

EFFIZIENTER STAHLBAU DURCH DIE PNEUMATIC IMPACT TECHNOLOGY (PIT) BEI PERIODISCH SCHWINGENDEN SCHWEIßKONSTRUKTIONEN *)

Abstract

Nach dem heutigen Stand der Normung ist die Schwing- bzw. Ermüdungsfestigkeit von Stählen bei geschweißten Konstruktionen unabhängig von der Streckgrenze. Dies ist als einer der Hauptgründe für den noch immer verzögerten Einsatz von höherfesten Stählen in Konstruktionen unter periodisch schwingender Beanspruchung anzusehen. Durch den Einsatz von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren besteht die Möglichkeit die Ermüdungsfestigkeit insbesondere von höherfesten Stählen zu erhöhen. Im Stahlbau bestehen jedoch bis heute keine normativen Regelungen, um die positiven Effekte einer Schweißnahtnachbehandlung zu berücksichtigen.

Einleitung

Eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen gewinnt in vielen Bereichen der Industrie zunehmend an Bedeutung, auch bei Anwendungen von höher- und hochfesten Stählen. Dies wird u. a. durch höherfrequente Hämmerv Verfahren (HFH) erreicht. Dadurch können Schweißkonstruktionen auch wesentlich wirtschaftlicher hergestellt werden.

Mit zunehmender Festigkeit steigt auch die Schwingfestigkeit eines metallischen Werkstoffes – diese Aussage gilt in dieser Form nur für ideale (das heißt polierte) Proben aus dem Grundwerkstoff. Jegliche Imperfektionen, wie zum Beispiel Geometrieänderungen durch Kerben oder Bohrungen, Oberflächendefekte oder aber die im Stahlbau nicht zu vermeidenden Schweißungen reduzieren das Betriebsfestigkeitsverhalten von hochfesten Stählen auf ein Maß, das im Extremfall auf der Höhe der Dauerschwingfestigkeit von normalfesten Stählen liegen kann.

So sieht Eurocode 3-1.9 Ermüdung bis heute noch vor, dass der Betriebsfestigkeitsnachweis unabhängig von der eingesetzten Stahlgüte ist, und dies unabhängig von der Anzahl der Zyklen, der Art des Belastungskollektives und dem Spannungsverhältnis.

Bereits im Rahmen eines AiF-Forschungsprojekts P 620 [1] mit dem Titel „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ wurde am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart und an der Material-

*) Peter Gerster, IWE – Pitec GmbH – p.gerster@pitec-gmbh.com

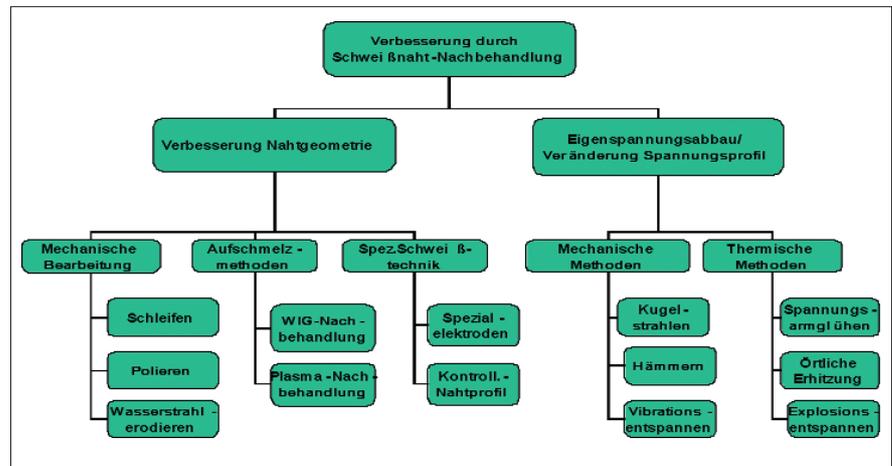


Bild 1: Versch. Nachbehandlungsverfahren

forschungs- und Prüfanstalt (MFPA) der Bauhaus-Universität Weimar die Anwendung und die Effektivität des Nachbehandlungsverfahrens Esonix UIT (Ultrasonic Impact Treatment) mit dem bereits bekannten Verfahren des WIG-Aufschmelzens an einem typischen Konstruktionsdetail des Stahlbaus, der Quersteife eines Biegeträgers, gegenübergestellt.

