

# Lebensdauererhöhung bestehender und neuer Schweißkonstruktionen im Anlagen- und Behälterbau durch die UIT Behandlung

Peter Gerster, Ehingen/Donau

Nach dem heutigen Stand der Technik 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 wechselnder Beanspruchung anzusehen. Durch den Einsatz von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren besteht die Möglichkeit die Ermüdungsfestigkeit insbesondere von höherfesten Stählen zu erhöhen. Im Anlagen- und Behälterbau gibt es bis heute keine normativen Regelungen, um die positiven Effekte einer Schweißnahtnachbehandlung zu berücksichtigen. In diesem Vortrag wird das bisher in Europa noch wenig eingesetzte Nachbehandlungsverfahren „Ultrasonic Impact Treatment“ (UIT), sowie die Anwendungsmöglichkeiten im Anlagen- und Behälterbau vorgestellt.

## 1 Einleitung

Eine Verbesserung der Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen gewinnt in vielen Bereichen des Stahlbaus an zunehmender Bedeutung, insbesondere bei Anwendung von höher- und hochfesten Stählen.

Ein in Europa bisher noch wenig bekanntes Verfahren zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen ist die Esonix UIT-Behandlung, eine Ultraschall-Schlagbehandlung, bei der die Nahtübergänge unter sehr hoher Frequenz gehämmert werden. Hierbei werden neben einer Verfestigung der Oberfläche Druckeigenstressungen im oberflächennahen Bereich induziert, sowie die Kerbwirkung der Nahtübergänge verbessert. Das Esonix UIT-Verfahren zeichnet sich dabei insbesondere durch eine einfache Bedienbarkeit und eine hohe Reproduzierbarkeit aus.

Im Rahmen eines Projektes mit dem Titel „**Experimentelle und numerische Untersuchungen für Offshore Stukturen**“ wurde am Institut für Stahlbau der Universität Hannover die Anwendung und die Effektivität des Nachbehandlungsverfahrens Esonix UIT (Ultrasonic Impact Treatment) an einem typischen Konstruktionsdetail des Stahlbaus der Gründungsstruktur dargestellt. Es werden hierbei Ermüdungsversuche an den vorgesehenen Knotenkonstruktionen (Tripod) aus der Stahlsorte S355 durchgeführt. Ein wesentliches Ziel dieser Untersuchungen war die qualitative Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißnähten bei großen Blechdicken bis zu 100 mm. Die Versuchsreihe umfasste somit sechs Versuche ohne und sechs Versuche mit UIT Behandlung.

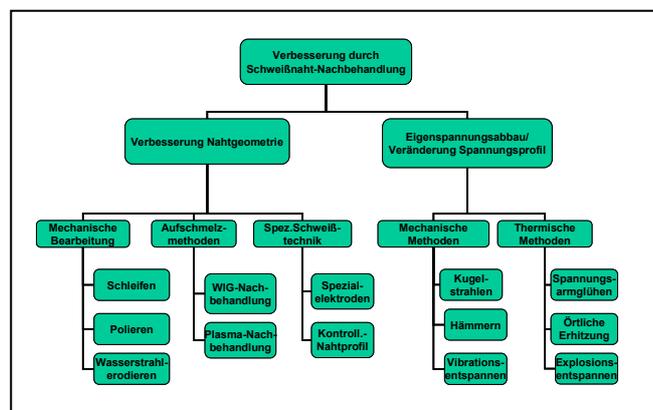
## 2 Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit

Die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen aus Stählen kann wesentlich gesteigert werden, indem die Kerbwirkung der einzelnen Schweißdetails verringert wird. Dies kann bei einer großen Anzahl von Schweißdetails durch eine kerbarme Detailausbildung verwirklicht werden, indem z.B. fließende Übergänge und Ausrundungen an den kritischen Stellen ausgebildet werden. Zusätzlich ist

auf eine gute Ausführung mit hoher Schweißqualität möglichst ohne Schweißnahtfehler zu achten.

