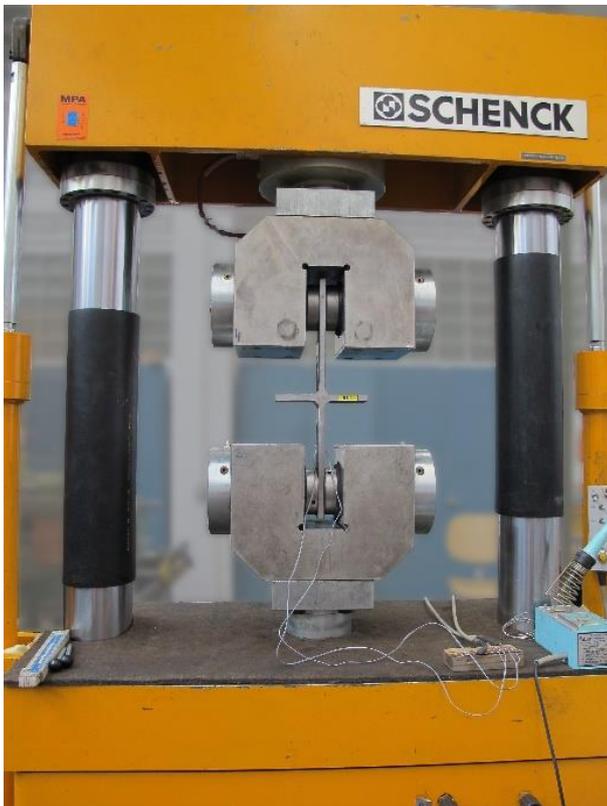


Abbildung 14: Versuchskörper in Prüfstand Schenck 400 kN



Abbildung 15: Nahaufnahme eines geprüften Versuchskörpers

4.2 Versuchsergebnisse und Auswertung

4.2.1 Allgemeines

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Ermüdungsversuche an der unbelasteten Quersteife in Abhängigkeit der verschiedenen HFH-Nachbehandlungsszenarien dargestellt. Zur Darstellung im Wöhlerdiagramm wurde die Nennspannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ über die erreichte Schwingungszahl aufgetragen. Die erreichte Schwingungszahl N der Versuche bezieht sich dabei auf den Durchriss des Probekörpers am Nahtübergang.

Zusätzlich wurde in Breunig [1] die Schwingungszahl bei einem definierten technischen Anriss ausgewertet, um das Anriss- und Risswachstum der HFH-behandelten Versuchskörper mit den unbehandelten und in unterschiedlicher Qualität nachbehandelten Versuchskörper gegenüberzustellen. Außerdem wurden die Biegeanteile, die über Schweißverzug der Quersteife durch Einspannung in den Probekörper eingebracht wurden, ermittelt und der Auswertung ohne Sekundärbiegung gegenübergestellt.

4.2.2 Ergebnisse unbehandelter Proben

In einem ersten Schritt wurde die unbehandelte Versuchsreihe B1 getestet. Die Ergebnisse dieser unbehandelten (as-welded /aw) Serie (Quadrate) können Abbildung 16 entnommen werden.

Hinzugefügt wurden die Ergebnisse der unbehandelten (aw) Ermüdungsversuche des vorangehenden BAW-Projekts (2013), gekennzeichnet durch Kreise) [10]. Es ist deutlich zu erkennen, dass die aktuellen Versuchsergebnisse eine geringere Streuung der Ergebnisse ausweisen und dicht bei der durch die DIN EN 1993-1-9 [5] vorgegebenen Nennspannungswöhlerlinie von 80 N/mm² nach Tab. 8.3 liegen. Die Streubreite der im vorangehenden BAW-Projekt [10] lag etwas höher, vor allem im Bereich geringer Spannungsschwingbreiten. Die Serie B2 liegt tatsächlich im Bereich normal HFH-nachbehandelter unbelasteter Quersteifen und kann als Referenzserie herangezogen werden. Die Versuchskörper der Serie B1 verhalten sich im unbehandelten Zustand demnach wie erwartet und eignen sich somit als unbehandelte Referenzserie.

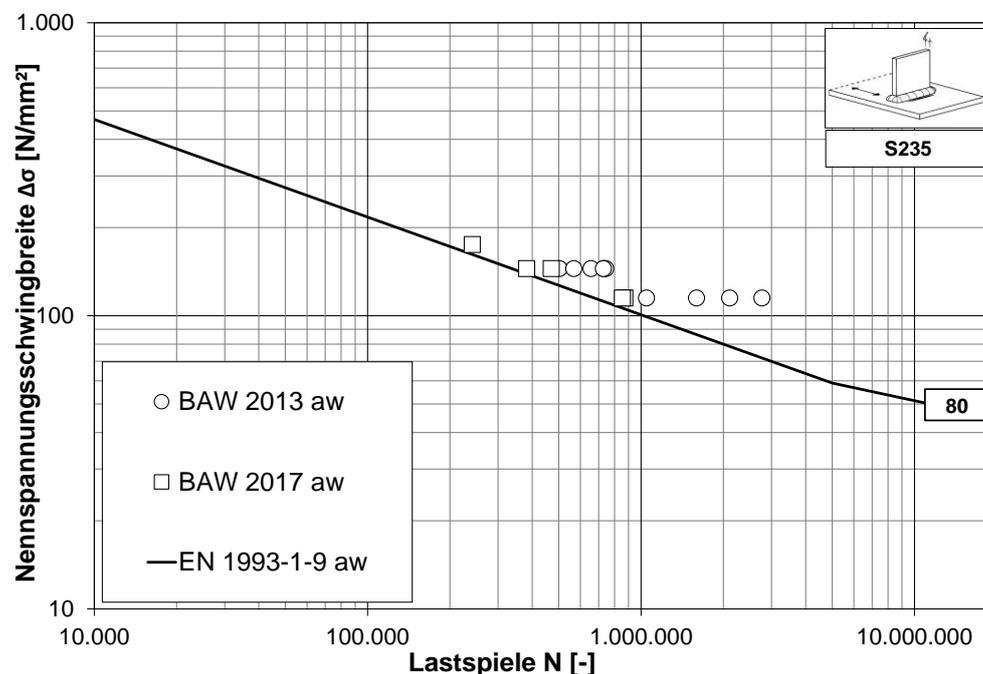


Abbildung 16: Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm für unbelastete Versuchskörper aus dem vorliegenden und vorhergehenden Projekt (2013) [10]

4.2.3 Ergebnisse HFH-behandelter Proben

In den folgenden Abbildungen ist neben den durchgeführten Ermüdungsversuchen die Bemessungs-Wöhlerlinie, die im Rahmen des Projekts „Entwurf einer DAST-Rili für Höherfrequente Hämmerverfahren“ [9] entwickelt wurde, dargestellt. Die DAST-Rili sieht für HFH-behandelte unbelastete Quersteifen aus S235 unter Spannungsverhältnis $R=0,1$ eine Ermüdungsfestigkeit bei 2 Mio. Lastwechsel von 100 N/mm^2 vor. Basis der Ermittlung der Ermüdungsfestigkeiten des DAST-Rili Konzepts ist die Auswertung einer großen Datenbank mit HFH-behandelten Ermüdungsversuchen unter fixer Neigung von $m_{\text{fix}} = 5$. Im Fall der Auswertung der Baustahlgüte S235, ist die Wahl der fixen Wöhlerlinienneigung sehr konservativ, was zu einem Kerbfall von 100 N/mm^2 führt.

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe B2 mit normal HFH-nachbehandelten Schweißnahtübergängen. Gegenüber der ursprünglich erreichbaren Ermüdungsfestigkeit des unbehandelten Zustands (aw) nach DIN EN 1993-1-9 [5] zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit. Auffällig ist auch eine geringe Streuung der Versuchsergebnisse ebenso wie eine relativ flache Neigung. Die Darstellung der DAST-RiLi-Bemessungskurve 100, zeigt das enorme Potential, dass sich durch die HFH-Anwendung ergibt.

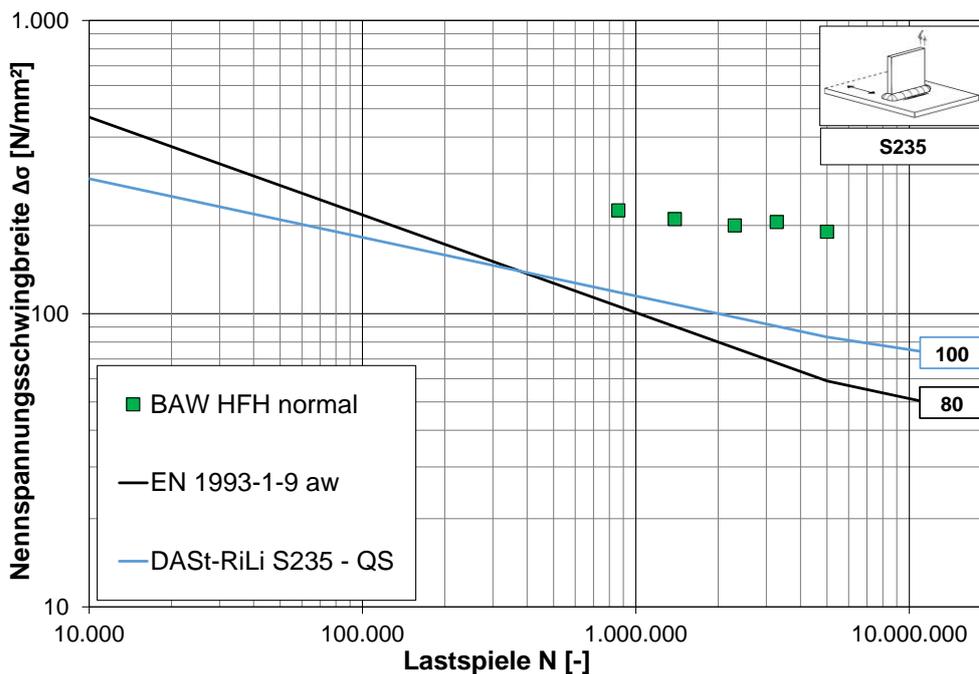


Abbildung 17: Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm für normal HFH-nachbehandelte Versuchskörper

Der Vergleich der normal HFH-behandelten Versuchskörper dieses Projekts mit dem vorangehenden Projekt [10] zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Die Nachbehandlungsdauer mit 40s pro Nahtübergang für die „normal“ HFH-behandelten Versuchskörper ist somit bestätigt. Die aktuellen Ergebnisse deuten gegenüber den eingezeichneten Bemessungswöhlerlinien eine verhältnismäßig flache Wöhlerlinienneigung an.

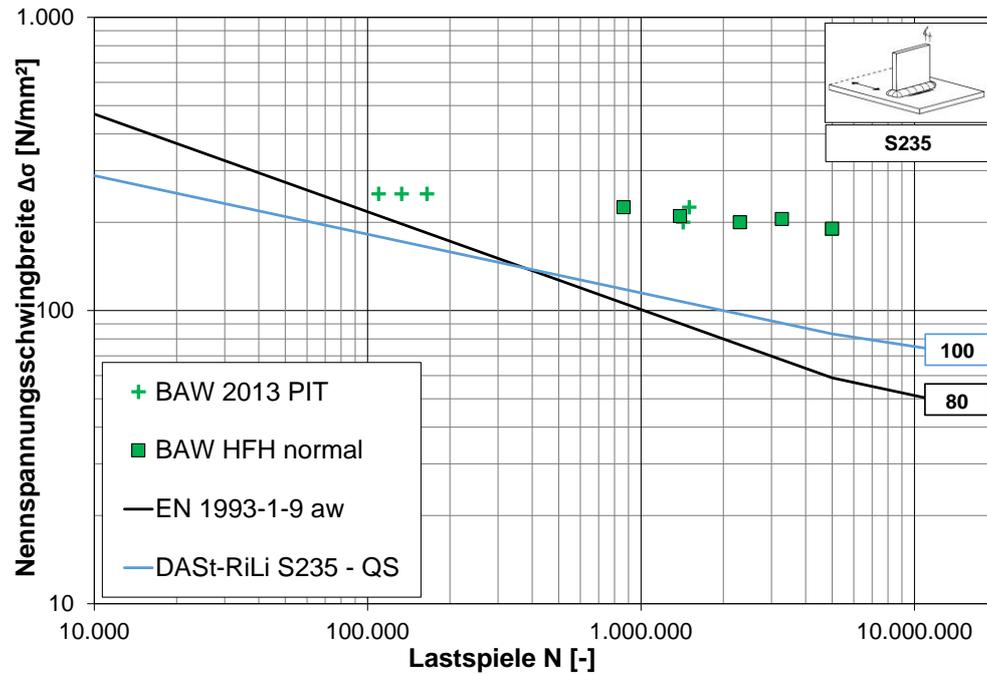


Abbildung 18: Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm für normal HFH-nachbehandelte Versuchskörper aus dem vorliegenden und vorhergehenden Projekt (2013) [10]

In Abbildung 19 sind den normal HFH-behandelten Versuchsergebnissen (grün) die hoch HFH-behandelten Versuchsergebnisse (rot) gegenübergestellt. Die Serien sind anhand ihrer erreichten Schwingspielzahlen nicht voneinander zu unterscheiden. Die Ergebnisse der Serie mit hoher HFH-Nachbehandlung zeigte eine verhältnismäßig geringe Streuung.

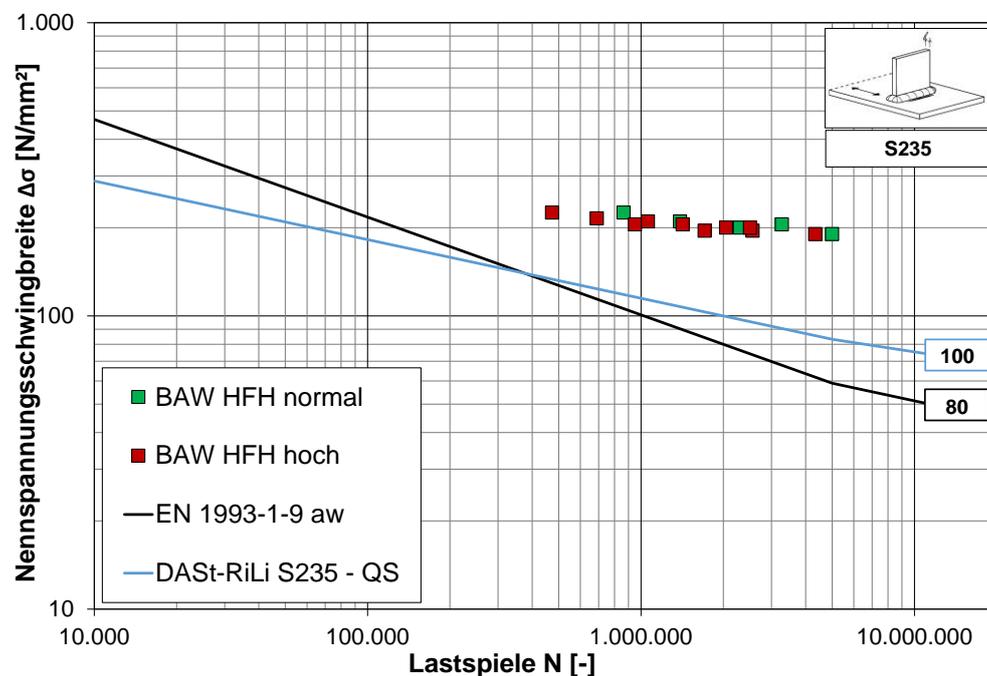


Abbildung 19: Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm für zu hoch und normal HFH-nachbehandelte Versuchskörper

Anhand Abbildung 20 mit der Gegenüberstellung aller unterschiedlich HFH-behandelter Ermüdungsversuche zeigt sich deutlich, dass keine Abweichung in der erreichten Schwingspielanzahl durch den geprüften Parameter Nachbehandlungsdauer erreicht wurde.