Bild 1 zeigt einen groben Überblick der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren, wobei grundsätzlich die Einteilung in zwei Hauptgruppen möglich ist:

- Verbesserung der Nahtgeometrie
- Eigenspannungsabbau durch Veränderung des Spannungsprofils

Die neueste Generation der Schweißnahtnachbehandlung wurde nun von der Firma PITEC GmbH entwickelt,

nämlich die Pneumatic Impact Treatment (PIT) Technologie. Hierbei werden neben einer Verfestigung der Oberfläche Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich induziert, sowie die Kerbwirkung der Nahtübergänge wesentlich verbessert (siehe Bild 2). Das PIT-Verfahren zeichnet sich dabei insbesondere durch einfache Bedienbarkeit und hohe Reproduzierbarkeit aus.

Die Pneumatic Impact Technology (PIT)

Die umfangreichen Erfahrungen, welche das PIT Team mit dem UIT Verfahren bei diversen Forschungsvorhaben, Industrieprojekten und Referenzen in den letzten Jahren sammeln konnte, trugen dazu bei, dass das PIT System gleich mehrere Vorteile aufwei-

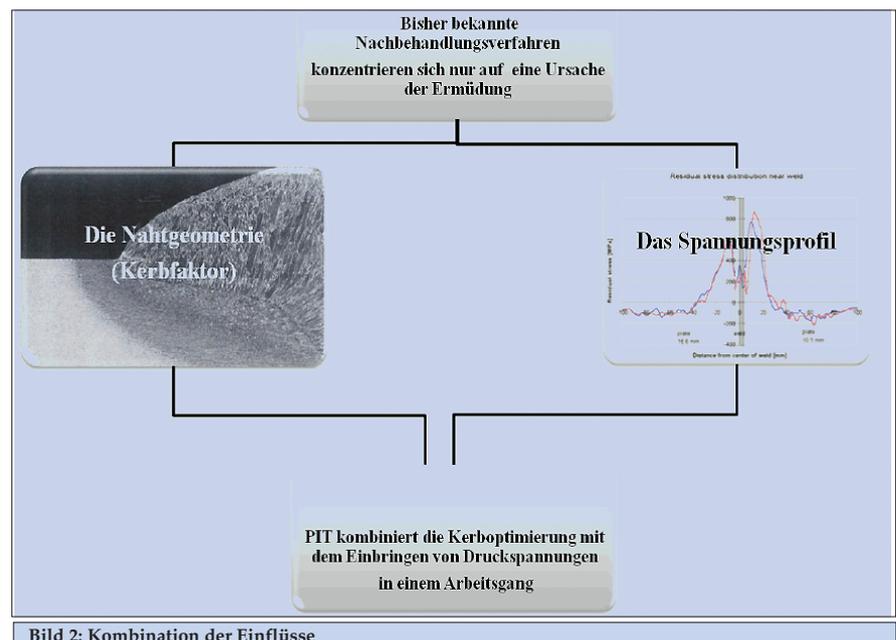


Bild 2: Kombination der Einflüsse

sen kann. Diverse vergleichende Untersuchungen verschiedener Institute zeigen immer wieder die mind. gleich guten Ergebnisse wie UIT, bei deutlich geringerem gerätetechnischem Aufwand. Neben der deutlich kompakteren und damit auch günstigeren Bauweise konnten auch noch weitere Vorteile realisiert werden. Die PIT-Technologie ist weltweit zum Patent angemeldet worden.



Bild 3: PIT Ausrüstung

Wirkungsweise von PIT

PIT ist ein höherfrequentes Hämmerverfahren, das zur Ertüchtigung von Schweißnähten entwickelt wurde. Sowohl die Frequenz, als auch die Schlagkraft können unabhängig voneinander geregelt werden. Nur dadurch ist es möglich, den verschiedenen Anforderungen der unterschiedlichen Materialien gerecht zu werden [2].