Im Gegensatz zum Maschinenbau ist im Anlagen- und Behälterbau der Einsatz von Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung bisher sehr begrenzt. Ursache hierfür sind u. a. die derzeit gültigen Normen im Rohrleitungs- und Behälterbau, die bisher keine Möglichkeit bieten, die Vorteile dieser Verfahren zu nutzen.

Es ist jedoch erwiesen, dass die Ermüdungsfestigkeit von Schweißdetails vor allem aus höherfesten Stählen durch eine geeignete Nachbehandlung wie Schleifen, Hämmern, Kugelstrahlen oder das relative neue UIT-Verfahren (Ultrasonic Impact Treatment) teils entscheidend verbessert werden kann.



**Bild 1.** Übersicht der Schweißnahtnachbehandlungsverfahren

## 3 Schweißnahtnachbehandlungsverfahren

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

- Verbesserung der Nahtgeometrie
- Eigenstressabbau durch Veränderung des Spannungsprofils

Die Anwendung der Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung beschränkt sich im Allgemeinen auf eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit am Schweißnahtübergang. Eine mögliche Verlagerung des Anrisses in die Schweißnahtwurzel muss daher berücksichtigt werden.

Beim **Überschleifen** der Schweißnahtübergänge erfolgt eine Verringerung der Kerbschärfe, sowie das Entfernen von Schweißnahtfehlern an der Oberfläche.

Bei der **WIG-Nachbehandlung** findet durch nochmaliges Aufschmelzen der Schweißnaht ein Ausrunden des Schweißnahtüberganges statt. Es besitzt den Vorteil, dass es von vielen Stahlbauunternehmen standardmäßig eingesetzt werden kann. Nachteilig ist, dass ausschließlich in Wannenlage das nochmalige Aufschmelzen erfolgen kann. Speziell höherfeste Stähle profitieren beim WIG-Aufschmelzen aufgrund der höheren Kerbempfindlichkeit und der höheren Ermüdungsfestigkeit des Grundmaterials von der Verringerung der Kerbschärfe.

Zum anderen werden durch Nachbehandlungsmethoden wie Hämmern oder Nadeln Druckeigenstressungen in den Nahtübergang eingebracht. Dabei wird der Nahtübergang plastisch verformt, sodass sich Druckeigenstressungen in der Oberfläche ausbilden. Auch Schweißnahtfehler werden dabei im geringen Umfang beseitigt. Für Anwendungen im Stahlbau besitzt dieses Verfahren jedoch den Nachteil, dass es auf Grund der niedrigen Frequenz mit der das Hämmern durchgeführt wird, nur unter starken Geräusch- und Vibrationsbelastung durchzuführen ist. Auch wird keine gute Reproduzierbarkeit erreicht. In Europa noch wenig bekannt ist die sogenannte „**Ultrasonic Impact Technology**“ kurz UIT genannt.

**Tabelle 1.** Vergleich der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren

TECHNOLOGIE	SCHLEIFEN	KUGELSTRAHLEN	HÄMMERN & NADELN	SPANNUNGSARMGLÜHEN	WIG NACHBEHANDLUNG	<i>Esonix</i> <sup>®</sup> ULTRASONIC IMPACT TECHNOLOGY
ERHÖHUNG DER BETRIEBSFESTIGKEIT	•	•	•	•	•	•
ERHÖHUNG DER KORROSIONSBESTÄNDIGKEIT		•				•
VERMINDERUNG DES SCHWEISSVERZUGES			•	•		•
VERMINDERUNG DER EIGENSPANNUNGEN				•		•

Ein Ultraschallwandler wandelt dabei harmonische Schwingungen in mechanische Impulse um. Dabei erfolgt die eigentliche Nachbehandlung durch ein mechanisches Hämmern mit gehärteten Bolzen bei ca. 200 Hz, wobei gleichzeitig die Ultraschallenergie mit einer Frequenz von 27-55 kHz eingebracht wird (Bild 2). Dadurch wird **gleichzeitig** die Kerbschärfe an der Schweißnaht verbessert und Druckeigenstressungen eingebracht. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der leichten Bedienbarkeit, der geringen Geräuschbelastung sowie der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Forschungsergebnisse in Ermüdung von Schweißkonstruktionen haben gezeigt, dass UIT die effizienteste und wirtschaftlichste Behandlung darstellt zur Verbesserung der spezifischen Eigenschaften im Vergleich mit anderen Techniken wie Schleifen, Ku-

gelstrahlen, Wärmebehandlung, WIG-Behandlung, usw.