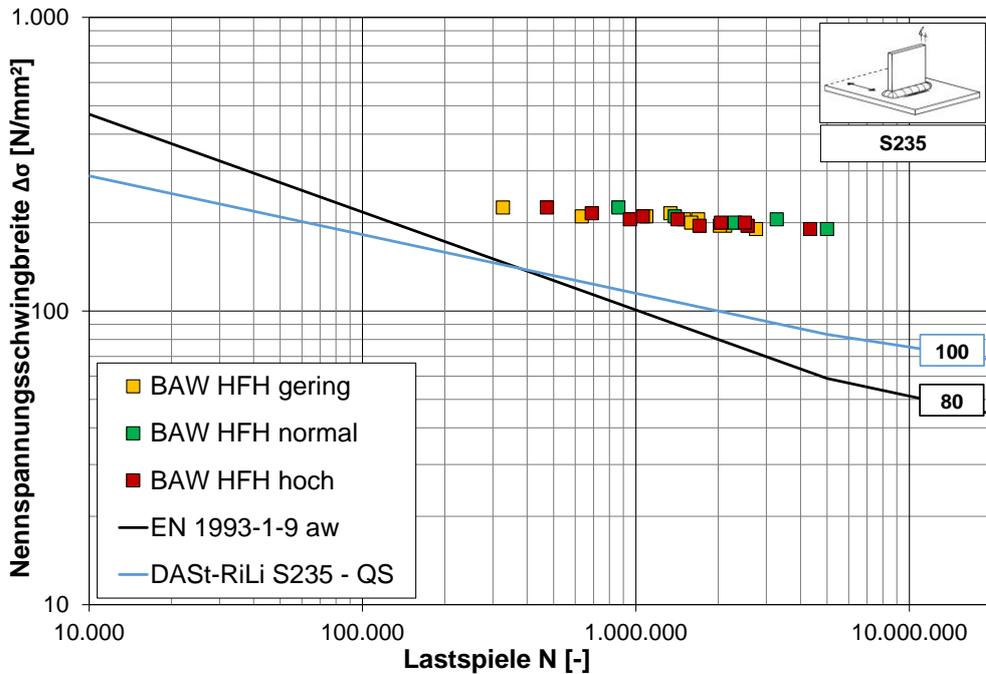


Abbildung 20: Versuchsergebnisse im Wöhlerdiagramm aller HFH-nachbehandelten Versuchskörper

4.2.4 Auswertung der Versuchsergebnisse

Anhand der statistischen Auswertung, die in Tabelle 8 und Tabelle 9 in Abhängigkeit der Wöhlerlinienneigung zusammengestellt ist, wird deutlich, inwieweit sich die ermittelten Ermüdungsfestigkeiten der jeweiligen Serien unterscheiden. Für die Auswertung mit fixer Wöhlerlinienneigung in Tabelle 9 wurde für den unbehandelten Zustand (aw) eine Neigung von $m_{\text{fix,aw}} = 3$ und für den HFH-behandelten Zustand ein Wert von $m_{\text{fix,HFH}} = 5$ angenommen. Ähnlich wie im vorhergehenden Projekt [10] konnte der Wert $m=5$ für HFH-nachbehandelte Quersteife aus S235 allerdings nicht bestätigt werden, sondern die Wöhlerlinienneigung fällt mit Werten zwischen 7,5 und 12,5 deutlich flacher aus als bei höheren Stahlgüten, wie die Werte in Tabelle 8 bei freier Wöhlerlinienneigung zeigen.

Tabelle 8: Ergebnisse der statistischen Auswertung mit freier Wöhlerlinienneigung

Serie	Anzahl der Versuchskörper N [-]	Wöhlerlinienneigung m [-]	Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{50\%}$ [N/mm ²]	5% Fraktilwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{95\%}$ [N/mm ²]
aw	5	3,0	87	78
HFH gering	10	11,0	197	186
HFH normal	5	7,5	208	178
HFH hoch	10	12,5	199	191

Tabelle 9: Ergebnisse der statistischen Auswertung mit fixer Wöhlerlinienneigung

Serie	Anzahl der Versuchskörper N [-]	Wöhlerlinienneigung m [-]	Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{50\%}$ [N/mm ²]	5% Fraktilwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{95\%}$ [N/mm ²]
aw	5	3	87	79
HFH gering	10	5	188	157
HFH normal	5	5	207	175
HFH hoch	10	5	192	160

Unter Berücksichtigung der Auswertung mit fixer Wöhlerlinienneigung, also konservativ betrachtet, ergibt sich anhand Tabelle 9 ein Verbesserungsfaktor $k_{imp, HFH, m=fix}$ zwischen normal HFH- und unbehandelter Serie von 2,2 nach Gleichung (4-1). Bei Auswertung mit freier Neigung, vgl. Tabelle 8, zeigt sich aufgrund der flacheren Neigung normal nachbehandelter Serie in Kombination mit einer steileren Neigung für die unbehandelte Serie ein Faktor $k_{imp, HFH, m=frei}$ von 2,3 nach Gleichung (4-2). Der Unterschied zwischen den beiden Auswertungsvarianten ist geringfügig.

$$k_{imp, HFH, m=fix} = \frac{\Delta\sigma_{HFH, normal, 95\%}}{\Delta\sigma_{aw, 95\%}} = \frac{175 \text{ N/mm}^2}{79 \text{ N/mm}^2} = 2,2 \quad (4-1)$$

$$k_{imp, HFH, m=frei} = \frac{\Delta\sigma_{HFH, normal, 95\%}}{\Delta\sigma_{aw, 95\%}} = \frac{178 \text{ N/mm}^2}{78 \text{ N/mm}^2} = 2,28 \quad (4-2)$$

Interessant ist der Vergleich der ermittelten Ermüdungsfestigkeiten der unterschiedlichen Nachbehandlungszustände. Betrachtet werden im Folgenden die Ergebnisse der Auswertung mit freier Wöhlerlinienneigung zu 50%, da zur Ableitung eines Trends die 95 % Fraktilwerte, also Bemessungswerte, die Tendenzen verfälschen können.

Gleichung (4-3) und (4-4) zeigen, dass sowohl die Serie mit geringer als auch diejenige mit zu hoher HFH-Nachbehandlung zu einer 95%igen bzw. 96%igen Ermüdungsfestigkeit des normal-HFH-behandelten Zustands führen. Aufgrund einer mit 10 Probekörpern je Serie ordentlich belegten und somit repräsentativen Stichprobengröße kann hier von keiner signifikanten Abminderung der Ermüdungsfestigkeit durch eine variierte Qualität der Nachbehandlung der untersuchten Parameter von PIT ausgegangen werden.

$$k_{unter, HFH, m=frei} = \frac{\Delta\sigma_{HFH, gering, 50\%}}{\Delta\sigma_{HFH, normal, 50\%}} = \frac{197 \text{ N/mm}^2}{208 \text{ N/mm}^2} = 0,95 \quad (4-3)$$

$$k_{über, HFH, m=frei} = \frac{\Delta\sigma_{HFH, hoch, 50\%}}{\Delta\sigma_{HFH, normal, 50\%}} = \frac{199 \text{ N/mm}^2}{208 \text{ N/mm}^2} = 0,96 \quad (4-4)$$

Die Gegenüberstellung der mittleren Ermüdungsfestigkeit von gering- zu normalbehandelter Naht führt zu einer Reduktion von nur 5 %. Der Vergleich zwischen hoch- und normalbehandelt zeigt auch eine Abminderung von nur 4%. Das zeigt, dass all die Werte im gleichen Streubereich liegen. Die Intensität im Sinne der Nachbehandlungsdauer hat also keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit.

5 Eigenspannungs – und Härtemessungen (AP2)

5.1 Eigenspannungsmessungen

5.1.1 Allgemeines

In Abstimmung mit den Vertretern der BAW wurde entschieden, für die Eigenspannungsmessungen mittels Röntgendiffraktometrie ungeprüfte Versuchskörper zu verwenden. Aus der Literatur nach Tehrani Yekta et. al. [14] geht hervor, dass der Eigenspannungszustand an der Oberfläche durch die Versuchsdurchführung zu stark verändert ist. Um diese Erkenntnis zu belegen, wurden im Rahmen von AP3 Eigenspannungen am Versuchskörper B.2.2, der bereits zuvor auf Ermüdung getestet wurde, gemessen. Dies bestätigte, dass im Bereich von vorhandenen Ermüdungsrissen selbst am normal-PIT-nachbehandelten Prüfkörper keine Eigenspannungen mehr vorhanden sind. In Abbildung 21 sind die fünf Messpunkte, an denen die Eigenspannungen an der Oberfläche und in einer Tiefe von 0,1 mm gemessen wurden, dargestellt. Die Lage der Messpunkte ist Abbildung 23 zu entnehmen.

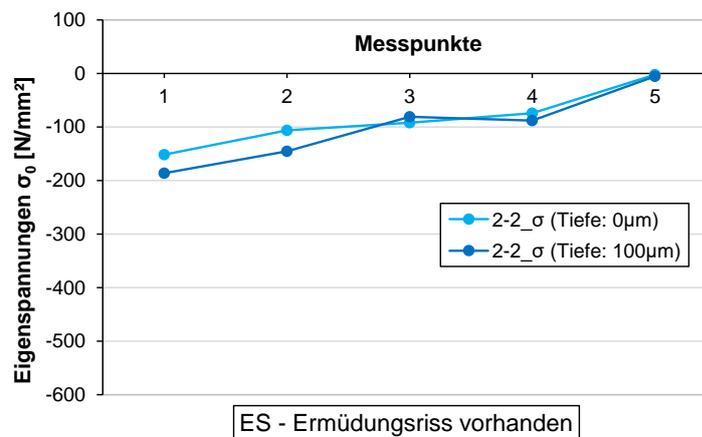


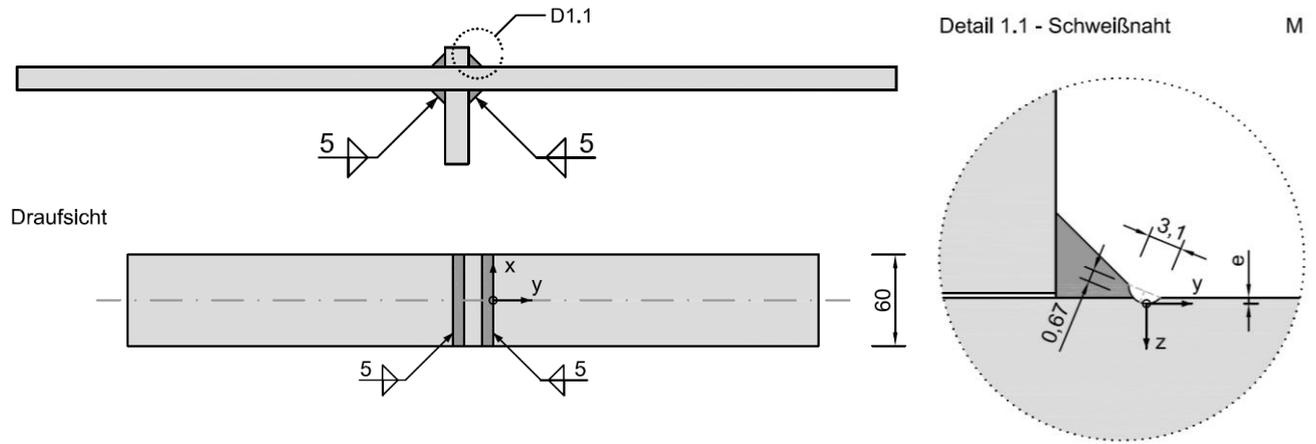
Abbildung 21: Versuchskörper B.2.2 mit Ermüdungsriss – Eigenspannungsmessung der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur nach Ermüdungsversuch

5.1.2 Durchführung der Eigenspannungsmessungen

Relevant für den Fall der unbelasteten Quersteife sind die Eigenspannungswerte (Quereigenspannungen gemäß Abbildung 22) senkrecht zur Schweißnaht. Die Längseigenspannungen sind von untergeordnetem Interesse für die Wirksamkeit der HFH-Behandlung auf die Ermüdungsfestigkeit und wurden deshalb nicht gemessen.

Um die gewünschten Messungen mittels Röntgendiffraktometrie nach [6] mit dem Kollimator durchführen zu können, mussten die Probekörper nachbearbeitet werden, so dass die Messstelle für den Kollimator mit all seinen Kippstellungen zugänglich war. Dazu wurde die aufgeschweißte Quersteife in ihrer Höhe auf ca. 10 mm reduziert, siehe Abbildung 22 und Abbildung 24. Es ist davon auszugehen, dass durch das Abtragen der Quersteife oberhalb von der HFH-nachbehandelten Kehlnaht kein Einfluss auf den Eigenspannungszustand am unteren Nahtübergang des Basisblechs bewirkt wurde.

Da der Qualitätssicherungstest direkt auf der gehämmerten Oberfläche durchgeführt werden soll, liegt es nahe, auch die eingepprägten Eigenspannungen direkt an der Oberfläche zu überprüfen. Aufgrund der geometrischen Veränderung der Schweißnahtkerbe durch die HFH-Nachbehandlung, kann es jedoch sein, dass es zu fehlerhaften Werten bei der Eigenspannungsmessung auf einer ungleichmäßigen Oberfläche kommt. Aus diesem Grund wurden Eigenspannungsmessungen ohne Oberflächenvorbereitung direkt auf der Oberfläche der HFH-Spur durchgeführt und in einem zweiten Schritt eine Schicht von 0,1 mm elektrolytisch abgetragen und die Eigenspannungen in einer Tiefe von 0,1 mm gemessen.



Messrichtungen

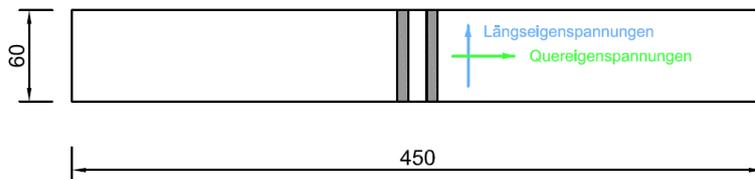


Abbildung 22: Geometrie des Versuchskörpers für Eigenspannungsmessungen

Der Abstand der fünf Messpunkte entlang der HFH-Nachbehandlungsspur wurde in Abstimmung mit der SLV Halle, die die Messung durchgeführt hat, zu 4 mm gewählt. So konnte der elektrolytische Abtrag in Längsrichtung für zwei Punkte gerade noch gleichzeitig durchgeführt werden, siehe Abbildung 23. Ebenso war zu erwarten, dass die Eigenspannungen in diesem Abstand schon sehr stark voneinander abweichen können.

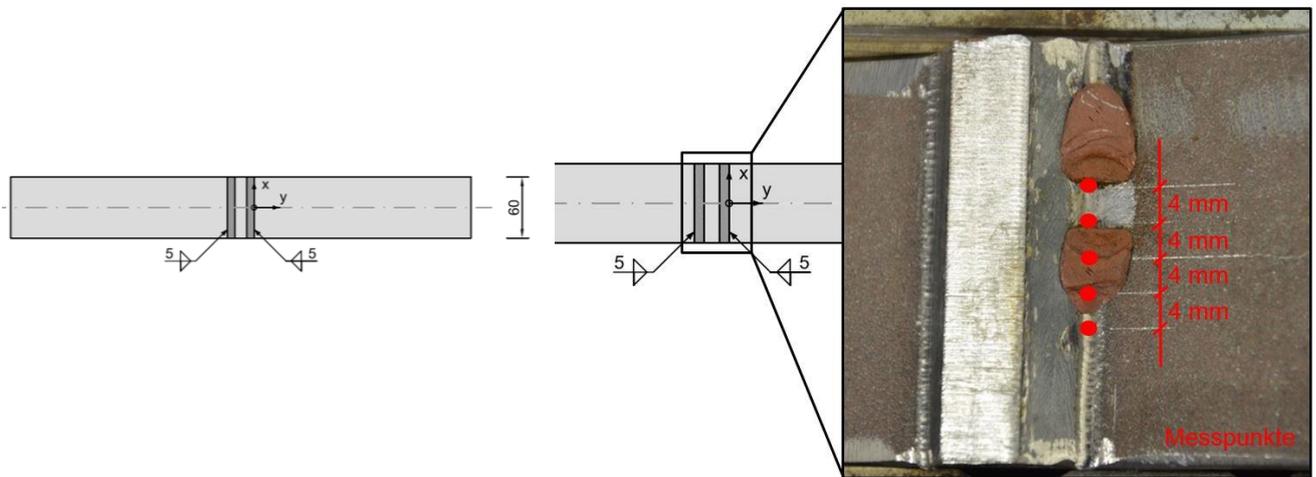


Abbildung 23: Darstellung der Messpunkte entlang der HFH-Nachbehandlungsspur mit Abformmasse für den elektrolytischen Abtrag

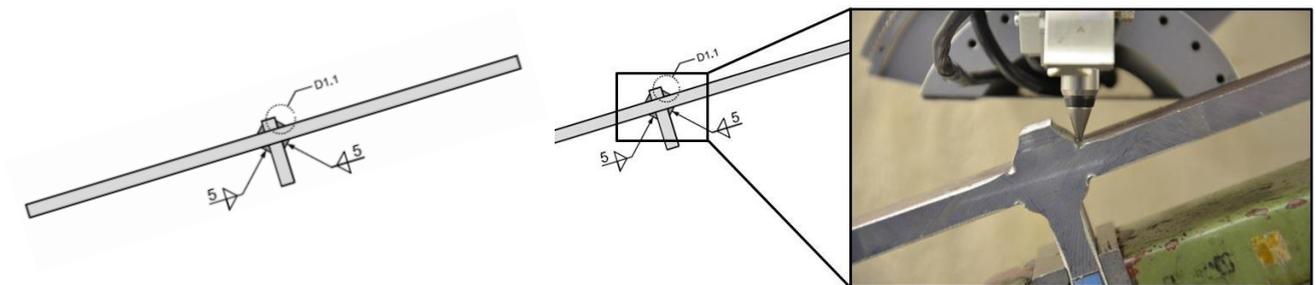


Abbildung 24: Darstellung des Messvorgangs am um 20° gedrehten Prüfkörper

5.1.3 Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen des jeweiligen Versuchskörpers in Abhängigkeit der HFH-Nachbehandlungsqualität normal, gering und hoch dargestellt. Falls nicht anders vermerkt, werden in den Diagrammen in diesem Bericht normal HFH-nachbehandelte Prüfkörper grün, gering HFH-nachbehandelte Prüfkörper gelb und hoch HFH-nachbehandelte Prüfkörper rot abgebildet.