Die mechanischen Impulse werden durch gehärtete Bolzen, welche in der Geometrie auf die jeweilige Anwendung angepasst sind, auf eine zu behandelnde Oberfläche übertragen. Dieser Prozess verbindet mehrere Ansätze bisher bekannter Nachbehandlungsverfahren in einem Arbeitsgang. PIT verbessert sowohl das Spannungsprofil als auch die Geometrie des Schweißnahtüberganges. Der Fluidic Muscle (Fa. Festo) arbeitet hierbei in einem optimalen Frequenzbereich und überzeugt durch hohe Dynamik und geringe Masse. Dieser Antrieb arbeitet sehr zuverlässig und verschleißarm.

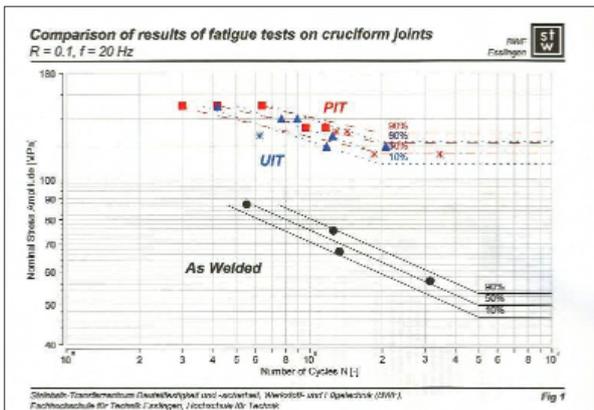


Bild 4: Wöhlerlinienvergleich UIT- PIT

Um die Vibrationen durch das höherfrequente Hämmer für den Bediener möglichst gering zu halten, arbeitet das System gegen ein weiteres Federsystem, so dass das Handgerät von der Schlagkraft vollkommen entkoppelt ist. Ergebnisse über die Prüfung der sicherheitstechnischen Anforderung „Schutz gegen schädliche Schwingungen“ durch das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (BGIA) bestätigen einen sehr geringen Wert von ca. 5 m/sec².

Ein weiterer Vorteil ist, dass man durch die Feder immer die gleiche Anpresskraft des Systems und somit eine gute Reproduzierbarkeit auch durch unterschiedliche Bediener gegeben ist. Aufgrund dieser Entkoppelung ist auch der Einsatz des Gerätes mit dem Roboter problemlos möglich.

Die Vorschubgeschwindigkeit bei Stahl beträgt ca. 20 – 30 cm/min.

2.1 Ausrüstung

Bild 3 zeigt die erforderliche Ausrüstung bei einer PIT Behandlung – 1 Steuergerät und 1 Handgerät. Die Frequenz kann praktisch von 0 – 200 Hz eingestellt werden und die Druckluft und somit die Schlagkraft kann stufenlos eingestellt werden. Im Gegensatz zu anderen Verfahren, funktioniert das Gerät bereits bei einem Luftdruck von 4 – 5 bar und hat somit auch einen sehr geringen Luftverbrauch (ca. 150 – 170 l/min.). Außerdem wird die Abluft nach vorne zum Bolzen abgeführt. Dies hat den Vorteil, dass:

- a Lackpartikel oder Metallspänchen und sonstige Verunreinigungen weggeblasen werden und nicht ungewollt ins Material eingedrückt werden
- b die ausströmende Luft den oder die Bolzen kühlt, und somit keine weitere Kühlung für den Bolzen erforderlich ist, dadurch wird die Standzeit deutlich erhöht

Im Bild 4 ist ersichtlich, dass die PIT Behandlung hier sogar noch ca. 5% bessere Ergebnisse zeigt als die UIT Behandlung. Beide Verfahren weisen eine signifikante Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit auf. Während bei der nur geschweißten Probe bei einer Lastspielzahl von 2 Mio. eine Ermüdungsfestigkeit von ca. 60 MPa, bei UIT behandelten Proben 108 MPa und die



Bild 5: PIT am Roboter

PIT behandelten Proben bei 122 MPa. Diese Geräte werden von der Firma PITEC GmbH gebaut, weiterentwickelt und vertrieben.