Die Ultrasonic Impact Technology kann erfolgreich in vielen verschiedenen Industriebereichen angewendet werden, wie Aerotechnik, KFZ-Industrie, Energie- und Kraftwerkstechnik, Schiffbau, Eisenbahn- und Transportwesen, Stahlbau, Schwerindustrie usw.



**Bild 2.** UIT-Behandlung an einem Rohrprobekörper

## 4 Die *Esonix*<sup>®</sup> Ultrasonic Impact Technology

### 4.1 Geschichte von UIT

Die *Esonix*<sup>®</sup> Ultrasonic Impact Technology (UIT) basiert auf der Arbeit des Wissenschaftlers und Ingenieurs Dr. Efim Statnikov, Vize-Präsident von Applied Ultrasonics und Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung. Dr. Statnikov entwickelte diesen Prozess, der seine Anwendung in dem Sowjetischen Atom-Marine Programm in 1972 fand. Die Ergebnisse der Anwendung von UIT ermöglichten den Konstrukteuren neue Schiffskörper für Unterseeboote zu entwickeln, die den extremen Bedingungen unter Wasser standhielten und es den U-Booten ermöglichten, tiefer zu tauchen. Anschließend wurde diese Technologie in der Aerotechnik, KFZ-Industrie, Schienentransporttechnik, Komponenten und Konstruktionen angewendet, die einer zyklischen Belastung ausgesetzt sind, wie z.B. Brücken, Baumaschinen und Ausrüstungen, usw. Heute wird UIT hauptsächlich eingesetzt für die Verbesserung der Eigenschaften von Metall-Komponenten und Schweißkonstruktionen.

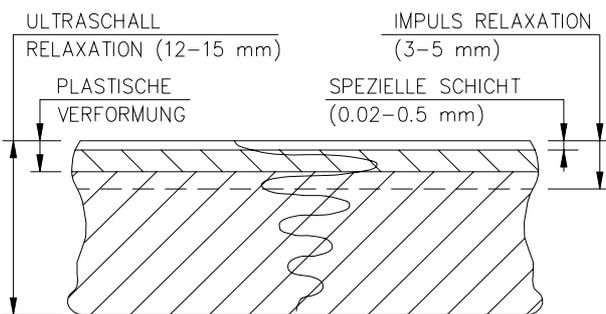
### 4.2 Das Prinzip von UIT

UIT basiert auf einer Umwandlung von harmonischen Schwingungen durch einen Ultraschallwandler in mechanische Impulse und hochfrequente Ultraschallenergie und deren Übertragung durch gehärtete Bolzen auf eine zu behandelte Oberfläche. Während diesem Vorgang wird das Spannungsprofil geändert und bei Schweißnähten die Geometrie des Nahtüberganges wesentlich verbessert.



**Bild 3.** US-Generator mit Handgerät

Die Standardausrüstung (siehe Bild 3) besteht aus dem Ultraschall Generator mit einer Leistung von 1-3 kW und einer Ausgangsfrequenz von 27-55 kHz sowie dem Handgerät mit Adapter für verschiedene industrielle Anwendungen. Ein kleines Kühlaggregat wird für die Kühlung des Handgerätes benötigt. Die kompakte transportable Anlage ermöglicht auch eine problemlose UIT-Behandlung auf Baustellen. Ebenso kann die Anlage auch sehr leicht im Produktionsprozess integriert werden, zum Beispiel Einsatz durch einen Roboter bei großen Stückzahlen.