Abbildung 25 zeigt die Eigenspannungen der normal HFH-nachbehandelten Versuchskörper ES 2-4 (links) und ES 2-5 (rechts). Es wird deutlich, dass beide Prüfkörper in den untersuchten Tiefen hohe Druckeigenspannungen in der HFH-Spur aufweisen. Die Werte liegen bei beiden Probekörpern im Bereich von ca. -300 N/mm^2 bis -550 N/mm^2 . Prüfkörper ES 2-5 weist dabei einen etwas geringeren Streubereich auf als die Spur des Prüfkörpers ES 2-4. Tendenziell zeigt sich, dass die Messungen in einer Tiefe von $0,1 \text{ mm}$ minimal größere Druckeigenspannungen erreichen als die Werte, die direkt an der Oberfläche gemessen wurden.

Die gemessenen Eigenspannungen der gering HFH-nachbehandelten Versuchskörper sind in Abbildung 26 dargestellt. Anhand des Eigenspannungsverlaufs von Prüfkörper ES 3-4 wird deutlich, dass auch für diesen Nachbehandlungszustand Druckeigenspannungen im Bereich von -200 N/mm^2 bis 450 N/mm^2 erreicht werden können. Anhand des Beispiels von Prüfkörper ES 3-5 zeigt sich allerdings ebenso, dass in einer gering HFH-nachbehandelte Spur Eigenspannungswerte direkt auf der Spuroberfläche von nur 0 N/mm^2 bis -100 N/mm^2 vorliegen können. Interessant und auffällig ist in diesem Fall, dass die Druckeigenspannungen in der tieferen Messebene deutlich höhere Werte von -100 N/mm^2 bis -300 N/mm^2 zeigen.

An den hoch HFH-nachbehandelten Versuchskörpern ES 4-4 und ES 4-5 konnten Druckeigenspannungen im Bereich von -260 N/mm^2 bis -520 N/mm^2 nachgewiesen werden, siehe Abbildung 27. Der Prüfkörper ES4-5 weist tendenziell geringere Druckeigenspannungen auf als ES 4-4. Im Vergleich zu den gering HFH-nachbehandelten Versuchen ist ein relativ konstanter Verlauf der einzelnen Messwerte entlang der Hammerspur zu erkennen.

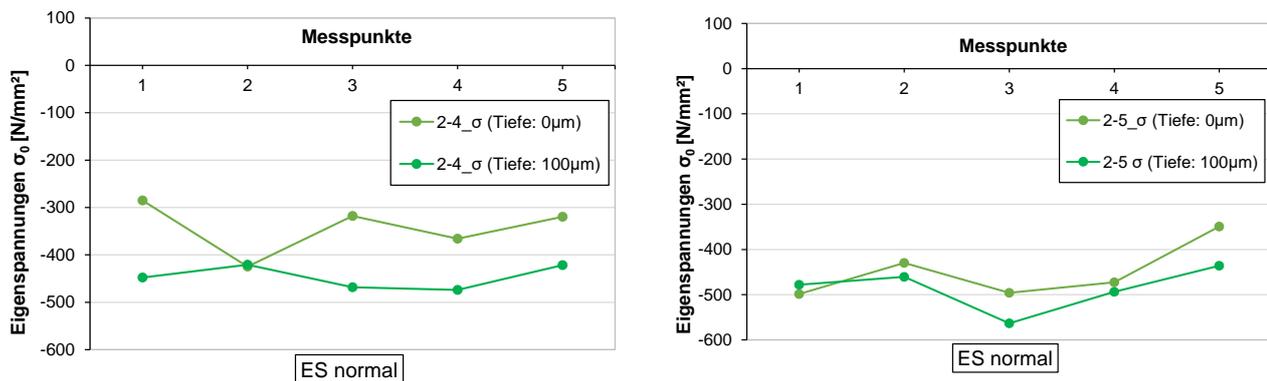


Abbildung 25: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für normal HFH-nachbehandelte Versuchskörper

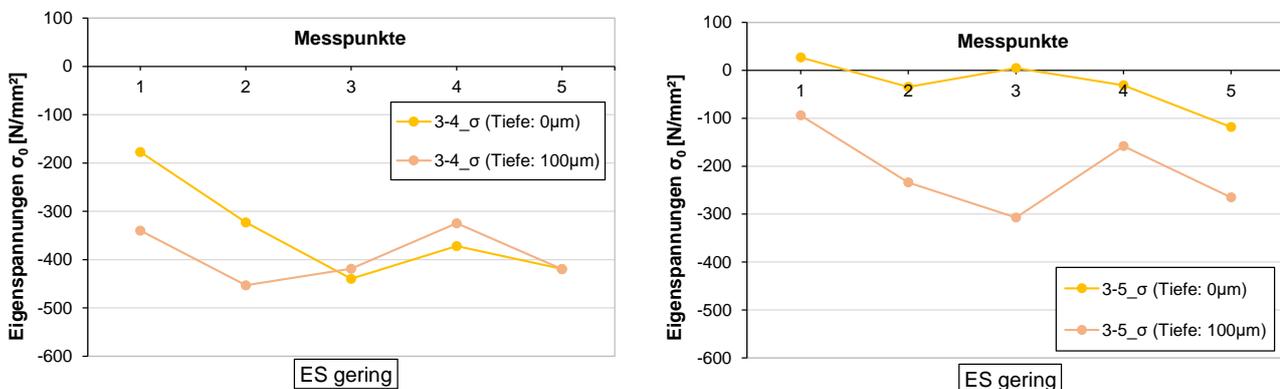


Abbildung 26: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für gering HFH-nachbehandelte Versuchskörper

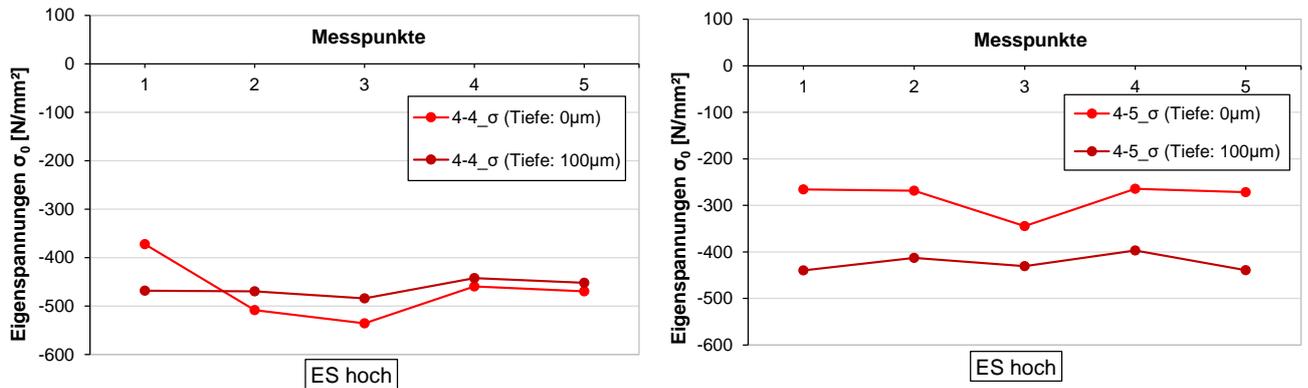


Abbildung 27: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für hoch HFH-nachbehandelte Versuchskörper

Deutlicher werden die Unterschiede der Messwerte im Vergleich der verschiedenen Nachbehandlungs-niveaus mit der normalen HFH-Nachbehandlung. Abbildung 28 zeigt den Vergleich der Messwerte der normal HFH-nachbehandelten Versuchskörper mit denjenigen der gering HFH-nachbehandelten Spur. Dabei ist zu sehen, dass der gering nachbehandelte Prüfkörper ES 3-4 sich nicht von den normal nachbehandelten Prüfkörpern abhebt, während der Prüfkörper ES 3-5 sichtbar geringere Druckeigenspannungen aufweist. Dies kann auf eine Restkerbe zurückzuführen sein.

Der Vergleich der Messwerte der normal HFH-nachbehandelten Versuchskörper mit denjenigen der hoch HFH-behandelten Spur in Abbildung 29 zeigt kaum Unterschiede. Anhand der verschiedenen Eigenspannungsverläufe lässt sich keine abweichende Qualität der Nachbehandlungsspur identifizieren. Interessant ist dabei der Vergleich der Messwerte zu den Materialparametern, siehe Breunig [1]. Es zeichnet sich ab, dass hohe HFH-Nachbehandlungen zu Druckeigenspannungen führen, die im Bereich der normal HFH-nachbehandelten Werte liegen. Es scheint, zu einer Art „Sättigung“ zu kommen, die zu keinen negativen Auswirkungen auf den Eigenspannungszustand bei zu hoch HFH-nachbehandelten Spuren führt. Eine zu hohe HFH-Nachbehandlung im Sinne einer Überbehandlung stellt daher in Hinblick auf die Eigenspannungen keine Gefahr dar.

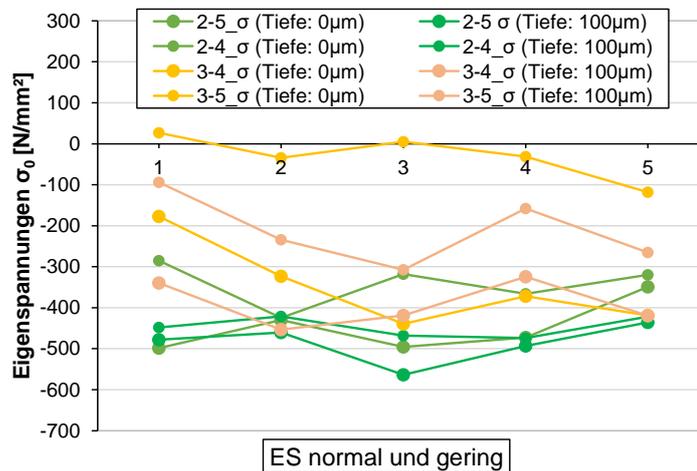


Abbildung 28: Vergleich der Eigenspannungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für normal (grün) und gering (gelb) HFH-nachbehandelte Versuchskörper

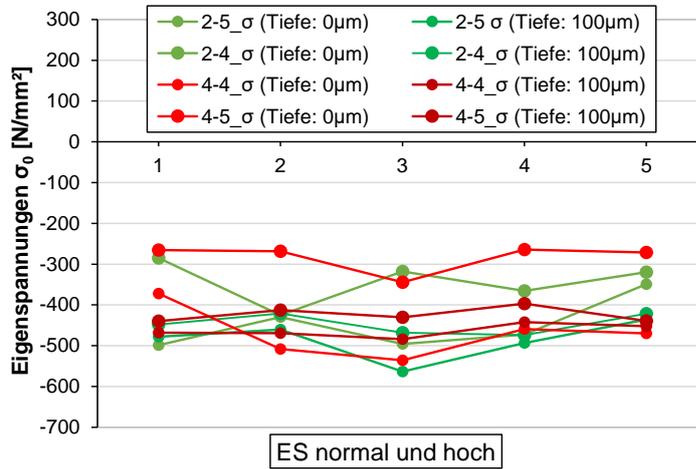


Abbildung 29: Vergleich der Eigenstressungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für normal (grün) und hoch (rot) HFH-nachbehandelte Versuchskörper

5.1.4 Zusammenfassung

Anhand der Eigenstressungsmessungen wurde versucht, die Qualität der HFH-Nachbehandlung zu beurteilen. Die Ergebnisse zeigen, dass hoch HFH-nachbehandelte Schweißnahtübergänge ähnliche Druckeigenstressungen wie normal HFH-nachbehandelte Prüfkörper aufweisen. Dagegen streuen die Ergebnisse der Eigenstressungsmessungen der gering HFH-nachbehandelten Prüfkörper stärker. Zum Teil sind bei einem gering HFH-nachbehandelten Prüfkörper Druckeigenstressungen im Bereich der normal HFH-nachbehandelten Prüfkörper nachweisbar, zum Teil sind aber auch bei einem gering HFH-nachbehandelten Prüfkörper kaum Druckeigenstressungen an der Oberfläche messbar. Die geringen Unterschiede korrespondieren teilweise auch mit den Ergebnissen aus den Ermüdungsversuchen, da gering und hoch HFH-nachbehandelte Prüfkörper im Bereich der normal HFH-nachbehandelten Prüfkörper mit einer geringen Streuung liegen.

5.2 Härtemessungen

5.2.1 Allgemeines

Die Härtemessungen im AP2 wurden an den 6 Versuchskörpern, an denen zuvor die Eigenstressungen gemessen wurden, mit der mobilen Härtemessung nach dem UCI-Verfahren [3] bei der Firma NewSonic GmbH in Reutlingen durchgeführt. Dabei wurde das Härteprüfgerät SonoDur2 mit der Hand-Mess-Sonde SONO-50HL.17 mit 49 N (5 kgf) mit einem dünnen Schwingstab, wie in Abbildung 30 dargestellt, verwendet.



Abbildung 30: Mobiles Härteprüfgerät SonoDur2 mit runder Härtevergleichsplatte der Firma NewSonic GmbH

Ziel ist zunächst herauszufinden, ob eine Korrelation zwischen den Eigenspannungen und der Härte besteht, damit später die Qualitätssicherung über die Messung der Härte erfolgen kann und man sicherstellt, dass der Effekt der Nachbehandlung und der durch diese eingebrachten Druckeigenspannungen wirksam ist.

Da bei der mobilen Härtemessung nach dem UCI-Verfahren [3] nicht wie bei der stationären Vickers-Härteprüfung [7] die Eindrücke des Diamanten bzw. die Länge der Diagonalen vermessen werden, müssen die Werte der mobilen Härtemessung weiterbearbeitet werden, um diese richtig zu interpretieren und Ausreißer zu eliminieren. Während die Eliminierung bei der stationären Härtemessung durch Interpretation der Gleichmäßigkeit des rautenförmigen Eindrucks durch einen Automatismus im stationären Messgerät geschieht, muss dieser Schritt bei der Anwendung des UCI-Verfahrens vom Prüfer selbst durchgeführt werden. Oft kann kein direkter Zusammenhang zwischen einem Ausreißer und dem Eindruck auf dem Prüfkörper, siehe Abbildung 31, hergestellt werden.

Bei der Darstellung der Ergebnisse sind im 1. Schritt alle Werte, die vom Härtemessgerät aufgezeichnet wurden, abgebildet, das heißt eine Eliminierung der Ausreißer wurde absichtlich nicht vorgenommen. Die Hammerspur am Prüfkörper wurde in Abschnitte mit einer Größe von 5 mm unterteilt, innerhalb dieser Abschnitte wurden, wie in Abbildung 31 dargestellt, jeweils 3-4 Härtemesspunkte gesetzt und somit ergaben sich für den gehämmerten Schweißnahtübergang zwischen 40-48 Messpunkte.

Die Messergebnisse werden zum Teil anhand der Mittelwerte und zum anderen Teil in Box-Plot Diagrammen dargestellt. Bei Box-Plot Diagrammen werden der kleinste und größte Wert des Datensatzes als Minimum und Maximum angezeigt. In der Box werden die mittleren 50% der Werte des Datensatzes und der Median als Strich innerhalb der Box abgebildet.



Abbildung 31: Übersicht über Eindruckpunkte der Härtemessung am PIT-nachbehandelten Schweißnahtübergang

5.2.2 Durchführung der Härtemessungen

Vor Durchführung der Härtemessungen wurden erste Testmessungen am Grundmaterial und in der Hammerspur gemacht, um den erforderlichen Grad der Oberflächenvorbereitung auszuwerten. Diese sind in Abbildung 32 in einem Box-Plot Diagramm dargestellt.

Bei den Testmessungen am Grundmaterial GM_01 und GM_02 mit jeweils 10 Härtewerten ist zu sehen, dass die Ergebnisse in einem deutlich kleineren Streubereich liegen wie vergleichsweise die Härtemessungen in der Spur 1,2 und 3, die große Streuungen aufweisen.

Dabei wurden drei unterschiedliche Oberflächenzustände für die Härtemessung in der Spur generiert. Zunächst wurde die Messung an einer „ungereinigten“ Hammerspur am Nahtübergang durchgeführt, vgl. Abbildung 32 Spur 1. Da sich an den Probekörpern mit der Zeit Flugrost festgesetzt hatte, wurde in einem zweiten Schritt die Hammerspur, vgl. Abbildung 32 Spur 2, mit Brennspiritus gereinigt, um dadurch die Streuung der Ergebnisse zu verkleinern.

Ein weiterer Oberflächenzustand wurde durch Verschleifen der Hammerspur mittels Winkelschleifer, siehe Abbildung 32 Spur 3, erzeugt. Der Materialabtrag wurde dabei so gering wie möglich gehalten, um die Vergleichbarkeit zu den beiden Zuständen „ungereinigt“ und „gereinigt“ sicher zu stellen. Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, sind die Werte, die auf der geschliffenen Hammerspur Spur 3 gemessen wurden, ähnlich zu den Messwerten der gereinigten Spur 3. Die Mittelwerte liegen nah beieinander und die Streuung der Werte ist ähnlich groß. Beim Schleifen der Spur steigt das Risiko, die Oberfläche zu verändern und dadurch die Härtemessung zu verfälschen.

Aufgrund der Ergebnisse dieser ersten Testversuche wurde mit den Vertretern der BAW festgelegt, dass die Spur am Prüfkörper bei Flugrost mittels Brennspritus gereinigt, jedoch auf ein Schleifen des Schweißnahtübergangs verzichtet wird.