Eine Weiterentwicklung des Steuergerätes mit einer SPS-Steuerung (Sie-

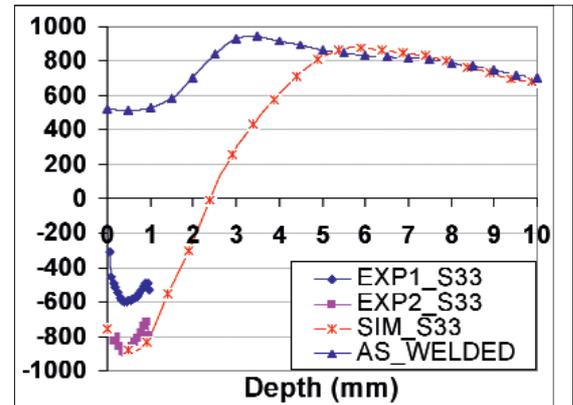


Bild 6: Eigenspannungen in Längsrichtung der Schweißnaht Werkstoff S700 MC

mens) ermöglicht eine elegante Eingabe der Behandlungsparameter für die verschiedenen Werkstoffe und Schweißnahtarten über ein Touchscreen-Display. Dadurch ist es auch möglich, die Behandlungsdaten über einen längeren Zeitraum aufzuzeichnen. Dieses Steuergerät wurde auch auf der Fachmesse in Wien vorgestellt.

Die kompakte transportable Anlage ermöglicht auch eine problemlose PIT-Behandlung auf Baustellen. Ebenso kann die Anlage auch sehr leicht im Produktionsprozess integriert werden, zum Beispiel Einsatz durch einen Roboter bei großen Stückzahlen (siehe Bild 5). Auch hierzu laufen einige Projekte.

Das PIT-Verfahren wird angewendet um folgendes zu erreichen:

- Erhöhung der Lebensdauer
- Reduzierung und Kontrolle des Schweißverzuges
- Erhöhung der Oberflächenhärte

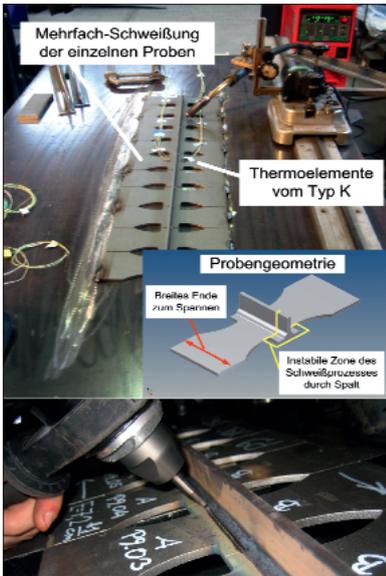


Bild 8: Probenherstellung

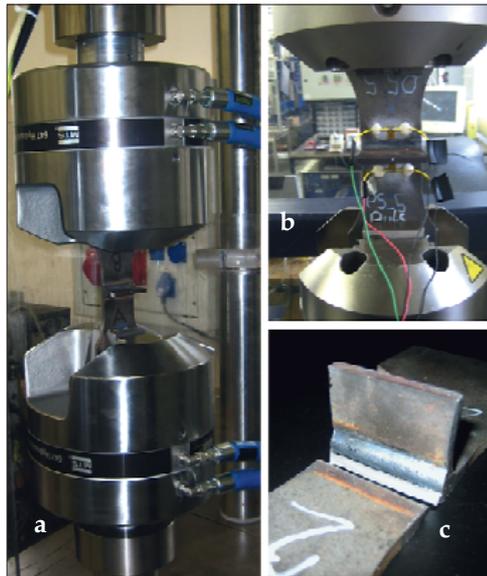


Bild 9: Ermittlung der Schwingfestigkeit

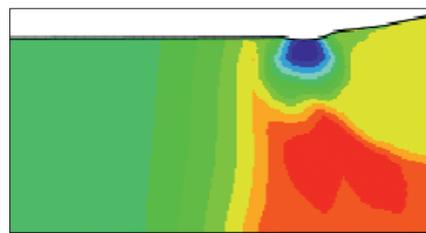
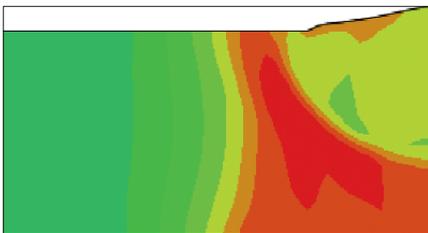
- Materialeinsparung bis ca. 40%
- Steigerung der Anlagen- bzw. Bauwerksverfügbarkeit durch:
 - x Plastische Verformung der Oberfläche
 - x Veränderung des Spannungsprofils
 - Einbringen von Druckspannungen bis zu einer Tiefe von 2 – 3 mm – abhängig von den Materialeigenschaften
 - Reduzierung von Zugeigenstressungen
 - Erhöhung der mechanisch-technologischen Eigenschaften
 - Verbesserung der Eigenschaften der

setzt werden. Auch Außenradien können mit einem speziell angepassten konkaven Bolzen behandelt werden. Anstelle Rollieren werden Übergänge an hochbeanspruchte Achsen und Wellen mit sehr gutem Erfolg PIT behandelt.