Zone	Charakteristik
"Spezielle Schicht"	Erhöhung des Widerstandes gegen Verschleiß, Korrosion und der Oberflächengüte
Plastische Verformung	Erhöhung der Lebensdauer, Kompensation des Schweißverzuges, Erniedrigung der Korrosionsermüdung, Druckeigenspannungen
Impuls Relaxation	Erniedrigung der Eigenspannungen um bis zu 70 % des Ausgangswertes
Ultraschall Relaxation	Erniedrigung der Eigenspannungen um bis zu 50 % des Ausgangswertes

**Bild 4.** Wirkungsweise der UIT-Behandlung dargestellt am Querschnitt einer Metallprobe

Die Ultrasonic Impact Technology wird angewendet um folgendes zu erreichen:

- Erhöhung der Lebensdauer
- Reduzierung und Kontrolle des Verzuges
- Verbesserung des Korrosionswiderstandes
- Erhöhung der Oberflächenhärte
- Ersatz des Spannungsarmglühens
- Reduzierung des Eigengewichtes

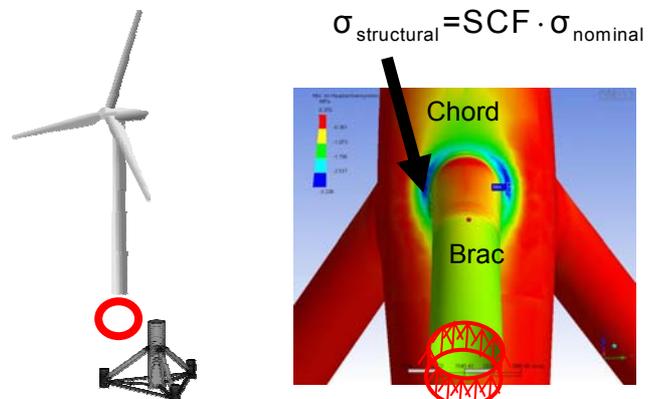
durch:

- Plastische Verformung der Oberfläche
- Veränderung des Spannungsprofils
  - Einbringen von Druckspannungen bis zu einer Tiefe von 3 mm - abhängig von den Materialeigenschaften
- Reduzierung von Zugeigenspannungen
- Erhöhung der mech. techn. Eigenschaften
- Verbesserung der Eigenschaften der Oberfläche und unter der Oberfläche

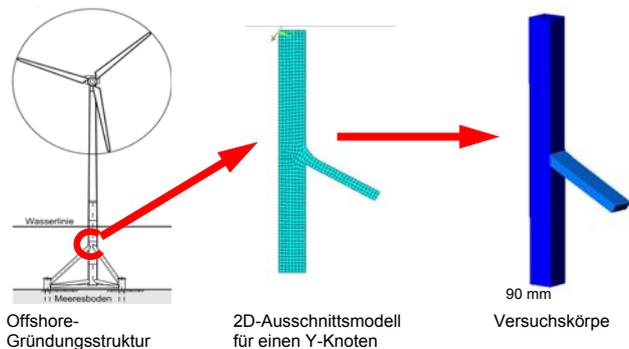
Diese Technologie ist Eigentum und patentiert von Applied Ultrasonics, USA.

## 5 Projekt Windenergieanlagen

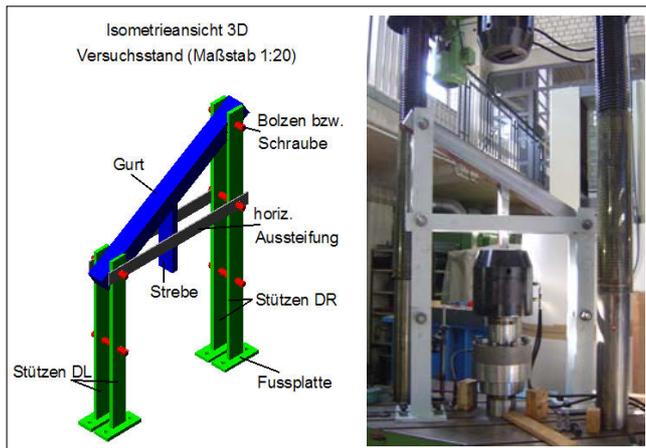
Mit dem Hintergrund, durch bessere Ermüdungsfestigkeiten die Wirtschaftlichkeit von Stahlkonstruktionen zu fördern, wurden im Rahmen eines Projektes „Experimentelle und numerische Untersuchungen von Knotenverbindungen für Offshore Strukturen“ am Institut für Stahlbau der Universität Hannover [4] die Effizienz des Nachbehandlungsverfahrens UIT an einem Rohrknoten für eine Gründungsstruktur aus dem Stahl S355 untersucht, siehe auch Bild 5. Als Schweißdetail wurde der Übergang eines Y-Rohrknoten für ein Tripod-Fundament gewählt. Das Ausschnittmodell besteht jeweils aus einem Gurt (G) und einer Strebe (S), die im Winkel von 60° an den Gurt mittels einer HV-Naht angeschweißt wird.