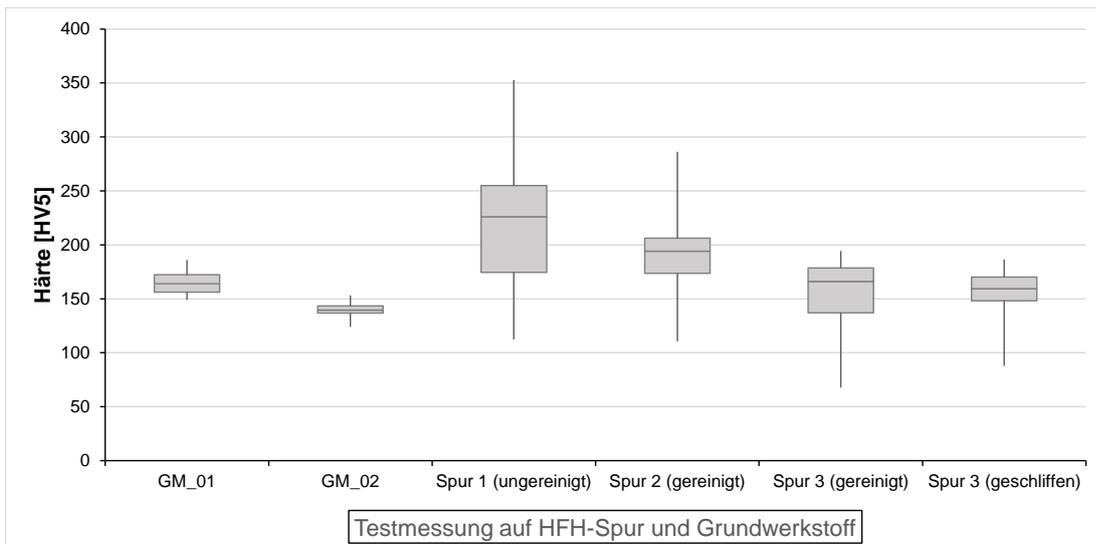


Abbildung 32: Testmessung auf HFH-Spur und Grundwerkstoff mit unterschiedlicher Oberfläche

Bedingt durch die manuelle Führung der Mess-Sonde war es nicht möglich einen Applikationswinkel α_{UCI} zu fixieren, des Weiteren war eine Variation des Winkels α_{UCI} aufgrund der Geometrie im Bereich des Anschlussbleches der Steife nur bedingt möglich. So ließ sich vor der Durchführung der Härtemessungen kein fixer Applikationswinkel α_{UCI} festlegen, da dieser je nach Führung und Positionierung der Mess-Sonde leicht variierte, sich aber am PIT-Nachbehandlungswinkel von 70° orientierte.

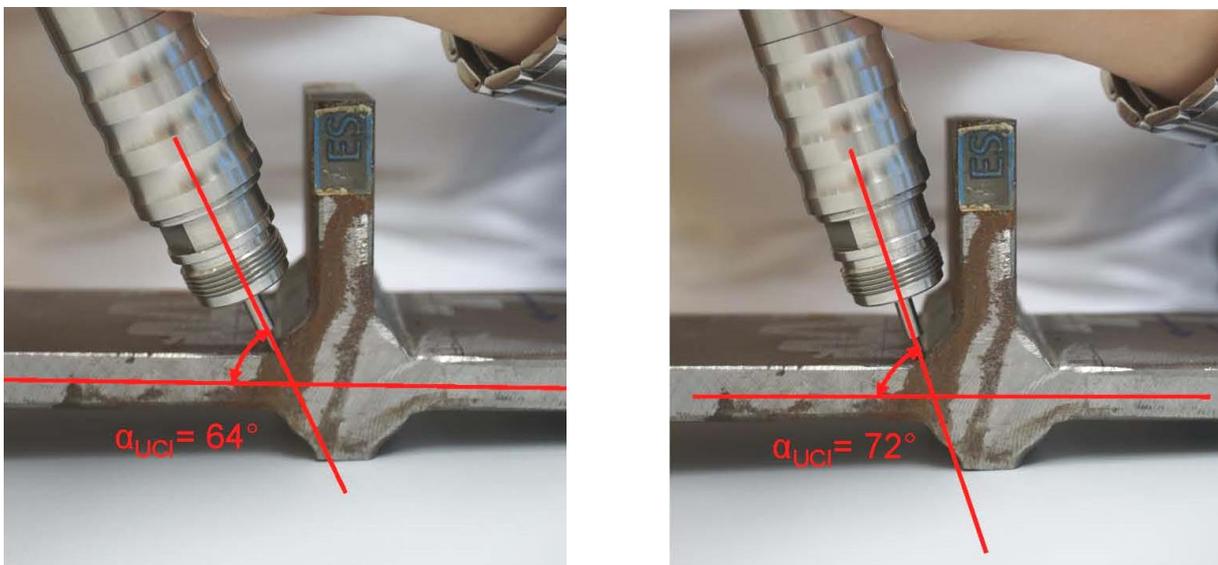


Abbildung 33: Applikationswinkel α_{UCI}

Bei bestehender Restkerbe wurde versucht, die Härtemesspunkte nahe an der Kerbe zu setzen, um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, da angenommen wurde, dass Härtewerte im Bereich der Restkerbe durch die Aufspaltung des Materials niedriger sind.

5.2.3 Ergebnisse der Härtemessungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Härtemessungen zusammengefasst. Abbildung 34 stellt die Mittelwerte und Box-Plot Diagramme für 9 Proben des Grundmaterials dar, Abbildung 35 und Abbildung 36 die Mittelwerte und Box-Plot Diagramme für 25 nachbehandelte Hämmer Spuren.

Als Referenz für die Härtemessungen in der Spur wurden an allen Prüfkörpern jeweils 10 Messpunkte am Grundmaterial aufgenommen. Die Medianwerte und das Box-Plot Diagramm sind in Abbildung 34 dargestellt. Das Material und die Härte der Prüfkörper sind theoretisch aufgrund des Fertigungsprozesses identisch. Die Mittelwerte, die häufig im Bereich des Medians liegen, streuen im Bereich von 131 bis 192 HV5, wobei der Mittelwert aller Werte für den Grundwerkstoff bei 157 HV5 liegt.

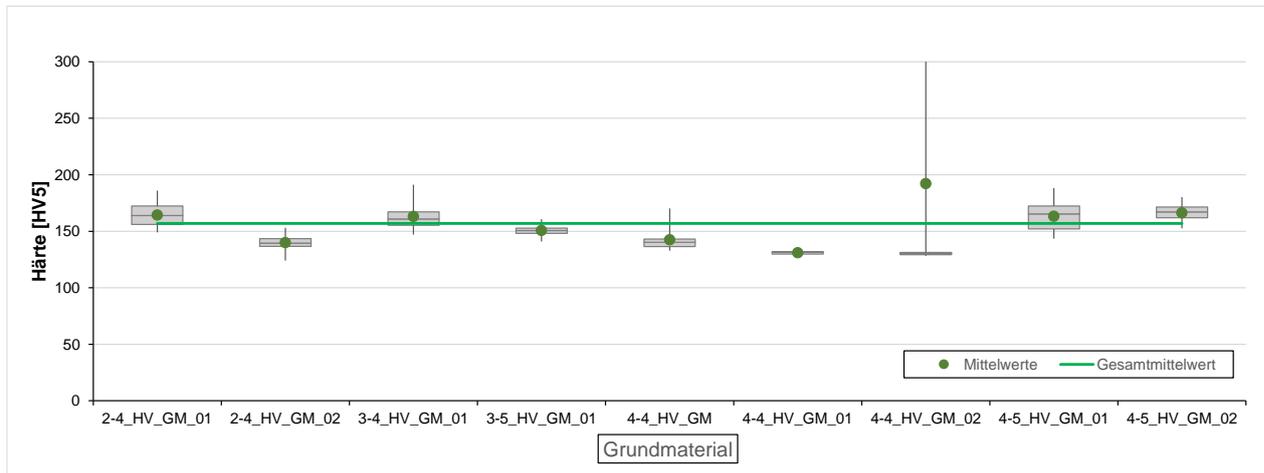


Abbildung 34: Mittelwerte (dunkelgrün) und Box-Plot der jeweiligen Grundmaterialien S235 für 9 Proben sowie Gesamtmittelwert (hellgrün)

Beim Vergleich der Mittelwerte der HFH-nachbehandelten Schweißnahtübergänge in Abbildung 35 und der Box-Plot Diagramme in Abbildung 36 ist zu erkennen, dass kaum eine Unterteilung der Messergebnisse der Härtewerte in verschiedene Nachbehandlungsintensitätsbereiche erfolgen kann. Die Mittelwerte in Abbildung 35 der gering nachbehandelten Spuren ES 3 (gelb), die sich in einem Bereich von 141 bis 199 HV5 befinden, unterscheiden sich kaum von den normal nachbehandelten Spuren ES 2 (grün), die in einem Bereich von 143 bis 219 HV5 liegen. Die hoch nachbehandelten Prüfkörper ES 4 (rot) mit Mittelwerten von 158 bis 222 HV5 heben sich nicht von den normal und nur wenig von den gering nachbehandelten Prüfkörpern ab.

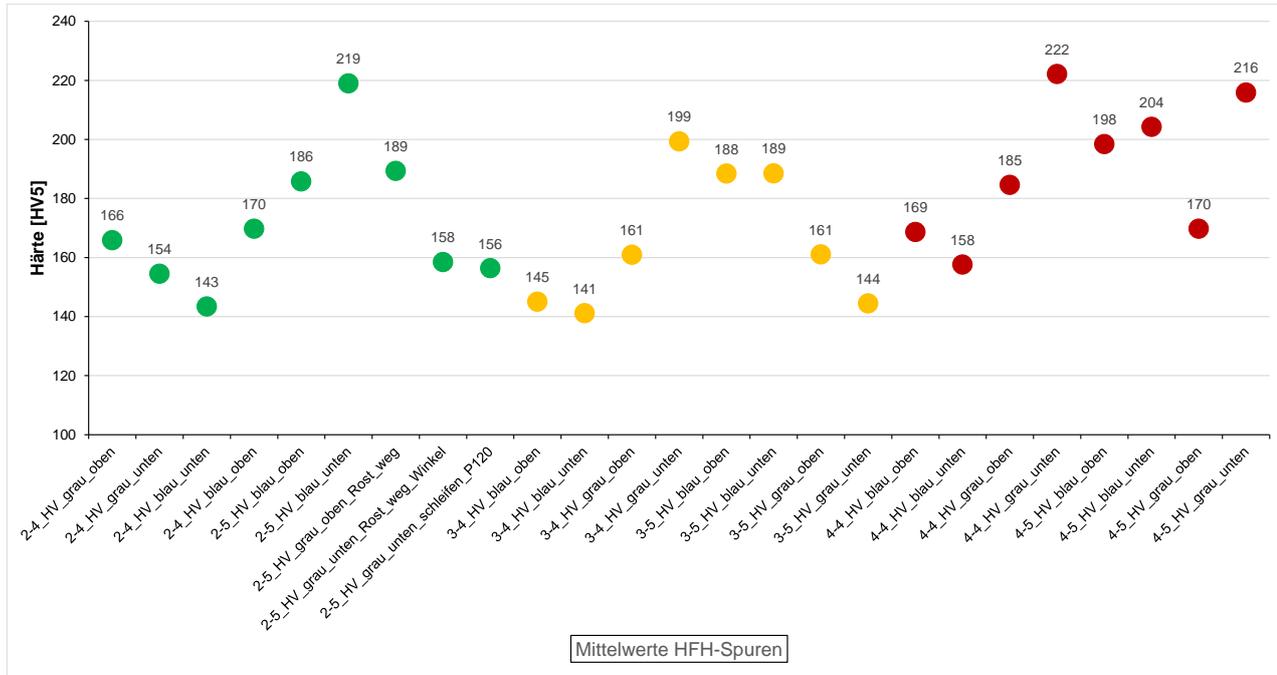


Abbildung 35: Mittelwerte der normal (ES 2/grün), gering (ES 3/gelb) und hoch (ES 4/rot) HFH-nachbehandelten Spuren

Bei der Interpretation der Messergebnisse der Härtemessungen muss berücksichtigt werden, dass einige der Mittelwerte der gering und normal HFH-nachbehandelten Spuren in Abbildung 35 und Abbildung 36 mit Werten von 141 und 143 HV5 unterhalb dem Gesamt-Mittelwert des Grundmaterials von 157 HV5 liegen, was nicht möglich ist. Wie in Abbildung 36 anhand der Box-Plot Diagramme zu sehen ist, streuen die Härtewerte in der Spur stärker. Das heißt, durch die Härtemessung in der Spur ist nur eine qualitative Bewertung möglich.

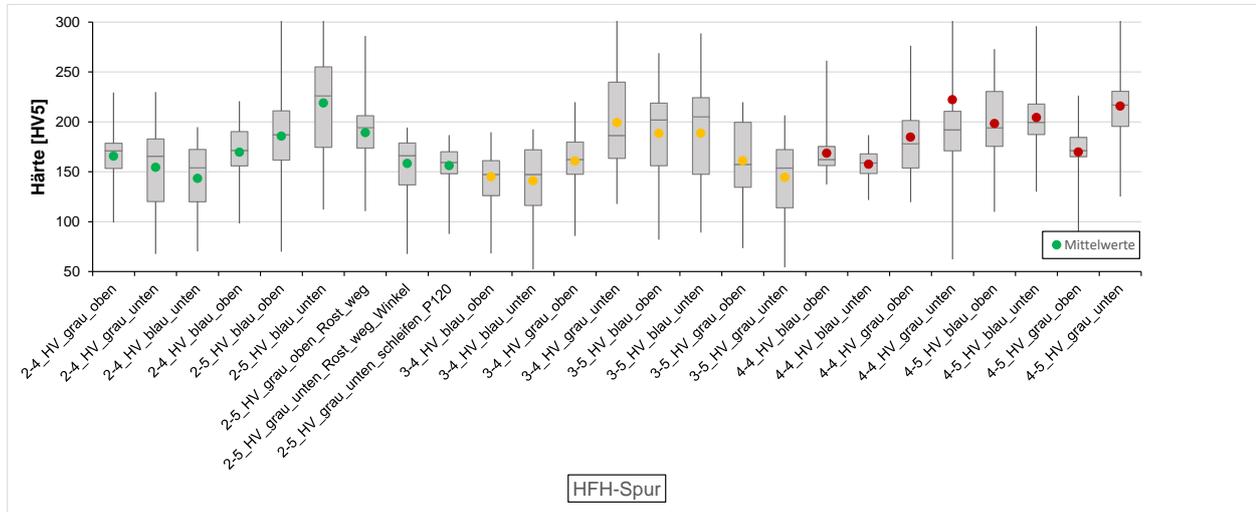


Abbildung 36: Mittelwerte und Box-Plot Auswertung der normal (ES 2/grün), gering (ES 3/gelb) und hoch (ES 4/rot) HFH-nachbehandelten Spuren

5.3 Korrelation Eigenspannungen und Härte

Da die Ergebnisse der Härtemessungen einen sehr großen Streubereich haben, kann dadurch nicht auf die Höhe der Druckeigenspannungen geschlossen werden. Die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der unterschiedlichen Intensitäten liegen auch nah beieinander. Aus den Ergebnissen der mobilen Härtemessungen und der Eigenspannungsmessungen kann daher keine Unterteilung in die verschiedenen HFH-Nachbehandlungsintensitäten, die sich nach der Nachbehandlungsdauer gering, normal und hoch orientieren, erfolgen und somit keine direkte Korrelation zwischen den Eigenspannungen und der Härte hergestellt werden.

6 Visuelle Prüfung, Eigenspannungs- und Härtemessungen (AP3)

6.1 Visuelle Prüfung

Um eine mögliche Korrelation zu ermitteln, wurden die Prüfkörper in AP3 visuell in Gruppen mit keiner, einer schwachen und einer starken Restkerbe unterteilt. Dabei wurde angenommen, dass im Bereich der Restkerbe wenig Druckeigenspannungen durch das Hämmern eingebracht wurden und somit auch keine Aufhärtung des Schweißnahtübergangs in diesen Bereichen stattgefunden hat.

Eine Übersicht über die unterschiedlich HFH-behandelten Schweißnahtübergänge und die Zuordnung der Restkerbenscharfe wird in Tabelle 10 gegeben.

