

## Verlängerung der Lebensdauer v. Schweißkonstruktionen durch die UIT-Technologie

Dipl.-Ing. Peter Gerster Applied Ultrasonics Europe, Ehingen

*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 Stahlbau bestehen jedoch bis heute keine normativen Regelungen, um die positiven Effekte einer Schweißnahtnachbehandlung zu berücksichtigen.*

*In diesem Bericht wird das bisher in Europa noch wenig bekannte Nachbehandlungsverfahren „Ultrasonic Impact Treatment“ (UIT), sowie die Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie vorgestellt. Außerdem werden die Ergebnisse eines Forschungsprojekts erläutert, in dem die Effektivität des UIT-Verfahrens zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen anderen bekannten Nachbehandlungsverfahren wie dem WIG-Aufschmelzen gegenübergestellt wird.*

### 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 AiF-Forschungsprojekts mit dem Titel „**Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung**“ wurde am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart und an der Materialforschungs- 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. Es werden hierbei Ermüdungsversuche an Klein- und Großprüfkörpern sowie Trägern aus der Stahlsorte S355, S460 und S690 durchgeführt. Zur Vergleichbarkeit werden zusätzlich Prüfkörper, die im Schweißzustand belassen sind bzw. nach dem Schweißen mit einer nachträglichen Reinigungsstrahlung behandelt wurden, untersucht.

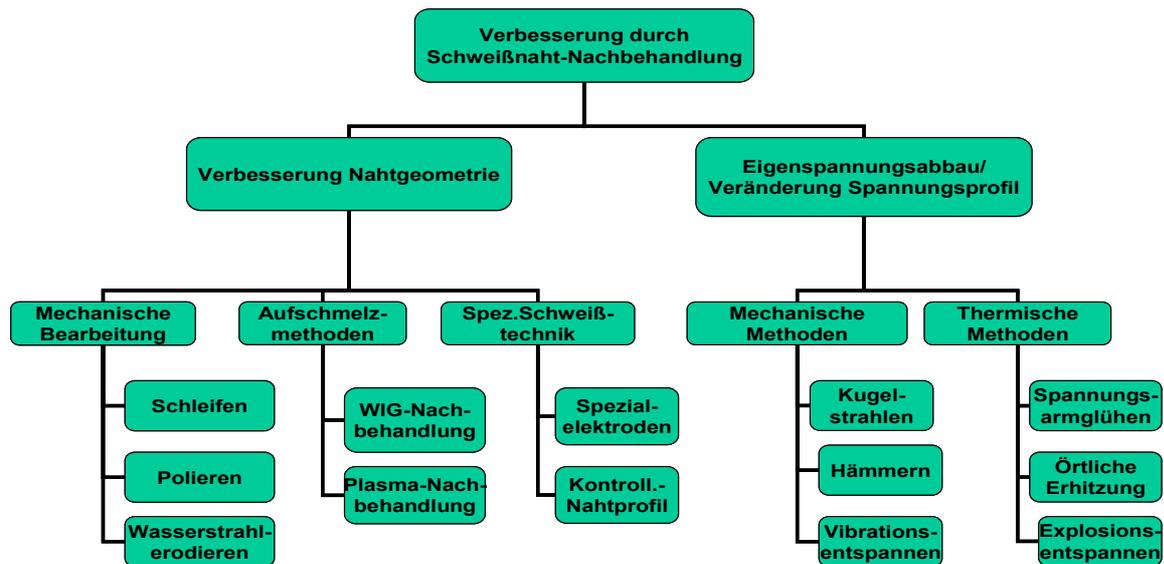
### 2 Ermüdungsbeanspruchung / Schwingfestigkeit

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.

Deshalb gibt es schon seit langem Bestrebungen, die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch geeignete Nachbehandlungsverfahren der Schweißnähte zu verbessern. **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



**Bild 1:** Gegenüberstellung der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren

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 Druckeigen-spannungen in den Nahtübergang eingebracht. Dabei wird der Nahtübergang plastisch verformt, so-dass sich Druckeigen-spannungen 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 Reprodu-zierbarkeit erreicht.

Forschungsergebnisse in Ermüdung von Schweißkonstruktionen haben gezeigt, dass UIT die effizien-teste und wirtschaftlichste Behandlung darstellt, zur Verbesserung der spezifischen Eigenschaften im Vergleich mit anderen Techniken wie Schleifen, Kugelstrahlen, Wärmebehandlung, WIG-Behandlung, usw.