**Bild 5.** Rohrknoten für Gründungsstrukturen



**Bild 6.** Geometrie des Prüfkörpers



**Bild 7.** Versuchsaufbau

Im Bild 6 ist die Geometrie der Prüfkörper dargestellt, während Bild 7 den Versuchsaufbau zeigt. Die Versuche wurden auf der Prüfmaschine HUS 600 durchgeführt. Für die Lagerung der Prüfkörper im Versuchsaufbau war eine spezielle Auflagerkonstruktion erforderlich. Die Prüfkraft wurde vom unteren Zylinder der Prüfmaschine über eine Klemmlänge von 60 mm in die Strebe eingeleitet. Bild 9 zeigt den messtechnischen Aufwand an den Prüfkörpern mit Dehnungsmessstreifen und induktiven Wegaufnehmer. Die Messwerte der Dehnungsmessstreifen, der induktiven Wegaufnehmer und der Kraftmessdose wurden online erfasst.

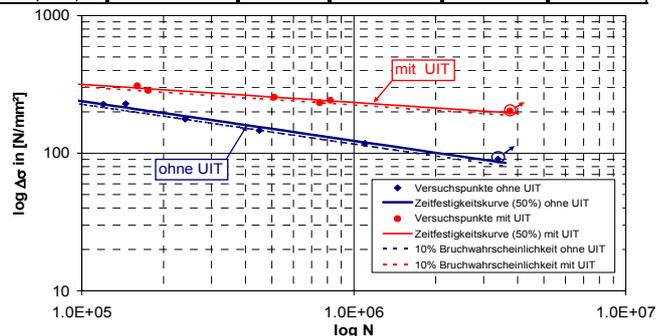


**Bild 8.** UIT-Behandlung des Prüfkörpers



**Bild 9.** Messtechn. Vorbereitungen am Prüfkörper

Testserie	Versuch	$\Delta\sigma_c$	Neigung m	NR bei $\Delta\sigma = 100$	NR bei $\Delta\sigma = 200$
	Nr.	[N/mm <sup>2</sup> ]	[ - ]	[*10 <sup>6</sup> LW]	[*10 <sup>6</sup> LW]
1 (aw)	Y 1 bis Y 6	95.5	3.47	1.71	0.15
2 (UIT)	Y 7 bis Y 12	204.5	7.63	475.07	2.40