Tabelle 10: Übersicht über Prüfkörper in AP3

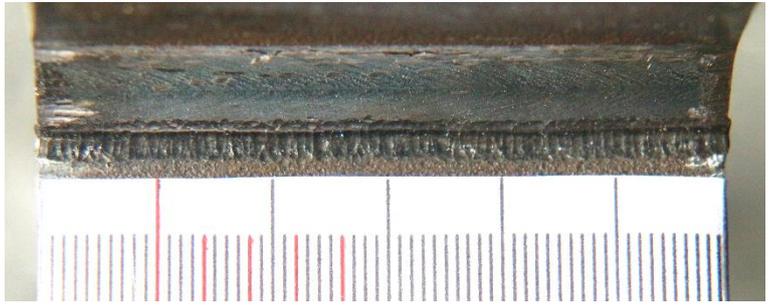
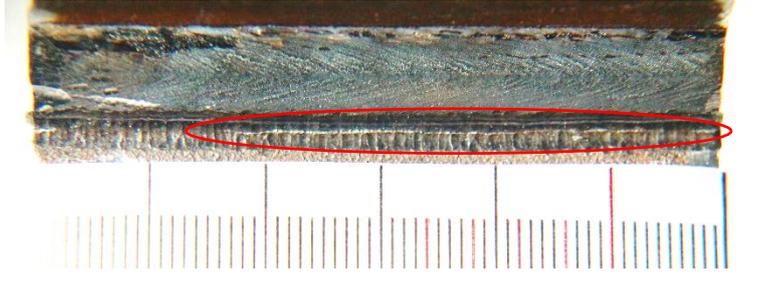
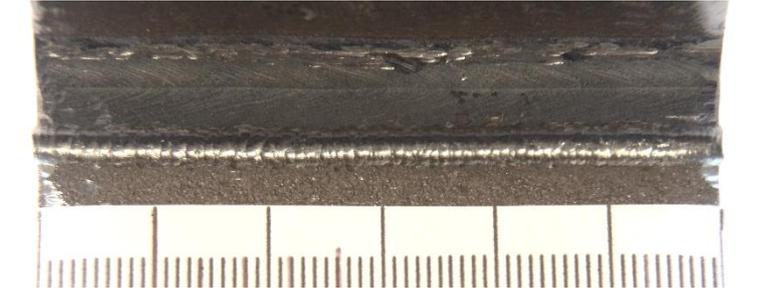
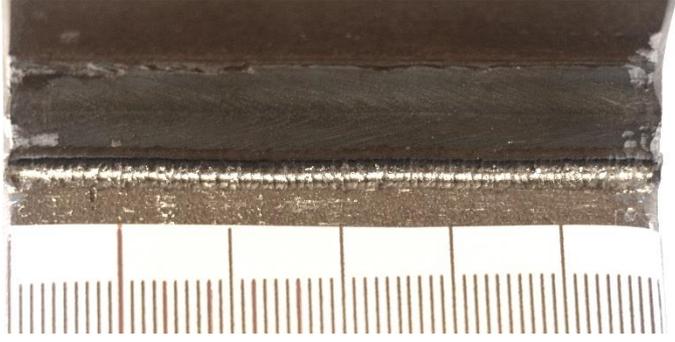
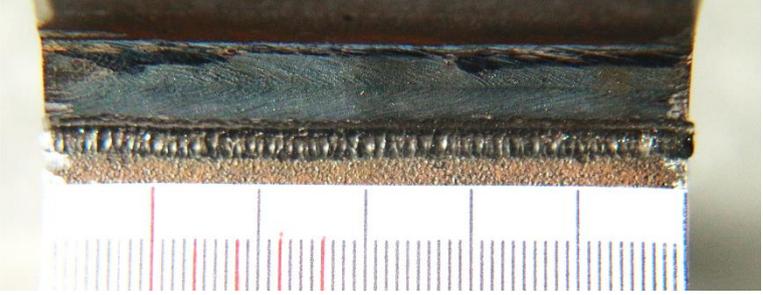
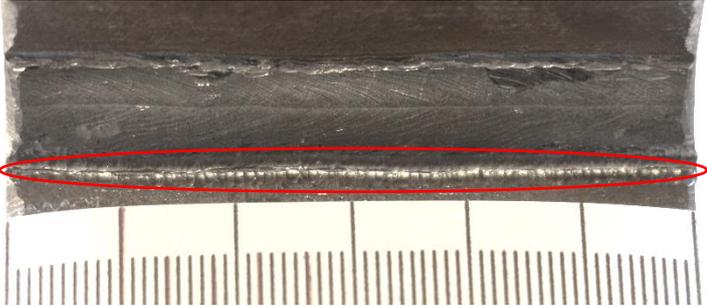
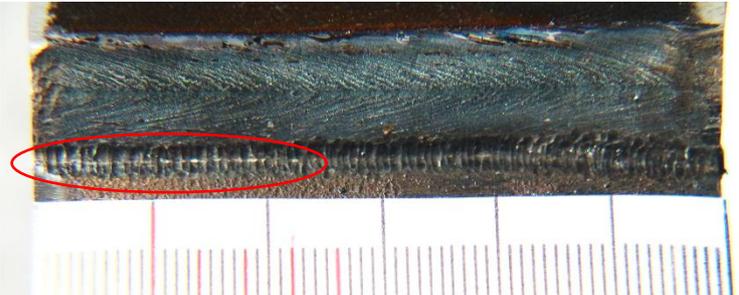
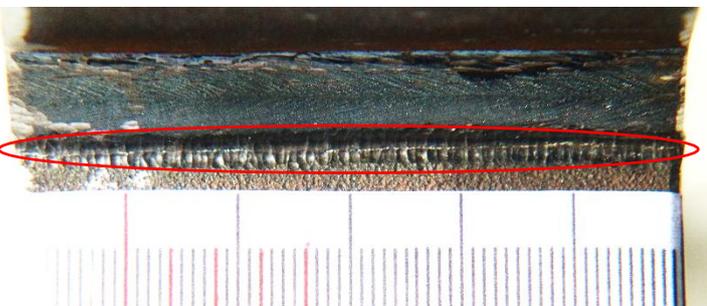
Ver- suchs- körper	Nach- behandlungs- intensität	Visuelle Prü- fung auf Restkerbe	
ES 2-3	normal	keine Rest- kerbe	
ES 2-6	normal	Restkerbe sichtbar	
ES 2-7	normal	keine Rest- kerbe	
ES 4-2	hoch	keine Rest- kerbe	

Tabelle 10 fortgesetzt: Übersicht über Prüfkörper in AP3

ES 4-3	hoch	keine Restkerbe	
ES 4-8	hoch	keine Restkerbe	
ES 3-1	gering	starke Restkerbe sichtbar	
ES 3-3	gering	leichte Restkerbe	
ES 3-6	gering	Restkerbe sichtbar	

In Tabelle 10 werden die Intensität der Nachbehandlung und die durch die visuelle Prüfung festgestellten Restkerben gegenübergestellt. Ziel ist daran eine mögliche Korrelation zu prüfen.

Anhand der visuellen Prüfung wird gezeigt, dass eine Unterteilung der Prüfkörper anhand ihrer Nachbehandlungsdauer in normal, gering und hoch nicht immer Rückschlüsse auf die Restkerbe geben kann. Normal nachbehandelte Prüfkörper können ebenfalls eine Restkerbe aufweisen und fallen somit theoretisch in den Bereich der gering nachbehandelten Prüfkörper, an denen eine Restkerbe durch die geringe Nachbehandlungsdauer sichtbar sein sollte. Wiederum gibt es jedoch auch gering nachbehandelte Prüfkörper, an denen keine Restkerbe sichtbar ist, da diese auch vor der Nachbehandlung nicht oder kaum vorhanden war.

6.2 Eigenspannungsmessungen

6.2.1 Allgemeines

Die Eigenspannungen wurden in AP3, entsprechend AP2, an Versuchskörpern, die nicht zuvor auf Ermüdung getestet wurden, gemessen, um die Messwerte des tatsächlich nach der HFH-Nachbehandlung eingebrachten Eigenspannungszustandes ohne Einfluss der Ermüdungsbeanspruchung in Form von Rissen o.ä. zu erhalten.

6.2.2 Durchführung der Eigenspannungsmessungen

Die Durchführung der Eigenspannungsmessungen erfolgte analog zu AP2 mittels Röntgendiffraktometrie durch die SLV Halle. Die Messpunkte an den Prüfkörpern variieren in ihrer Tiefe und Lage auf der Hammerspur entsprechend den Stellen repräsentativer Restkerbenausprägungen, während in AP2 die 5 Messpunkte von der Mitte des Schweißnahtübergangs gleichmäßig zu den Außenkanten der Quersteife entlang der gehämmerten Spur in einem Abstand von 4 mm angeordnet waren, was in Kapitel 5.1.2 in Abbildung 23 dargestellt ist, werden in AP3 die 5 Messpunkte gezielt in Bereichen ohne, mit einer schwachen und einer starken Restkerbe gesetzt. Die Messpunkte variieren je Versuchskörper und erfolgen zum Teil an der Oberfläche, in 0,1 und 0,2 mm Tiefe.

6.2.3 Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen des jeweiligen Versuchskörpers in Abhängigkeit der HFH-Nachbehandlungsqualität normal, gering und hoch in den verschiedenen Tiefen dargestellt.

Wie schon in Tabelle 10 gezeigt, spiegelt sich die mittlere Restkerbe des Prüfkörpers ES 2-6 auch in Abbildung 37 wider, da im Gegensatz zu den anderen beiden Prüfkörpern ES 2-3 und ES 2-7 im Bereich von Messpunkt 4 und Messpunkt 5 bei ES 2-6 keine Druckeigenspannungen mehr vorhanden sind. Die Druckeigenspannungen der Prüfkörper ohne sichtbare Restkerbe liegen an der Oberfläche in einem Bereich von -147 N/mm^2 bis -327 N/mm^2 .

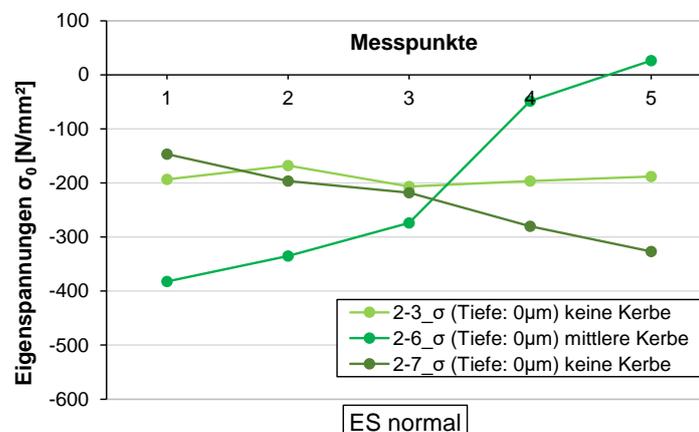


Abbildung 37: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für normal HFH-nachbehandelte Versuchskörper

Die Prüfkörper der hoch HFH-nachbehandelten Serie weisen nach Tabelle 10 keine sichtbare Restkerbe auf. Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, liegen die Eigenspannungen an der Oberfläche in einem Bereich von -120 N/mm² bis -326 N/mm².

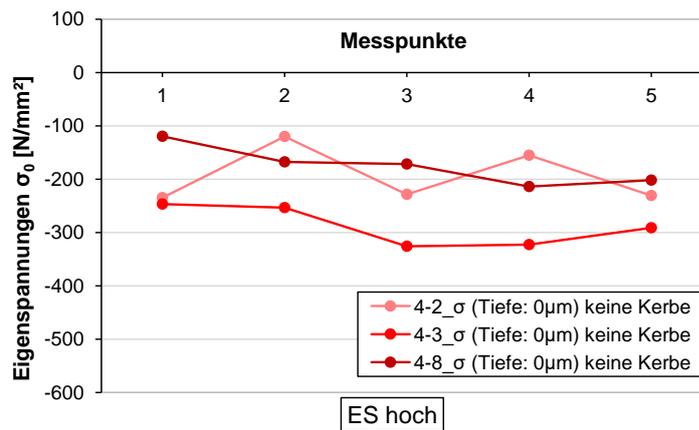


Abbildung 38: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für hoch HFH-nachbehandelte Versuchskörper

Nach Abbildung 39 ist die Korrelation von visueller Prüfung im Hinblick auf die Ausprägung der Restkerbe zu den Eigenspannungen für gering HFH-nachbehandelte Prüfkörper nur qualitativ festzustellen. Prüfkörper ES 3-1 mit der starken Restkerbe hat im Mittel größere Druckeigenspannungen als vergleichsweise ES 3-6 mit einer visuell geringeren Restkerbe. Bei ES 3-3 mit einer leichten Restkerbe sind im Vergleich zu den anderen beiden Prüfkörpern größere Druckeigenspannungen nachweisbar. Damit wird bestätigt, dass bei einer vorhandenen Restkerbe geringere Druckeigenspannungen im Material vorhanden sein können, die Höhe jedoch nur qualitativ bestimmt werden kann.

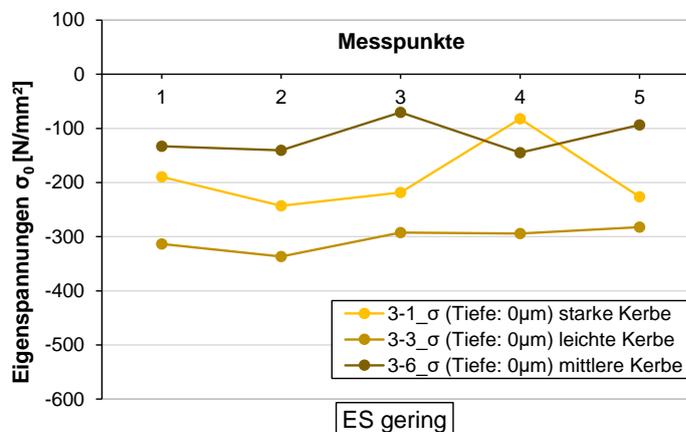


Abbildung 39: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für gering HFH-nachbehandelte Versuchskörper

Anhand der Eigenspannungsverläufe in Kapitel 5.1.3 hat sich gezeigt, dass die Druckeigenspannungen i.d.R. in der Schicht 100 µm unterhalb der Oberfläche größere Werte aufweisen als direkt an der Oberfläche in 0 µm. Insbesondere ist diese Verallgemeinerung für die gering HFH-nachbehandelten Proben mit vorhandener Restkerbe interessant. Zu diesem Zweck wurden auf jeder dieser vorher ausgewählten und kategorisierten Restkerbenbereiche die Messungen an 5 Punkten in den drei Ebenen 0 µm, 100 µm und 200 µm durchgeführt. Abbildung 40 zeigt die Eigenspannungsverläufe getrennt nach den drei unterschiedlichen Prüfkörpern ES3-1, ES3-3 und ES3-6.

Anhand der stärker gekerbten Spuren (ES3-1 und ES3-6) wird deutlich, dass selbst wenn direkt an der Oberfläche geringe Druckeigenspannungen herrschen, in den darunterliegenden Ebenen höhere Druckeigenspannungen vorhanden sind.

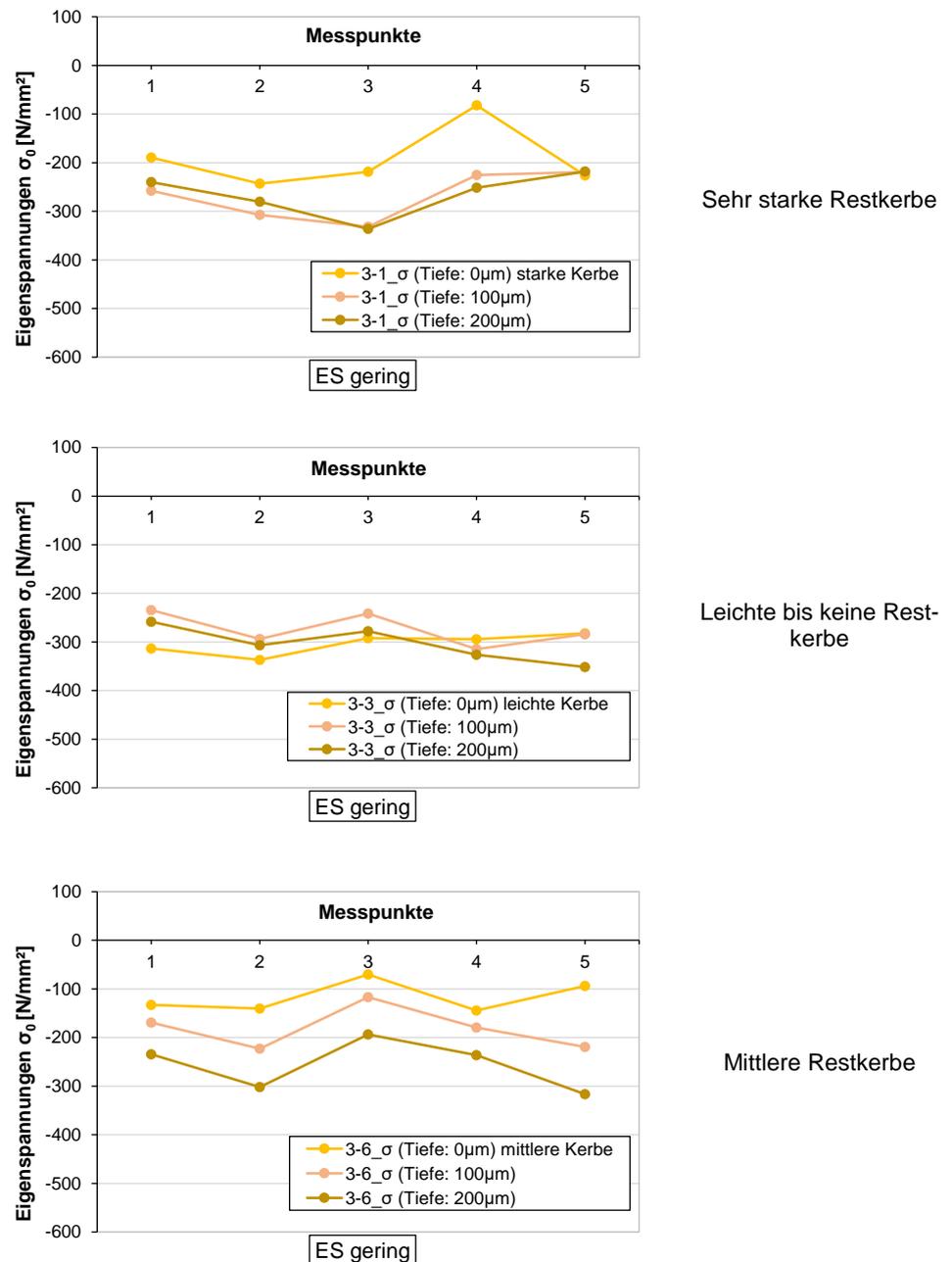


Abbildung 40: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hammerspur für gering HFH-nachbehandelte Versuchskörper in drei Ebenen

6.2.4 Zusammenfassung

Anhand der Eigenspannungsmessungen kann bestätigt werden, dass bei vorhandener Restkerbe geringere Druckeigenspannungen nachweisbar sind, jedoch keine Einteilung in Messwertbereiche erfolgen kann, da die Streuung zu groß ist und sich die Bereiche der verschiedenen Intensitäten normal, gering und hoch, sowie mit und ohne Restkerbe überlappen.