Das UIT Verfahren kann erfolgreich in vielen verschiedenen Industriebereichen angewendet werden, wie Aerotechnik, KFZ-Industrie, Energie- und Kraftwerkstechnik, Schiffbau, Eisenbahn- und Trans-portwesen, Stahlbau, Brückenbau, Schwerindustrie, usw.

### 3 Das **Esonix**® Ultrasonic Impact Treatment (UIT) - Verfahren

#### 3.1 Geschichte von UIT

Das **Esonix**® Ultrasonic Impact Treatment (UIT) - Verfahren basiert auf der Arbeit des Wissenschaft-lers und Ingenieurs Dr. Efim Statnikov, Vize-Präsident von Applied Ultrasonics und Leiter der For-schungs- 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 extre-men 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 und auch bei Reparaturen im Behälter- und Anlagenbau, vor allem wenn ein nachträgliches Spannungsarmglühen nicht mehr durchgeführt werden kann.

### **3.2 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 2:** UIT-Ausrüstung



**Bild 3:** Behandlung einer Schweißnaht

Die Standardausrüstung (siehe Bild 2) 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.

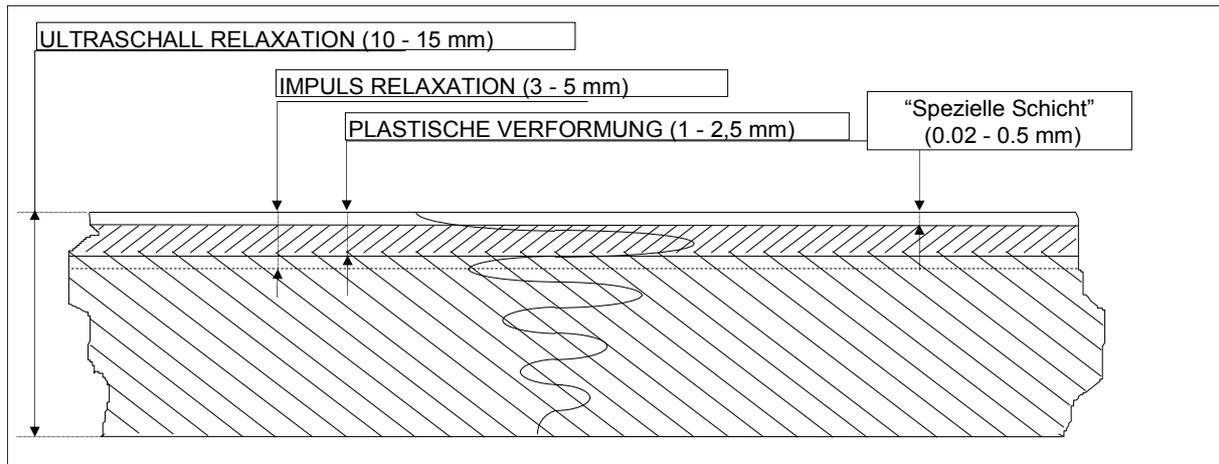
Das UIT-Verfahren wird angewendet um folgendes zu erreichen:

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

durch:

- Plastische Verformung der Oberfläche
- Veränderung des Spannungsprofils
  - Einbringen von Druckspannungen bis zu einer Tiefe von 2-3 mm - abhängig von den Materialeigenschaften
- Reduzierung von Zugeigenspannungen
- Erhöhung der mechanisch technologischen Eigenschaften
- Verbesserung der Eigenschaften der Oberfläche und unter der Oberfläche

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

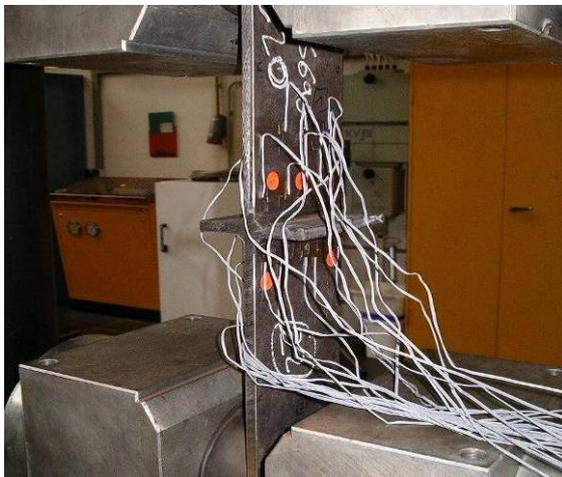


Zone	Charakteristik
“Spezielle Schicht”	Erhöhung des Widerstandes gegen Verschleiß, Korrosion und der Oberflächengüte
Plastische Verformung	Erhöhung der Lebensdauer, Kompensation des Schweißverzuges, Erniedrigung der Korrosionsermüdung, Druckeigenspannungen
Impuls Relaxation	Erniedrigung der Eigenspannungen 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