3 Forschungsergebnisse

3.1 Simulation der Eigenstressungen

Bei dem österreichischen Forschungsvorhaben JOIN A 11 [3] wurden neben den Schwingfestigkeitsuntersuchungen an der SZA unter anderem umfangreiche Eigenstressun-



a) ohne PIT-Behandlung b) mit PIT-Behandlung
Bild 7: Verteilung der Eigenstressungen im Nahtübergang Werkstoff S700 MC

Oberfläche und dicht unter der Oberfläche
Für die jeweiligen Einsatzgebiete und den entsprechenden Behandlungszweck können verschiedene Bolzenformen oder auch mehrere Bolzen einge-

messungen vom IWS an der TU Graz durchgeführt, sowie durch Simulation auch berechnet.

Im Bild 6 sind die vorhandenen hohen Zugeigenstressungen (blaue Kurve)

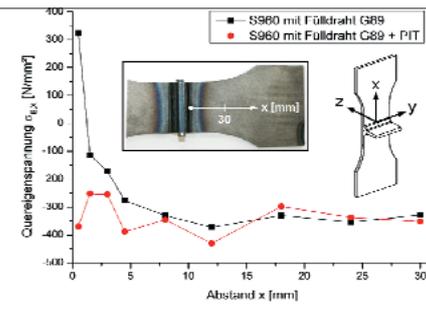
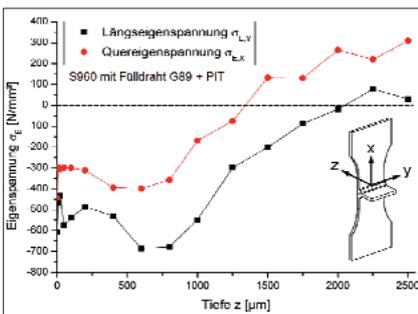


Bild 10: Verlauf der Eigenstressungen über a die Tiefe z und b an der Oberfläche in Lastrichtung

nach dem Schweißen dargestellt. Die Werte liegen im Bereich der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes. Die Simulation des Eigenstressungsverlaufes nach der PIT-Behandlung (rote Kurve) zeigt, dass durch diese Behandlung Druckeigenstressungen ebenfalls in der Höhe der Festigkeit des Grundwerkstoffes im oberflächennahen Bereich eingebracht werden. Deutlich ist auch die Tiefenwirkung der Druckeigenstressungen (bis ca. 2,3 mm) zu erkennen. Im Bild 7 sieht man sehr schön die Verteilung der Eigenstressungen vor und nach der PIT-Behandlung.

Auch die Messergebnisse der Druckeigenstressungen mit der klassischen Bohrlochmethode (bis ca. 1 mm Tiefe) stimmen speziell bei dem Experiment 2 sehr gut mit der Simulation überein.

3.2 Ergebnisse Montanuniversität Leoben

Um die sehr guten Ergebnisse zu bestätigen, wurden auch an der Montanuniversität Leoben [4] Eigenstressuntersuchungen sowie Schwingversuche durchgeführt und zwar diesmal an dem höchstfesten Feinkornbaustahl S960 (Blechdicke 5 mm). Im technischen Anwendungsbereich von hochfesten Stählen finden meist dünnwandige Strukturen mit hoher Steifigkeit Verwendung. Da die Schweißverbindungen z.B. Kastenprofilen als Kehlnähte ausgeführt sind, wurde ein T-Stoß mit einem nicht tragenden Steg als Probengeometrie ausgewählt.