Wie in Abbildung 41 zu sehen ist, ist eine Unterteilung in die verschiedenen HFH-Nachbehandlungsbereiche normal (grün), gering (gelb) und hoch (rot) anhand der gemessenen Eigenspannungen an der Oberfläche nicht möglich. Die Behandlungsdauer lässt sich nicht anhand der Eigenspannungsverläufe zuordnen, da selbst bei normal HFH-nachbehandelten Prüfkörpern geringe Eigenspannungen erreicht wurden. Jedoch hat sich gezeigt,

dass der optische Abgleich mit der Feststellung und dem Vergleich von Restkerben hilfreich ist. Die Existenz von Restkerben jeglicher Stärke kann ein Indiz für ein zu gering eingebrachtes Maß an Eigenspannung sein.

Folgende Beobachtungen lassen sich zusammenfassen:

- Optisch erkennbare Restkerben können ein Indiz für geringe Druckeigenspannungen direkt an der Oberfläche sein.
- An Stellen geringer Druckeigenspannungen ab -100 N/mm^2 waren in allen Fällen mindestens mittlere Restkerben zu erkennen.
- Die Ausprägung der Restkerbengeometrie lässt nicht unbedingt Rückschlüsse auf die Quantität der Eigenspannungen zu.
- Selbst wenn geringe Druckeigenspannungen infolge unzureichender Nachbehandlung an der Bauteiloberfläche vorliegen, sind in $100 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$ Tiefe höhere Druckeigenspannungen zu finden.

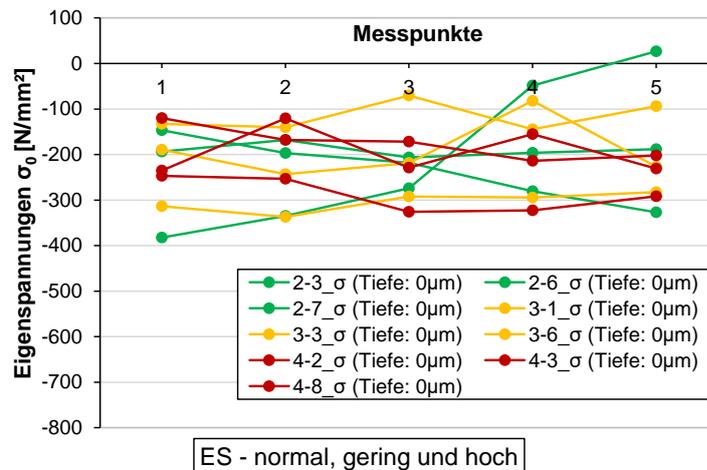


Abbildung 41: Vergleich der Eigenspannungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hämmerspur an der Oberfläche für normal (grün), gering (gelb) und hoch (rot) HFH-nachbehandelte Versuchskörper

In Abbildung 42 sind die Prüfkörper aus AP3 farblich in Abhängigkeit der Restkerbe dargestellt. In Grün sind die Spuren abgebildet, die keine sichtbare Restkerbe haben, dabei liegen die Druckeigenspannungen in einem Bereich von ca. -120 N/mm^2 bis -320 N/mm^2 . Dagegen sind in Rot die Spuren zu sehen, auf denen eine Restkerbe erkennbar ist; je dunkler die Spur in Rot dargestellt, desto stärker ist die Restkerbe. Dabei werden Druckeigenspannungswerte in sehr niedrigen Bereichen, bis hin zu Bereichen ohne Druckeigenspannungen erreicht.

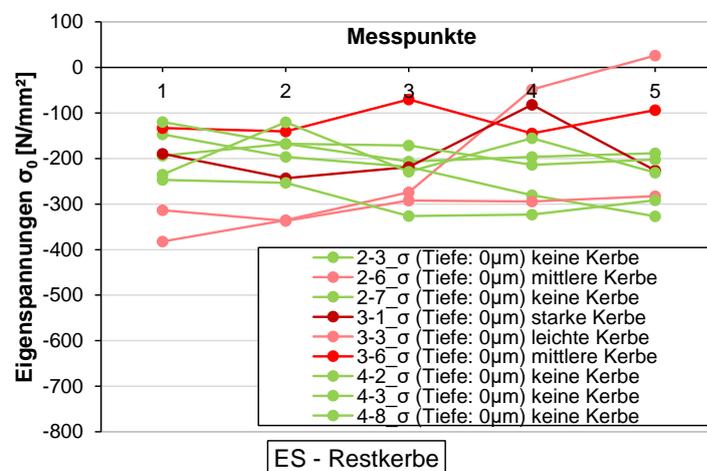


Abbildung 42: Vergleich der Eigenspannungen der Einzelmesspunkte (1-5) entlang der Hämmerspur an der Oberfläche für HFH-nachbehandelte Versuchskörper in Abhängigkeit von der Restkerbe

Daraus kann gefolgert werden, dass eine visuelle Prüfung für die Beurteilung der Qualität der Nachbehandlung entscheidend ist. Ist keine Restkerbe sichtbar, kann davon ausgegangen werden, dass Druckeigenspannungen in derselben Höhe vorhanden sind wie bei einer normal und hoch HFH-nachbehandelten Spur.

6.3 Härtemessungen

6.3.1 Allgemeines und Durchführung der Härtemessungen

Die Durchführung der Härtemessungen erfolgte analog zu AP2 mit jeweils 2 Versuchskörpern pro Intensität. Es wurde pro Versuchskörper jeweils an 2 Spuren die Härte gemessen. An den gleichen Versuchskörpern wurden auf einer Spur bereits zuvor die Eigenspannungsmessungen (AP3) durchgeführt.

6.3.2 Ergebnisse der Härtemessungen

Als Referenz zu den Härtemessungen am Schweißnahtübergang wurden analog zu AP2 zusätzliche Härtemessungen am Grundmaterial gemacht. Die Mittelwerte sind in Abbildung 43 dargestellt und streuen in einem Bereich von 136 bis 175 HV5 um den Gesamtmittelwert von 152 HV5.

Vergleicht man diese Werte mit den Ergebnissen vom Grundmaterial aus AP2, bestätigt sich die Zuverlässigkeit der mobilen Härtemessung, da der Streubereich in AP2 mit 131 bis 192 HV5 und einem Gesamtmittelwert von 157 HV5, vgl. Abbildung 34, ähnlich zu den Werten der Messungen in AP3 ist.

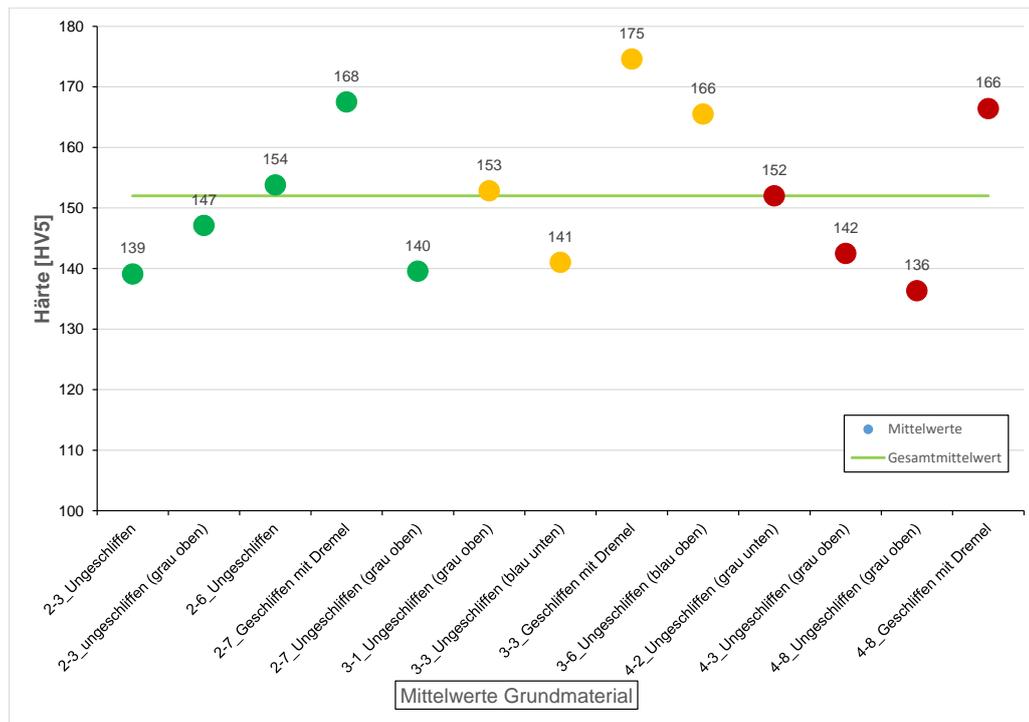


Abbildung 43: Mittelwerte von Härtemessungen am Grundmaterial (unbehandelt) S235

Ähnlich zu den Erkenntnissen aus den Eigenspannungsmessungen, bestätigt sich auch im Rahmen der Härtemessung in Abbildung 44, dass eine Zuordnung der verschiedenen HFH-Nachbehandlungsstufen normal (grün), gering (gelb) und hoch (rot) anhand der Mittelwerte der mobil gemessenen Härtewerte nicht möglich ist.

Des Weiteren ist auch in AP3 wie in AP2 auffällig, dass einige Mittelwerte der HFH-nachbehandelten Spur unterhalb des am jeweiligen Prüfstück gemessenen Grundwerkstoffmittelwerts liegen. Dies deutet auf Härtewerte, die eventuell aufgrund ihrer Eindringgeometrie oder Lage, nahe der Restkerbe oder auf einem Peak der Hämmerspur, nicht gewertet werden sollten.

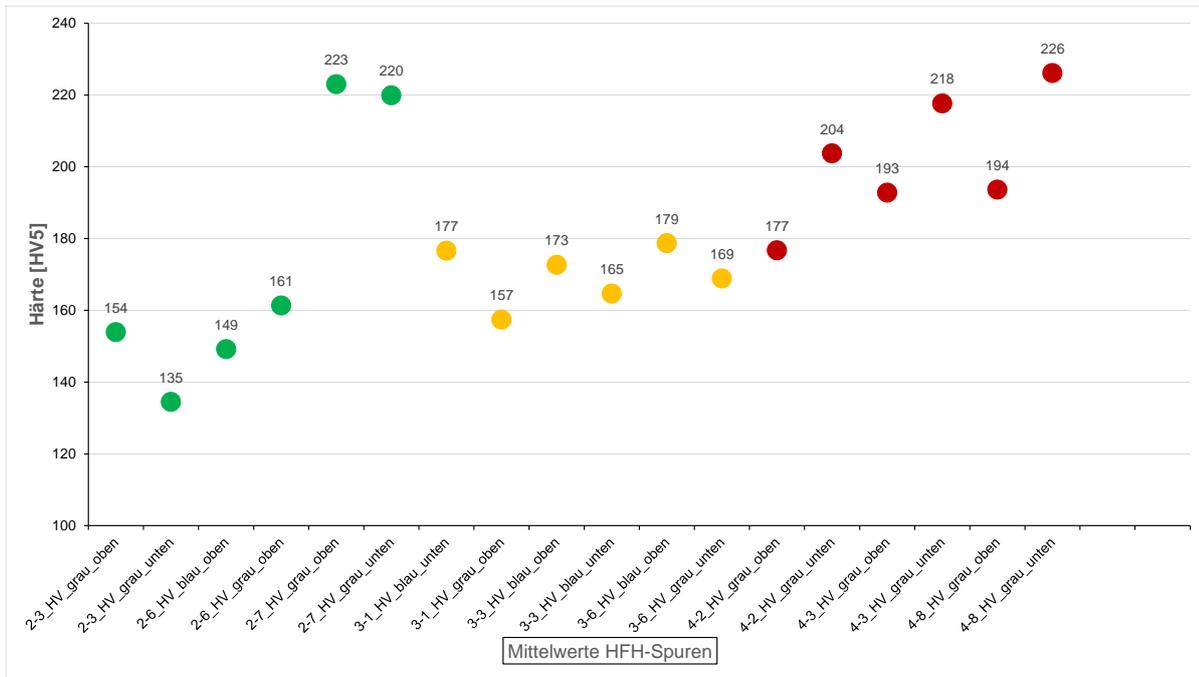


Abbildung 44: Mittelwerte der Härtemessungen der normal (grün), gering (gelb) und hoch (rot) HFH-nachbehandelten Spuren

In Abbildung 45 werden Box-Plot Diagramme der Härtemessungen in Abhängigkeit der Restkerbe dargestellt. Es ist die Tendenz erkennbar, dass bei HFH-nachbehandelten Spuren ohne Restkerbe (grün) die Härtebereiche und insbesondere die Mittelwerte in einem höheren Bereich liegen als bei Spuren mit Restkerben (rot). Allerdings kann auch an diesen Spuren keine klare Korrelation zwischen visuell festgestellten Restkerben und gemessenen Härtebereichen bestimmt werden, da zum einen mit dem Prüfkörper ES 2-3 ein Ausreißer für Versuchskörper ohne Restkerbe gegeben ist und sich zum anderen die Härtebereiche überlappen.

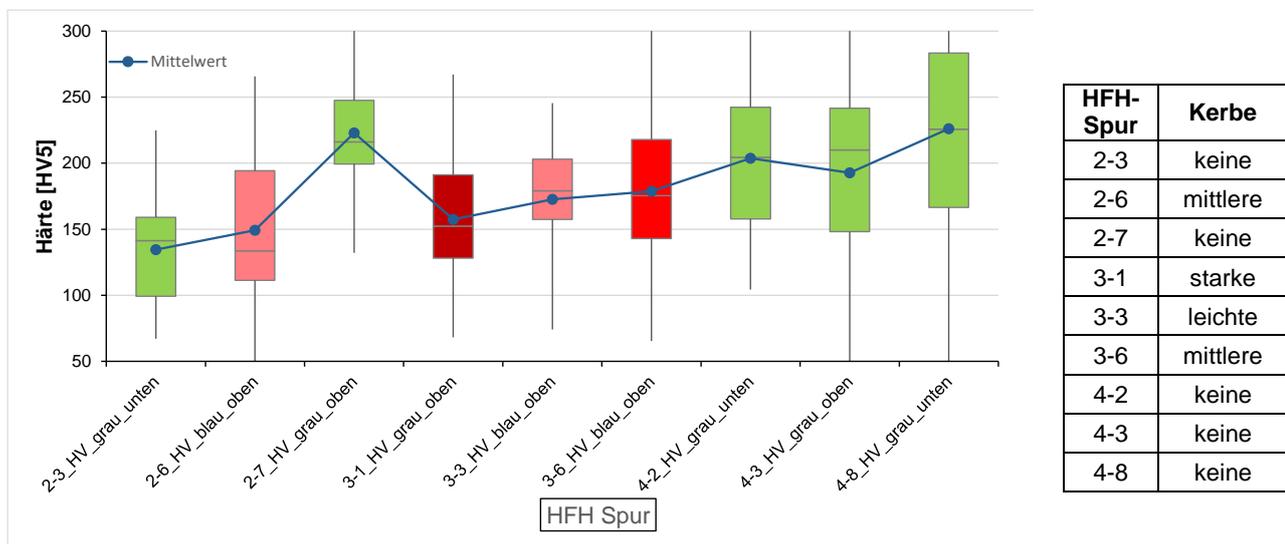


Abbildung 45: Vergleich der Härtemessungen für HFH-nachbehandelte Versuchskörper in Abhängigkeit der Restkerbe

6.3.3 Zusammenfassung

Wie bereits bei den Eigenspannungsmessungen in AP3 gezeigt wurde, dass im Bereich der visuell festgestellten Restkerbe geringe bis keine Druckeigenspannungen vorhanden sind, wird dies auch bei den Härtemessungen durch geringere Härtewerte im Bereich der Restkerben bestätigt. Es ist damit keine klare Korrelation, sondern nur eine Tendenz zwischen visuell festgestellter Restkerbe und Härte erkennbar. Damit ist die Korrelation zwischen Härte und visuell festgestellter Restkerbe ähnlich wie die Korrelation zwischen Eigenspannungen und visuell festgestellter Kerbe.

Eine klare Abgrenzung und Sicherung der Qualität durch Grenzhärtebereiche ist jedoch nicht möglich. Im Gegensatz dazu bietet die visuelle Prüfung die Möglichkeit der Identifizierung von Restkerben und damit verbunden die Vorhersage von wahrscheinlich geringeren Druckeigenspannungen in den Bereichen der Kerbe.