**Bild 10.** Ergebnisse der erreichten Lastspielzahlen

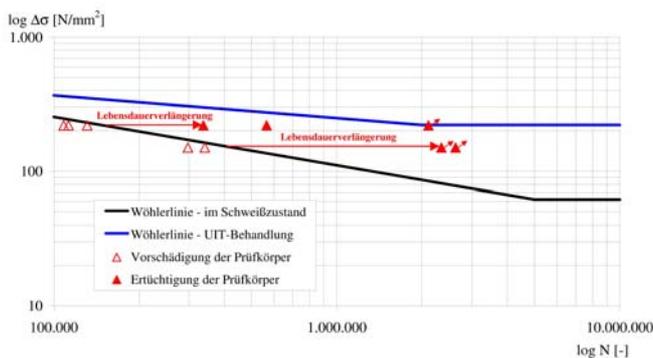
Bild 8 zeigt die UIT-Behandlung des Nahtüberganges zum dickeren Gurtblech (90 mm), während Bild 10 die erreichten Ergebnisse der Proben mit und ohne UIT-Behandlung darstellt. Diese Zeitfestigkeitskurven zeigen, dass durch die UIT-Behandlung eine signifikante Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit am Schweißnahtübergang nachgewiesen werden konnte. Eine statistische Auswertung ergab, dass Versuchskörper ohne UIT-Behandlung in die Kerbfallklasse 90 eingestuft werden können. Dieses Ergebnis ist damit übereinstimmend mit der Klassifizierung für Rohrknoten nach der GL-Richtlinie [3] auf der Basis des Strukturspannungskonzeptes. Im Vergleich zur ersten Testserie ist der Wert der zweiten nach der UIT-Behandlung mit  $\Delta\sigma_c = 204,5$  N/mm<sup>2</sup> mehr als doppelt so groß. Der Wert würde auch über der höchsten Kerbfallklasse liegen, die mit 160 für das Grundmaterial angegeben wird. Dies bedeutet in diesem Fall, dass ein Ermüdungsriss auch zuerst im

Grundmaterial auftreten könnte, wenn dort eine ähnliche hohe Spannungskonzentration vorliegen würde. Dies wurde in einem anderen Forschungsvorhaben P 620 mit dem Titel „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ der Universität Stuttgart [5], festgestellt. Hier sind vor allem bei dem höherfesten Werkstoff S690QL alle Proben im Grundwerkstoff gerissen. Die Anwendung dieser UIT-Technologie ermöglicht in diesem Fall eine Gewichtsreduzierung von 55.000 kg / Anlage.

## 6 Lebensdauererweiterung durch nachträgliche Ertüchtigung mit UIT

Es liegt natürlich nahe, eine Nachbehandlung auch während der Nutzungsdauer einer Konstruktion durchzuführen, um so die Restlebensdauer zu steigern. Hierzu wurden Ermüdungsversuche an vorgeschädigten Prüfkörpern durchgeführt.

Diese Versuchskörper wurden im Schweißzustand belassen und dann mit einer Vorschädigung von 80 – 90 % der rechnerischen Lebensdauer beaufschlagt. Nach einer darauf folgenden UIT-Behandlung wurde der Ermüdungsversuch weitergeführt. Die im Rahmen einer Diplomarbeit an der Uni Stuttgart [9] ermittelten Versuchsergebnisse in Bild 11 zeigen, dass die Anwendung des UIT-Verfahrens auch zur Ertüchtigung bestehender Konstruktionen sehr viel versprechend ist. Durch die nachträgliche UIT-Behandlung lassen sich Restlebensdauern, die mindestens das 15-fache der Restlebensdauer ohne Nachbehandlung betragen, erzielen. Bei weiteren Versuchen an der Universität in Braunschweig wurde sogar festgestellt, dass die mittleren Lastspielzahlen praktisch die gleiche Höhe der Proben erreichen, die von vorneherein im nachbehandelten Zustand geprüft worden waren.

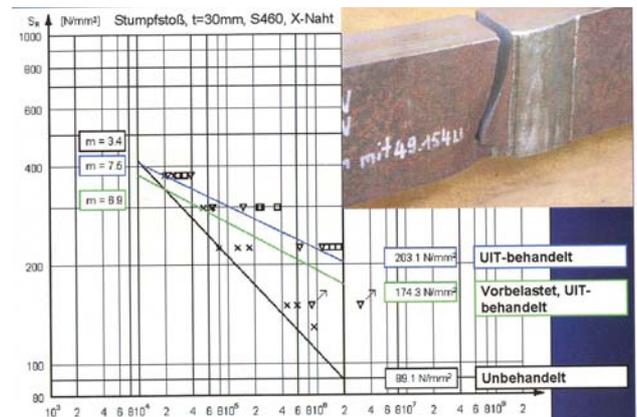


**Bild 11.** Lebensdauererweiterung durch nachträgliche Ertüchtigung mit UIT (Großprüfkörper, Quersteife, S460, R=0,1)

Aufgrund dieser hervorragenden Ergebnisse, die auch bereits in anderen Instituten festgestellt wurden, läuft nun ein von der EUREKA gefördertes Forschungsvorhaben unter der Federführung des Institutes für Bauteilerhaltung und Tragwerk (IBT) an der Universität Braunschweig. Der Titel dieses Vorhabens lautet:

## „REFRESH – Lebensdauererhöhung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen“

Ziel dieses europäischen Projektes ist die **Entwicklung eines ganzheitlichen Konzeptes** durch die Einbeziehung von Ausrüstern und Anwendern sowie anerkannte Prüfstellen. Auf der Basis solcher fundierter Untersuchungen soll eine Akzeptanz der zu entwickelnden Methoden und Verfahren durch die entsprechenden Normungs- und Zertifizierungsgremien erzielt werden, um diese dann in die Regelwerke (Eurocode, etc.) aufnehmen zu können. Bild 12 zeigt die ebenfalls guten Resultate der Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit an einem Stumpfstoß (30 mm, Werkstoff S460). Diese Untersuchungen wurden an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe durchgeführt.



**Bild 12.** Lebensdauererweiterung eines vorbelasteten Stumpfstoßes S460 30 mm dick

Damit können dann dynamisch belastete Stahlkonstruktionen wie z.B. Brücken, Kran- und Windenergieanlagen wirtschaftlicher hergestellt werden. Durch die Verlängerung der Lebensdauer bestehender Bauwerke wird eine maßgebliche volkswirtschaftliche Entlastung erreicht. In Nord- und Südamerika wurden und werden deshalb sehr viele Brückenbauwerke UIT behandelt.

## 7 Anwendung im Rohrleitungsbau von Kraftanlagen

Durch die plastische Verformung der Oberfläche und somit Einbringung von Druckeigenstressungen werden die Zugeigenstressungen im Bauteil praktisch eliminiert. So laufen zurzeit Versuche durch die UIT-Behandlung auf eine Spannungsarmglühung verzichten zu können. Dies wurde bereits mit Erfolg an bestimmten Bauteilen und Werkstoffen auch durch Abnahmegesellschaften akzeptiert.

Bei einem Hersteller wurden mit der Kema und LRS Verfahrensprüfungen mit dem Werkstoff 14MoV63 gemäß DIN EN ISO 15614 durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, festzustellen, ob die mechanisch technologischen Werte bei einer UIT-Behandlung so gut sind, dass auf ein nachträgliches

Spannungsarmglühen verzichtet werden kann. Bild 13 zeigt das Schweißen des Prüfstückes in der Position H-L045.



**Bild 13.** Schweißen der Verfahrensprüfung



**Bild 14.** UIT-Behandlung der einzelnen Lagen



**Bild 15.** Komplette Naht mit Wärmeeinflusszone wird UIT behandelt

Die Wurzellage wurde gemäß der WPS nach dem WIG-Verfahren (141) geschweißt. Der verwendete Schweißzusatz war von Böhler DMV 83-IG. Die Füll- und Decklagen wurden mit dem Verfahren LBH (111) geschweißt, dabei wurde der Schweißzusatz Smitweld SL 22G verwendet. Die Vorwärmtemperatur betrug min. 200 °C. Durch die Impuls-Relaxation und Ultraschall-Relaxation erreichen wir eine Reduzierung der Eigenspannungen. Um einen guten Spannungsabbau zu erhalten, ist es erforderlich nach

jeder Lage die komplette Nahtoberfläche UIT zu behandeln, wie die Bilder 14 und 15 zeigen. Die nebenstehende Tabelle zeigt, dass die erreichten mechanisch technologischen Werte sowohl beim Spannungsarmglühen wie auch nach der UIT-Behandlung den Anforderungen der Regelwerke entsprechen.