Um eine konstante Qualität der Schweißnähte sicherzustellen, wurden die Probenserien in Mehrfachschweißungen hergestellt. Die Randzonen mit einem instabilen Schweißprozess durch den Spalt zwischen den einzelnen Proben wurden anschließend abgetrennt [5]. Die Typ-K Temperaturmessungen dienen der Ermittlung der t8/5-Zeit, welche für den hochfesten Stahl mit 12 s anzugeben ist (Bild 8a). Nach der Probenschweißung wurde eine Serie mit der Pneumatic Impact Technology (PIT) am Nahtübergang nachbehandelt. Die impulsartige Bewegung (f = 90 Hz) der gehärteten Stahlbolzen (Spitzenradius R = 2mm) rundet die Kerbe am Nahtübergang aus und erzeugt gleichzeitig Druckeigenstressungen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von etwa v = 20 bis 30 cm/min (Bild 8b).

Die Versuche zur Ermittlung der Schwingfestigkeit wurden an einer hydraulischen Prüfmaschine bei einem Spannungsverhältnis von R = 0,1 durchgeführt (Bild 9a). Begleitend wurden die Dehnungen an der Oberfläche am Nahtübergang mittels Dehnmessstreifen (DMS) gemessen (Bild 9 b). Dies dient zur Erfassung des technischen Anrisses, der bei einem Abfall von 5% der lokalen Dehnungsamplitude

Ihr Partner in der Material- prüfung

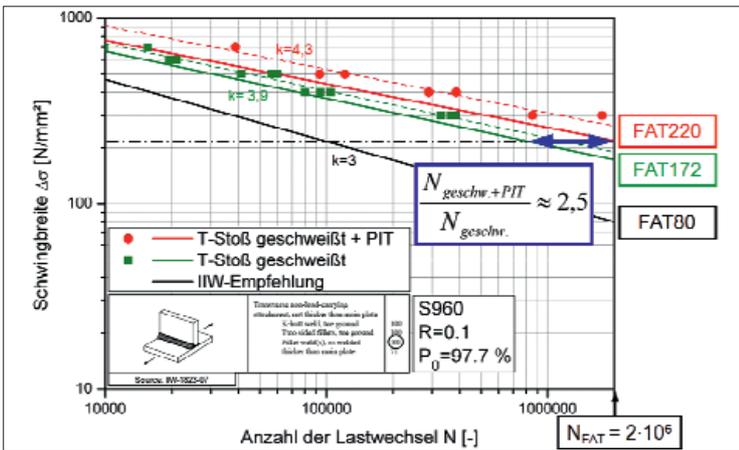


Bild 11: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsuntersuchungen

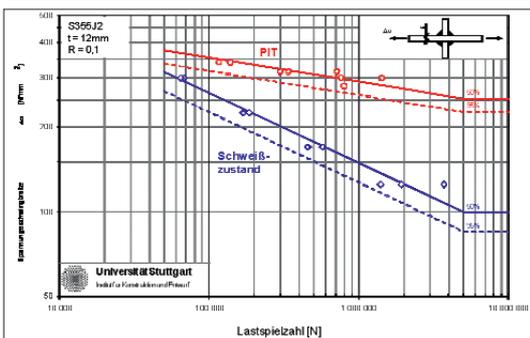


Bild 12: Kreuzprobe S355

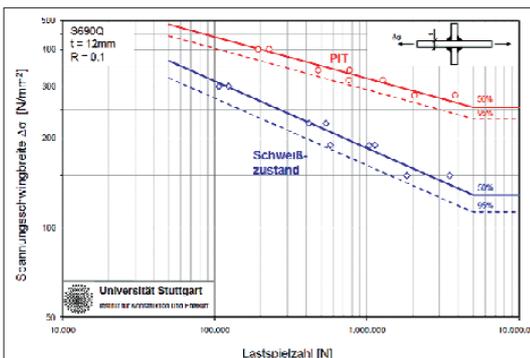


Bild 13: Kreuzprobe S690

linien die geprüfte Nennspannungs-Schwingbreite $\Delta\sigma$ über der Anzahl der Lastwechsel N aufgetragen (Bild 11). Die zugehörige FAT-Klasse ergibt sich bei einer Schwingzahl von $N = 2 \times 10^6$ und einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_u = 97,7\%$. Die IIW-Richtlinie [7] definiert für diese Probengeometrie und Beanspruchungsart den Kerbfall mit einer FAT-Klasse von 80 N/mm² ohne Nachbehandlung. Die unbehandelte Probenserie weist bereits eine FAT-Klasse von 172 N/mm² auf, bedingt durch die Verwendung hochfester Werkstoffe (entgegen der Aussage

im Eurocode 3-1.9). Durch die Nachbehandlung der Schweißnaht mittels PIT ergibt sich nochmals eine Steigerung auf eine FAT-Klasse von 220 N/mm². In Bezug auf die Lebensdauer des untersuchten hochfesten T-Stoßes, ergibt sich somit eine herausragende Steigerung um den Faktor 2,5 gegenüber dem unbehandelten Zustand.