6.4 Übersicht über Eigenspannungen und Härte in Abhängigkeit von der Restkerbe

Im Folgenden werden Eigenspannungs- und Härtemessungen in den Diagrammen in Abbildung 46 bis Abbildung 48 direkt gegenübergestellt. Es wurden jeweils an 5 Punkten pro Spur die Eigenspannungen gemessen, diese sind in Blau an der Stelle, an der die Messung am Prüfkörper erfolgte, dargestellt. Die Härte wurde über die komplette Länge der Spur gemessen, dabei wurden pro Schweißnahtübergang ca. 45 Messpunkte aufgenommen. Bei vorhandener Restkerbe wird diese im Diagramm in Rot ergänzt, um deren Lage auf der Hammerspur in Längsrichtung abzubilden, vgl. Tabelle 10.

In Abbildung 46 ist der Vergleich der normal HFH-nachbehandelten Prüfkörper zu sehen. Bei Prüfkörper ES 2-3 ist visuell keine Restkerbe feststellbar, die Eigenspannungen liegen in einem Bereich von ca. -200 N/mm^2 , jedoch sind die Härtewerte verglichen mit Prüfkörper ES 2-7 geringer, an welchem auch visuell keine Restkerbe feststellbar war und an welchem die Eigenspannungen über -150 N/mm^2 liegen. Beim Prüfkörper ES 2-6, an welchem visuell eine mittlere Restkerbe feststellbar war, liegen vergleichsweise geringere Härtewerte mit einem großen Streubereich vor, der sich auch in den Eigenspannungen widerspiegelt, da an 2 Messpunkten kaum Druckeigenspannungen messbar waren.

Bei den normal HFH-nachbehandelten Prüfkörpern ist kein direkter Zusammenhang zwischen hohen Härtewerten und hohen Eigenspannungswerten erkennbar, jedoch kann tendenziell festgestellt werden, dass bei einer visuell festgestellten Restkerbe wenig bis kaum Druckeigenspannungen vorhanden sein können.

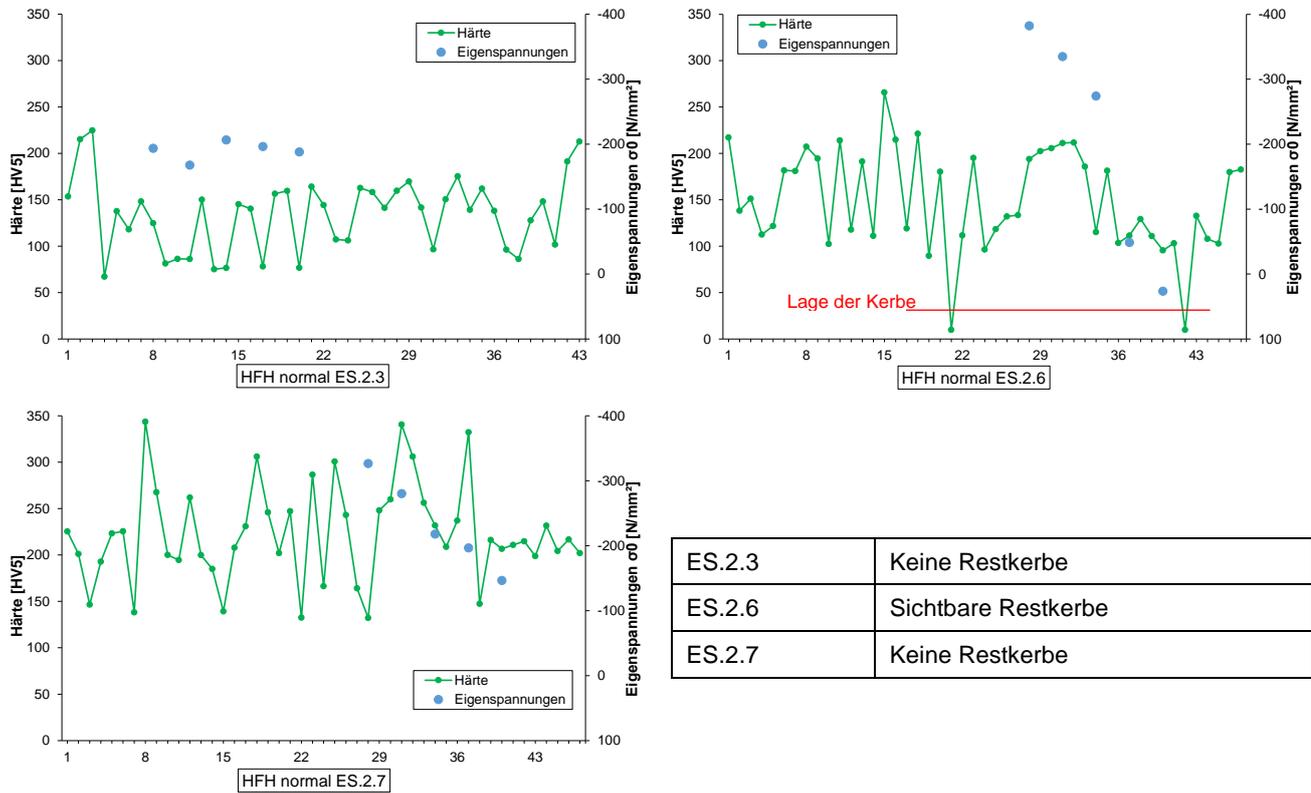


Abbildung 46: Vergleich der Härte- und Eigenspannungsmessungen für normal HFH-nachbehandelte Versuchskörper

In Abbildung 47 ist der Vergleich der gering HFH-nachbehandelten Prüfkörper dargestellt. Bei einer sichtbaren Restkerbe, die mit einer mittleren bis großen Restkerbenschärfe ausgebildet ist, sind auch Druckeigenspannungen feststellbar, welche kleiner als -100 N/mm^2 sind. Die Härtewerte liegen tendenziell bei vorhandener Restkerbe etwas geringer, allerdings ist aufgrund der großen Streuung der Härtemessung kein direkter Zusammenhang zwischen Härte und Eigenspannungen messbar.

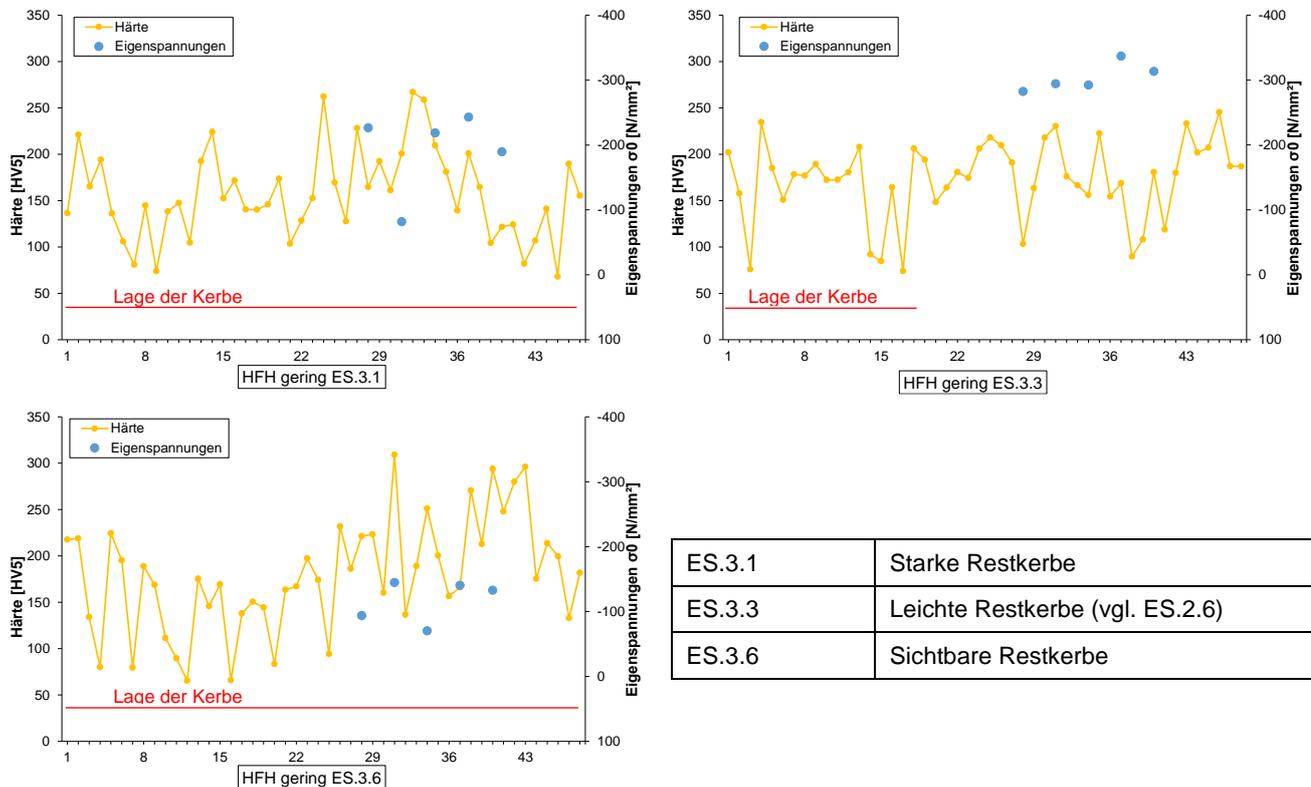


Abbildung 47: Vergleich der Härte- und Eigenspannungsmessungen für gering HFH-nachbehandelte Versuchskörper

In Abbildung 48 ist der Vergleich der hoch HFH-nachbehandelten Prüfkörper abgebildet. An allen Prüfkörpern sind keine Restkerben sichtbar. Die Härte- und Eigenspannungswerte haben einen großen Streubereich, welcher tendenziell im Vergleich zu gering HFH-nachbehandelten Prüfkörpern höhere Eigenspannungs- und Härtewerte vorweist. Eine direkte Korrelation zwischen der Härte und den Eigenspannungen ist auch bei dieser Nachbehandlungsserie nicht feststellbar.

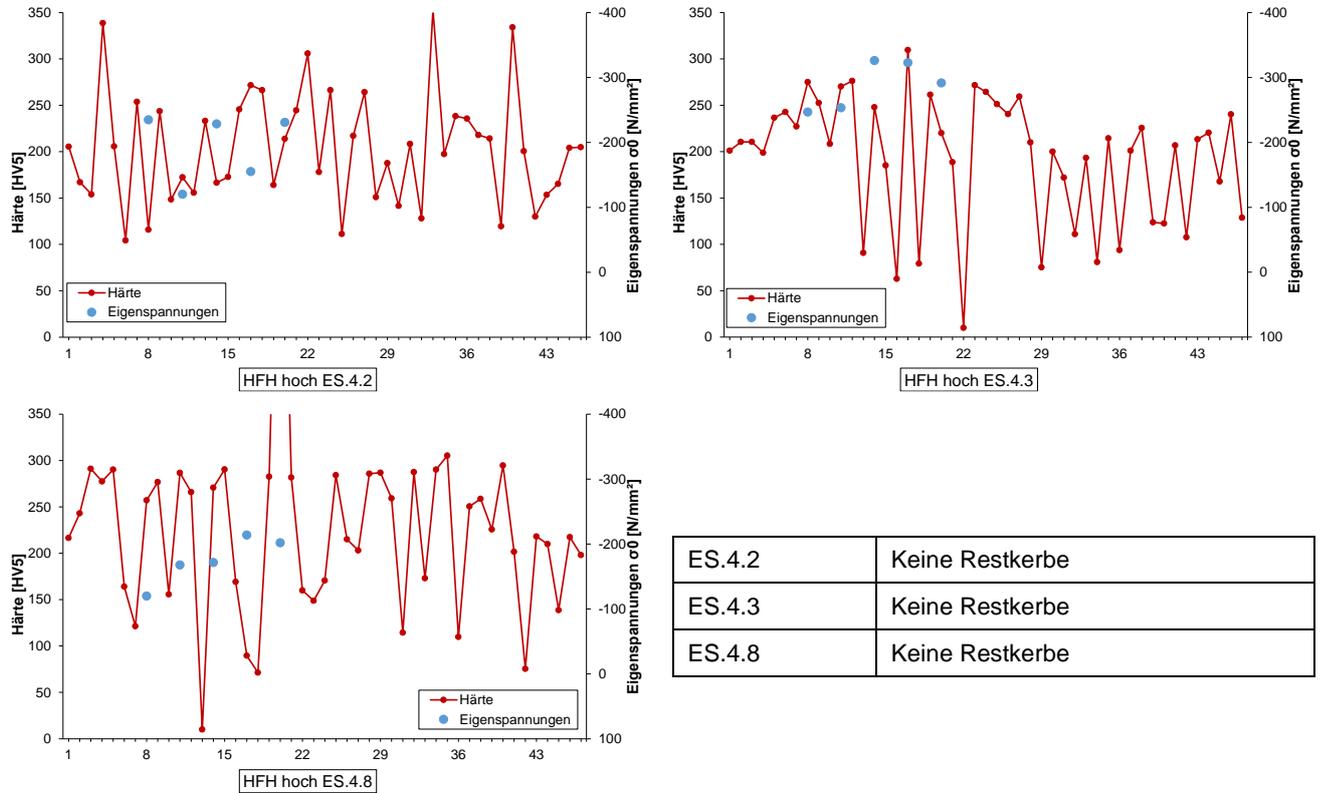


Abbildung 48: Vergleich der Härte- und Eigenspannungsmessungen für hoch HFH-nachbehandelte Versuchskörper

Durch die direkte Gegenüberstellung der Eigenspannungs- und Härtemessung kann die Tendenz, dass ohne visuell festgestellte Restkerbe die Nachbehandlungsqualität der Hämmerspur gesichert werden kann, da zum einen Druckeigenspannungen über -100 N/mm^2 als auch vergleichsweise qualitativ höhere Härtewerte vorhanden sind, bestätigt werden.

7 Silikonabdrücke

In der Literatur zu HFH-behandelten Schweißnähten sind zahlreiche geometrische Parameter zur Bestimmung der Eindruckgeometrie einer Behandlungsspur untersucht und dokumentiert worden. Darunter die Eindrucktiefen A und B, wie in Abbildung 50 zu sehen ist. A beschreibt dabei die Tiefe des Gesamteindrucks der Hämmer-spur, B bezeichnet den Eindruck am Basisblech.

Die Mehrzahl der vorhergehenden Untersuchungen wurde allerdings an optimal HFH-behandelten Hämmer-spuren vorgenommen. Es wurde mittels der Erfassung der Eindruckgeometrie in den 2000er-Jahren die Wirksamkeit verschiedener Pingeometrien unterschiedlicher Verfahren überprüft, siehe Weich [16].

Im Gegensatz dazu sollen die dargestellten Untersuchungen zeigen, inwieweit die HFH-Nachbehandlungsqualität, beeinflusst durch den Anwender anhand der Nachbehandlungsdauer, die Geometrie der Hämmer-spur verändert.

Umgehend vor und nach der PIT-Nachbehandlung wurden dazu Abdrücke der Schweißnahtübergänge durch Silikonabformmasse produziert. Dafür wurden 13 Versuchskörper in den drei unterschiedlichen Nachbehandlungsqualitäten ausgewählt. Abbildung 49 zeigt die Herstellung der Silikonabdrücke, dabei wurden die Abdrücke, die vor der HFH-Behandlung gemacht wurden, rot eingefärbt, die Silikonabdrücke nach der HFH-Behandlung, blau eingefärbt, um diese voneinander unterscheiden zu können.

Anschließend wurden die 60°mm langen Abdrücke der Spur in sechs 10 mm lange Stücke geschnitten, so dass die Eindrücke entsprechend Abbildung 50 alle 10 mm erfasst und die Eindrucktiefen A und B sowie die Lage und Größe der Restkerbentiefe k ermittelt werden können, siehe Breunig [1].