#### 4 Ergebnisse aus dem AIF-Forschungsprojekt P 620

Ziel dieses Projektes war es festzustellen, ob das Ermüdungsverhalten der höherfesten Stähle den restriktiven Berechnungsmethoden entspricht und ob durch geeignete Nahtnachbehandlungen die Wirtschaftlichkeit von Stahlbauten noch wesentlich verbessert werden kann. Unter Federführung des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart zusammen mit der MFPA der Bauhaus-Universität Weimar sowie verschiedener Stahlhersteller und Stahlbauunternehmen wurden die Stähle S355, S460 und S690 untersucht. Neben den verschiedenen Kleinproben wurden auch 12 komplette 4 m lange Träger aus S690 geschweißt um eine gesicherte Aussage machen zu können. Bei den Trägern wurden Querstreifen eingeschweißt, die Hälfte der Träger wurden nur im geschweißten Zustand geprüft und bei der anderen Hälfte der Träger wurden die Schweißnähte an den Querstreifen noch zusätzlich UIT behandelt und dann geprüft. Die Prüfung erfolgt im Resonanzprüfverfahren bei einem Spannungsverhältnis von  $R = -1$  bei einer Prüffrequenz von 43 Hz.

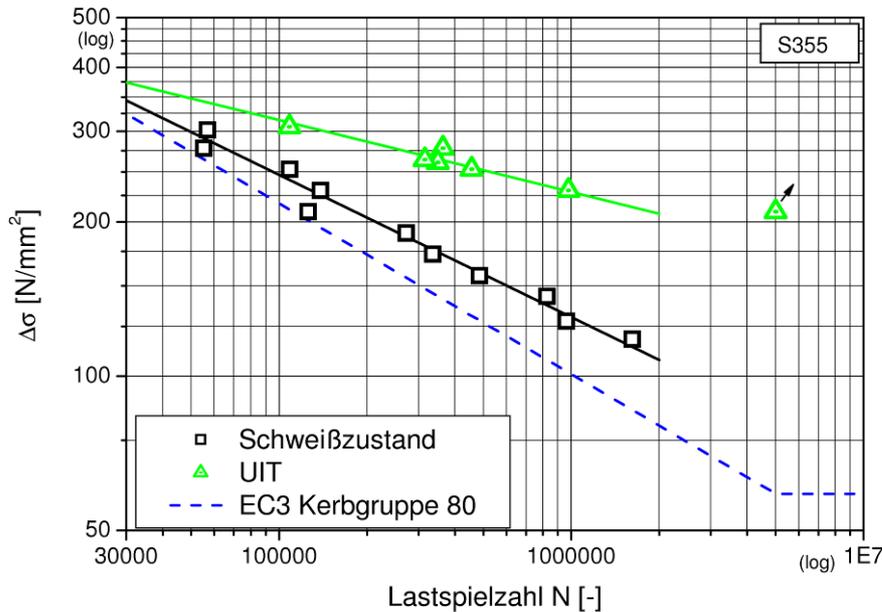


**Bild 5:** Probe mit Dehnungsmessstreifen



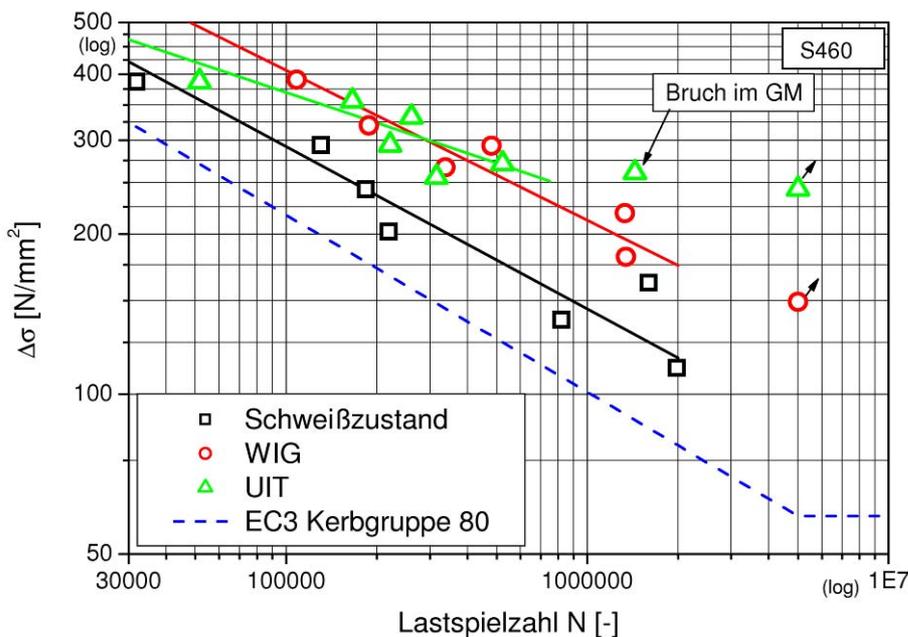