Die PIT-Nachbehandlung kompensiert außerdem schrumpfungsbedingte Mittelspannungseinflüsse im behandelten Bereich. Die PIT-Anwendung zeichnet sich durch eine einfache Handhabung sowie hohe Reproduzierbarkeit aus und ist somit besonders für die Schweißung hochfester Nähte im industriellen Einsatz zu empfehlen.

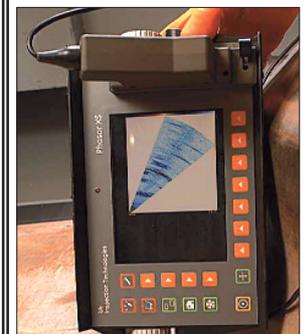
3.3 Ergebnisse Universität Stuttgart

Unter Federführung des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart zusammen mit verschiedenen Stahlherstellern und Stahlbauunternehmen wurden in dem Forschungsvorhaben „P 620“ die Stähle S355, S460 und S690 mit der UIT-Nachbehandlung untersucht. In Anlehnung an diese Untersuchungen wurden nun an der Universität Stuttgart weitergehende Untersuchungen mit der PIT Technologie an Kreuz- und Stumpfstoßen an den Werkstoffen S355 und S690 durchgeführt. Die Schweißarbeiten wurden am Labor für Schweißtechnik an der Hochschule Ulm mit Schweißautomaten ausgeführt. Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsuntersuchungen zeigen die Bilder 12 und 13.

Auch hier zeigte es sich, wie bereits damals bei den UIT behandelten Proben, dass die Ermüdungsfestigkeit bei 2 Millionen Lastwechseln praktisch verdoppelt werden kann und die Neigung der Wöhlerlinie deutlicher flacher verläuft. Auch die Eigenspannungsmessungen zeigen, dass diese mit der UIT Behandlung vergleichbar sind. Bei dem Werkstoff S690 treten die Brüche vorwiegend im Grundwerkstoff auf.

Dieser Artikel wurde beim Kongress JOIN-EX 2010 als Vortrag gebracht.

Der ungekürzte Artikel kann dem Tagungsband des Kongresses entnommen werden.



KRAUTKRAMER - Phased-Array Handprüfergerät



SEIFERT Mobile Röntgenprüfung



AGFA Filmentwicklungsanlage

**PROBLEMLÖSUNG
BERATUNG
LEIHGERÄTE
SERVICE**



Mittli Kommanditgesellschaft
1030 Wien, Hegergasse 7
Tel. 01/798 66 11-0, Fax DW 31
e-mail: mittli@mittli.at

bewertet wird [6]. Der Ort der Rissinitiation erfolgt bei den unbehandelten Proben mittig am Nahtübergang (Bild 9c). Bei den mit PIT nachbehandelten Proben verlagerte sich der Bruchausgang von der Naht in die WEZ des Grundmaterials.

Zusätzlich zu den experimentellen Versuchen und Analysen wurden Eigenspannungsmessungen an den Proben im ungeprüften Zustand durchgeführt. Der Verlauf der Eigenspannungen σ_E über die Tiefe z zeigt eine Tiefenwirkung der Druckeigenspannungen in Querrichtung x bis zu 1,3 mm und in Längsrichtung y bis 2,1 mm (Bild 10a). Die Messungen an der Oberfläche in Lastsrichtung (x -Achse) zeigen eine deutliche Reduktion der Schweißereigenspannungen durch die Überlagerung der mittels der PIT eingebrachten Druckspannungen (Bild 10b). Dies bewirkt im hochbeanspruchten Nahtübergangsbereich eine nachhaltige Erhöhung der Schwingfestigkeit der Schweißverbindung.

Basierend auf den Ergebnissen der Schwingfestigkeitsuntersuchungen wurden als Wöhler-