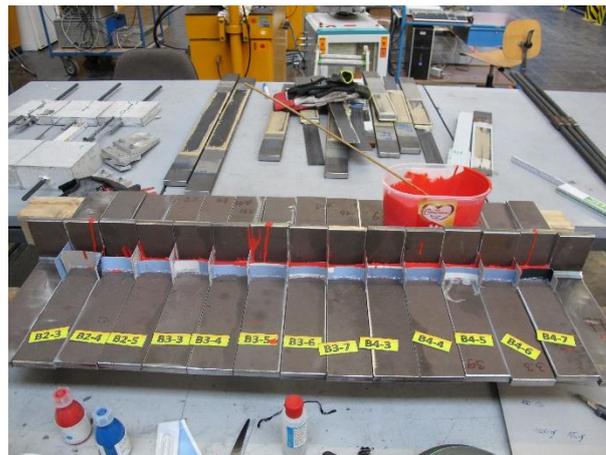


Abbildung 49: Dokumentation der Anfertigung der Silikonabdrücke

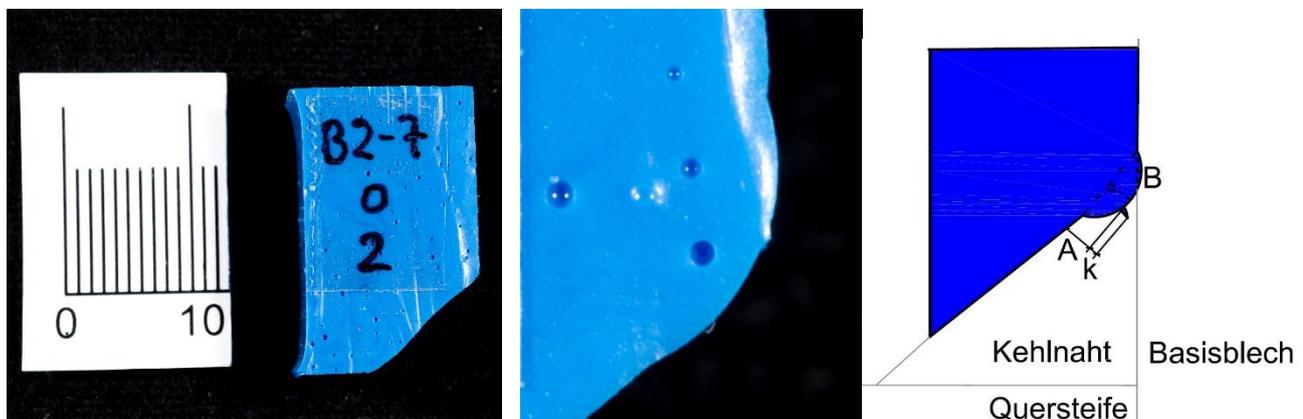


Abbildung 50: Scan einzelner 10 mm dicker Silikonscheiben im Querschnitt zur Vermessung von A, B und k [1]

Die Auswertung der mit AutoCAD bestimmten Eindruckgeometrien ist in Abbildung 51 in Abhängigkeit der Nachbehandlungsqualität dargestellt. Im Mittel liegen die Ergebnisse der Eindringtiefe A für die jeweiligen Qualitäten bei 0,62 mm für gering, 0,64 mm für normal und 0,76 mm bei hoch HFH-nachbehandelter Qualität.

Es zeigt sich, dass lediglich die Nachbehandlungsqualität „hoch“ anhand der Eindringtiefen hervorsticht, da sie im Mittel ca. 20% größer ist, als für die sehr nah beieinander liegenden Werte von gering und normal nachbehandelten Spuren. Aufgrund der Versuchsergebnisse der Ermüdungsversuche und Eigenspannungsmessungen ist keine Unterscheidung zwischen normal und hoch behandelter Qualität erforderlich, da es nicht zu abweichenden Ergebnissen kam.

Der Eindruckparameter B ist aus Sicht der Autoren wenig aussagekräftig, da dieser Wert aufgrund der geringen Größe schlechter anhand der Scans zu erfassen ist und bei der geringen Größe des Parameters ein Messfehler einen größeren Einfluss auf die Auswertung hat als bei den deutlich besser zu messenden Wert A.

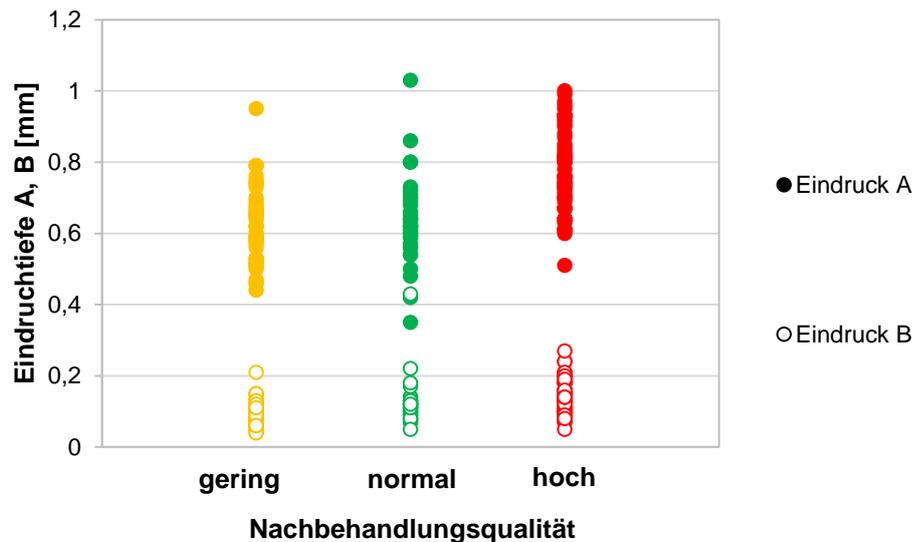


Abbildung 51: Eindringtiefen A und B in Abhängigkeit der Nachbehandlungsqualität

Die Aussagekraft des Pineindrucks kann für weitere HFH-Verfahren von Interesse sein, im Fall der PIT-Nachbehandlung ist die Ausprägung des Pineindrucks nicht mit der Nachbehandlungsqualität verknüpft.

Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse und Bezug zu den weiteren Untersuchungen kann Breunig [1] entnommen werden.

8 Zusammenfassung

8.1 Zusammenfassung der Untersuchungen

Ziel der Untersuchungen war es, in einem ersten Schritt die Auswirkungen unterschiedlicher PIT-Nachbehandlungsqualitäten auf die Ermüdungsfestigkeit zu identifizieren.

Im weiteren Verlauf sollte geklärt werden, ob das mobile Härtemessverfahren UCI grundsätzlich geeignet ist, mithilfe von Oberflächenmessungen unmittelbar in der Hammerspur eine vom Optimum abweichende Behandlungsqualität zu identifizieren.

Anhand des Versuchsprogramms von 30 Ermüdungsversuchen konnte kein signifikanter Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit zwischen den unterschiedlich nachbehandelten Serien festgestellt werden. Die durch PIT-Anwendung [8] gesteigerte Ermüdungsfestigkeit am Detail der unbelasteten Quersteife scheint also grundsätzlich wenig empfindlich auf unterschiedliche Nachbehandlungsqualitäten zu reagieren. Als Kriterium für die Qualität der Ausführung der Nachbehandlung wurde die Behandlungsdauer gewählt.

Eigen Spannungsmessungen in Hammerspuren unterschiedlicher PIT-Nachbehandlungsdauer haben gezeigt, dass sich die Druckeigenspannungsverläufe von normal und hoch-behandelten Schweißnahtübergängen gleichen. Dagegen waren die Messwerte bei einem gering HFH-behandelten Schweißnahtübergang zum Teil geringer. Dies ist in Hinblick auf die Ergebnisse der Ermüdungsversuche mit geringer HFH-Behandlung, wo sich keine abmindernde Tendenz zeigte, überraschend. Ein Grund hierfür könnte sein, dass zwar durch eine schlechte PIT-Nachbehandlung direkt an der Oberfläche geringe Druckeigenspannungen vorliegen. Direkt in 0,1 mm Tiefe darunter jedoch bereits größere Druckeigenspannungen vorhanden sind.

Mithilfe optischer Vergleiche der PIT-nachbehandelten Übergänge konnten vor allem bei den gering HFH-nachbehandelten und in einigen Fällen bei den normal-HFH-behandelten Schweißnahtübergängen Restkerben entsprechend Abbildung 52 unterschiedlicher Ausprägung identifiziert werden. Eigen Spannungsmessungen an der Oberfläche an den Prüfkörpern mit Restkerben, die zuvor kategorisiert wurden in „keine Kerbe“, „leichte Kerbe“, „mittlere Kerbe“ und „starke Kerbe“, zeigten zwar, dass die Ausprägung der Kerbe nicht direkt mit den Eigen spannungen korreliert. Allerdings konnte bei den Kategorien starke und mittlere Kerbe ein verringerter Druckeigen Spannungszustand an der Oberfläche gegenüber den anderen Kategorien festgestellt werden.

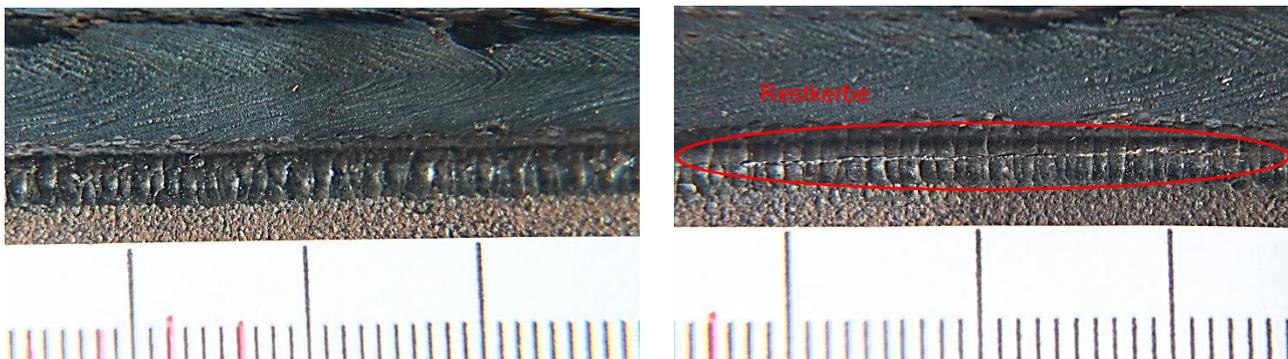


Abbildung 52: Hoher (links ohne Restkerbe) und geringer (rechts mit Restkerbe) HFH-nachbehandelter Schweißnahtübergang

Der Ansatz, die Qualitätsidentifizierung beim PIT-Verfahren über UCI-Härtemessungen unmittelbar auf der Hammerspur durchzuführen, hat sich im Laufe der Untersuchungen und mit Auswertung in Abschnitt 6.3.2 als wenig geeignet herausgestellt. Die Härtebereiche der unterschiedlichen Nachbehandlungsqualitäten unterscheiden sich nicht eindeutig voneinander, was auch zu den Ergebnissen der Kurzstudie [15] am PIT-behandelten Grundwerkstoff passt. Die in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse zu den mobilen Härtemessungen für das PIT-Verfahren können aufgrund der Ergebnisse in [15] nicht auf das HiFIT-Verfahren abgeleitet werden, da dieses evtl. andere Ergebnisse liefern könnte.

8.2 Vorschlag zur Bewertung der Hammerspur

Aus Sicht der Autoren ist es auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen ausreichend, eine PIT-nachbehandelte Hammerspur am Bauteil zu 100% optisch unter Umständen mithilfe von Musterstücken zu beurteilen und ggf. zu dokumentieren. Hierzu sind Fotos der Hammerspur, aber auch das Anfertigen von Silikonabdrücken geeignet.

Sollten Restkerben in jeglicher Art (siehe Tabelle 10) bei der 100%igen visuellen Prüfung entdeckt werden, muss an diesen Stellen nochmals PIT-nachbehandelt werden, bis keine Restkerbe mehr sichtbar ist. Da keine negativen Auswirkungen einer zu hohen HFH-Nachbehandlung sowohl durch die Eigenspannungsmessungen als auch durch die Ermüdungsversuche belegt werden konnten, ist die Gefahr einer Überbehandlung nicht gegeben.

In der Praxis ergeben sich gegenüber den hier durchgeführten Kleinbauteilversuchen mit geradlinig verlaufenden, automatisch geschweißten Kehlnähten Situationen und Stellen, die schwerer für die PIT-Behandlung zugänglich sind, so dass es in der Praxis sinnvoll ist, diesen Stellen besondere Beachtung zu schenken. Ein Beispiel hierfür ist der Anschluss einer eingepassten Quersteife an einen geschweißten Träger an der Halskehlnaht.

Abbildung 53 zeigt eine verbleibende Restkerbe im Bereich der angeschweißten, eingepassten Quersteife nahe des Ausrundungsradius eines gewalzten Versuchsträgers aus dem DAST-Projekt [9]. Zwar handelt es sich bei der verbleibenden Restkerbe um eine mit HiFIT-nachbehandelte Spur, jedoch hat sich auch bei den mit PIT-behandelten Trägern gezeigt, dass dieser Bereich aufgrund behinderter Zugänglichkeit Restkerben aufwies.



Abbildung 53: HFH-Nachbehandlung an Halskehlnaht

8.3 Ausblick

Die HFH-Nachbehandlungsqualitäten wurden durch Untersuchungen am Detail der unbelasteten Quersteife abgesichert. Es wäre interessant, den Effekt der Nachbehandlung auch bei komplexeren Details zu untersuchen.

Wie abgeschlossene Forschungsprojekte zeigen, ist die Effektivität der höherfrequenten Hämmerverfahren von der Stahlsorte abhängig. Je höherfester der Stahl, desto effektiver ist die Nachbehandlung. Da sich die Untersuchungen zur Qualitätssicherung auf den normalfesten Stahl S235JR+N beziehen, sind die Ergebnisse im Prinzip auf höherfeste Stähle übertragbar. Es stellt sich die Frage, ob der größere Effekt der Nachbehandlung bei höheren Stahlsorten im Rahmen von Eigenspannungs- und mobilen Härtemessungen quantifizierbar ist.

Des Weiteren könnten neben dem in diesem Projekt angewandte HFH-Nachbehandlungsverfahren PIT weitere Verfahren zur Nachbehandlung untersucht werden. Dabei ist zu prüfen, ob die Möglichkeit bei anderen Nachbehandlungsverfahren besteht, Grenzhärtebereiche mit dem mobilen Härtemessverfahren UCI zu ermitteln und dadurch die Nachbehandlung auch quantitativ zu bewerten. Untersuchungen im Zuge der FOSTA-Kurzstudie [15] haben gezeigt, dass sich die HFH-Verfahren HiFIT und PIT hinsichtlich der Härtewerte unterscheiden. So

konnte sich durch stationäre Härtemessungen auf dem HiFIT-behandelten Grundwerkstoff unterschiedliche Intensität feststellen lassen, siehe auch Abschnitt 2.1.

Grundsätzlich ist der Großteil der Untersuchungen in Hinsicht auf Neubauten erfolgt. Der Einsatz und die Qualitätssicherung für die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von bestehenden Bauten ist ein besonders interessantes Anwendungsgebiet, das große Bedeutung gewinnen könnte. Hier kommt der Feststellung der Vorschädigung eine besondere Rolle zu. Erste Stichprobenuntersuchungen [10] lassen weitere Forschung sinnvoll erscheinen.

9 Danksagung

Das Forschungsprojekt „Untersuchungen zur Auswirkung variierender Ausführungsqualitäten einer HFH-Nachbehandlung und Beurteilung einfacher Methoden zur Überprüfung der Nachbehandlungsspur“ wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau finanziert. Wir danken für diese Unterstützung und die Betreuung während des Projekts.

Ein besonderer Dank für die Spenden gilt der PITEC Deutschland GmbH für die HFH-Nachbehandlung der Versuchskörper und der NewSonic GmbH für die Möglichkeit der Durchführung und Begleitung der mobilen Härtemessungen.

Für die problemlose Zusammenarbeit mit der SLV Halle bei der Durchführung der Eigenspannungsmessungen bedanken wir uns herzlich, ebenso wie bei der Abteilung für Baukonstruktionen und Bauteilprüfung der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart für die reibungslose Durchführung der Ermüdungsversuche.

Der Firma Schachtbau Nordhausen danken wir für die kurzfristige Prüfkörperfertigung und die freundliche Betreuung.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Baaten, T., Maas, F., Vanrostenberghe, S.: Improvement of welded structures fatigue life in high strength steel grades (DURIMPROVE), 2014.
- [2] Breunig, S.: Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten und Ihrer Nachbehandlung im Brückenbau, Dissertation, in Vorbereitung.
- [3] DIN 50159-1:2015-01: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach dem UCI-Verfahren – Teil 1: Prüfverfahren.
- [4] DIN 50159-2:2015-01: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach dem UCI-Verfahren – Teil 2: Prüfung und Kalibrierung der Härteprüfgeräte.
- [5] DIN EN 1993-1-9: 2010-12. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung.
- [6] DIN EN 15305: 2009-01. Zerstörungsfreie Prüfung – Röntgendiffraktometrisches Prüfverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen, 2009.
- [7] DIN EN ISO 6507-1:2018-07: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren.
- [8] Gerster, P.: Praktische Anwendungen der PIT-Technologie, Stahlbau 78, Heft 9, S.680-683, Ernst&Sohn Verlag, 2009
- [9] Kuhlmann, U., Breunig, S., Ummenhofer, T., Weidner, P.: Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren, DAST-AiF-Schlussbericht, IGF-Nr. 17886, 2018.
- [10] Kuhlmann, U., Kudla, K., Ummenhofer, T., Weidner, P., Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau, Schlussbericht, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2013.
- [11] Marquis, G. B., Z., Barsoum, IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) - Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, Springer, 2016.
- [12] Müller, H.: Beurteilung und Entwicklung geeigneter Qualitätssicherungstests für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren, Masterarbeit, Nr. 2016-25X, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2016.
- [13] PITEC GmbH, Betriebsanleitung für PSM – S10-00.
- [14] Tehrani Yekta, R., Ghahremani, K., Walbridge, S.: Effect of quality control parameter variations on the fatigue performance of ultrasonic impact treated welds, International Journal of Fatigue 55 (2013) p. 2245 – 256, 2013.
- [15] Ummenhofer, T., Weidner, P., Kuhlmann, U., Kudla, K., Breunig, S.: Entwicklung eines einfachen Qualitätssicherungstest für die Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren, FOSTA-Schlussbericht, P872, 2017.
- [16] Weich, I., Ermüdungsverhalten mechanisch nachbehandelter Schweißverbindungen in Abhängigkeit des Randschichtzustands, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2009.