	Spannungsarmgeglüht	UIT behandelt
Bruchlage	Im Grundwerkstoff	Im Grundwerkstoff
Zugfestigkeit	501	511
Biegeprüfung 4xt	180	180
Kerbschlagproben SG	90 J	63 J
Kerbschlagproben Übergang	236 J	185 J
Härte GW Decklage	160	157
Härte WEZ- Decklage	255	270
Härte SG Decklage	240	250
Härte WEZ Decklage	255	225
Härte GW Decklage	172	158
Härte GW Wurzellage	159	157
Härte WEZ- Wurzellage	182	218
Härte SG Wurzellage	164	210
Härte WEZ Wurzellage	191	245
Härte GW Wurzellage	148	152

Durch den problemlosen Einsatz auf Baustellen eignet sich das UIT-Verfahren vor allem auch bei Reparaturschweißungen, zum Beispiel Bronzepropeller, Weichen und Kreuzungstücke an Eisenbahnschienen, sowie im Anlagen- und Behälterbau da in diesem Fall auch auf eine Spannungsarmglühung verzichtet werden kann.

## 8 Zusammenfassung

Höherfeste Feinkornbaustähle spielen im klassischen Stahlbau eine immer größere Rolle. In dynamisch belasteten Konstruktionen wird der Einsatz solcher Stähle aber durch die Ermüdungsfestigkeit eingeschränkt. Im vorliegenden Beitrag wurde vorgestellt, dass sich durch die Anwendung von Schweißnahtnachbehandlungsmethoden durchaus ein Potenzial zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißdetails aus hochfesten Stählen ergeben kann.

Wie die Ausführungen zeigen, ist mit der „Ultrasonic Impact Technology“ ein neues Verfahren entwickelt worden, das weltweit patentiert wurde. Die Einführung im Nord- und Südamerikanischen, sowie Asiatischen Raum ist bereits weiter fortgeschritten. Zurzeit laufen viele Projekte an verschiedenen Universitäten und Firmen speziell auch in Deutschland, die erreichten Ergebnisse, nicht nur auf dem Gebiet der Verbesserung der Schwingfestigkeit, übertreffen alle Erwartungen. Verglichen mit anderen Nachbehandlungsverfahren ist UIT wesentlich besser bei deutlich geringerem gerätetechnischer Aufwand und einfacher Handhabung. Das Verfahren lässt sich sehr gut in den Produktionsprozess integrieren und bei entsprechenden Stückzahlen auch mit dem Roboter durchführen. Hervorragende Ergebnisse wurden

auch an Aluminiumlegierungen und –  
schweißverbindungen erzielt. Im Prinzip ist das Ver-  
fahren für alle metallischen Werkstoffe geeignet.

## 9 Schrifttum

- [1] EN 1993-1-9: Eurocode 3, Teil 1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Ermüdung, Entwurf Status 49 (2004).
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DAST-Richtlinie 011, Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm<sup>2</sup>, Anwendung für Stahlbauten, (1988).
- [3] Germanischer Lloyd: Rules and Regulations IV Non-marine Technology Part 2-Offshore Windenergy, Germanischer Lloyd WindEnergie, Hamburg 2004
- [4] Schaumann, P.; Keindorf, Ch.; Wilke, F.: Abschlussbericht zum Thema: „Experimentelle und numerische Untersuchungen von Knotenverbindungen für Offshore Strukturen“
- [5] „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung (Projekt 620) Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
- [6] Statnikov, E. et al.: Ultrasonic tool for ultrasonic strengthening and relaxation treatment. Patent of the RF No. 472782 (1975).
- [7] Haagensen, P.; Maddox, S.: Post weld improvement for steel and aluminium structures. IIW Doc. XIII-1815-00 (2004).
- [8] Kuhlmann, U.; Dürr, A.; Günther, H.-P.: Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit höherfester Baustähle durch Anwendung der UIT-Nachbehandlung. Stahlbauheft 11 / 2006
- [9] Muck, A.: Ertüchtigung von ermüdungsbeanspruchten Schweißverbindungen durch Anwendung von Ultrasonic Impact Treatment (UIT). Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2005