**Bild 6:** Bruch im Grundwerkstoff S690 UIT

Bild 5 zeigt die Probe vom Typ 2 eingespannt in der Prüfmaschine mit angebrachten Dehnungsmessstreifen. Im Bild 6 ist deutlich der Bruchausgang mindestens 20 mm neben der Schweißnaht zu sehen. Bei allen Proben aus S690 UIT behandelt war der Bruchausgang nicht mehr in der Schweißnaht, sondern im Grundmaterial. Bei den Proben aus dem Material S355 und S460 begann der Bruch auch bei den UIT behandelten Proben vom Schweißnahtübergang, allerdings bei bis zu 10-facher Lebensdauer. Bild 7 zeigt die Wöhlerlinie eines S355 bei einem Spannungsverhältnis  $R = 0,1$ .

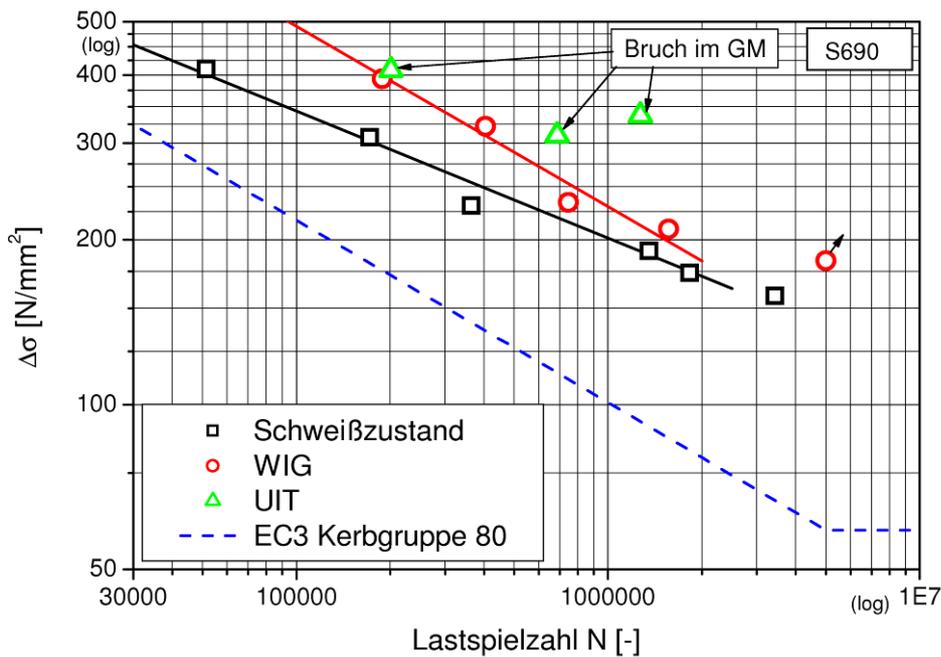


**Bild 7:** Wöhlerdiagramm des Stahles S355 Spannungsverhältnis  $R = 0,1$

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die Spannung bei einer Lastspielzahl von  $2 \times 10^6$  durch UIT um 116% erhöht werden kann, bzw. gleicher Spannung die Lebensdauer bis zum 10-fachen ansteigt. Bild 8 zeigt die Wöhlerlinie des Stahles S460. Auch hier erhöht sich die Spannung bei  $2 \times 10^6$  um 116%, während vergleichsweise mit WIG nachbehandelten Proben sich um 74% erhöhten.



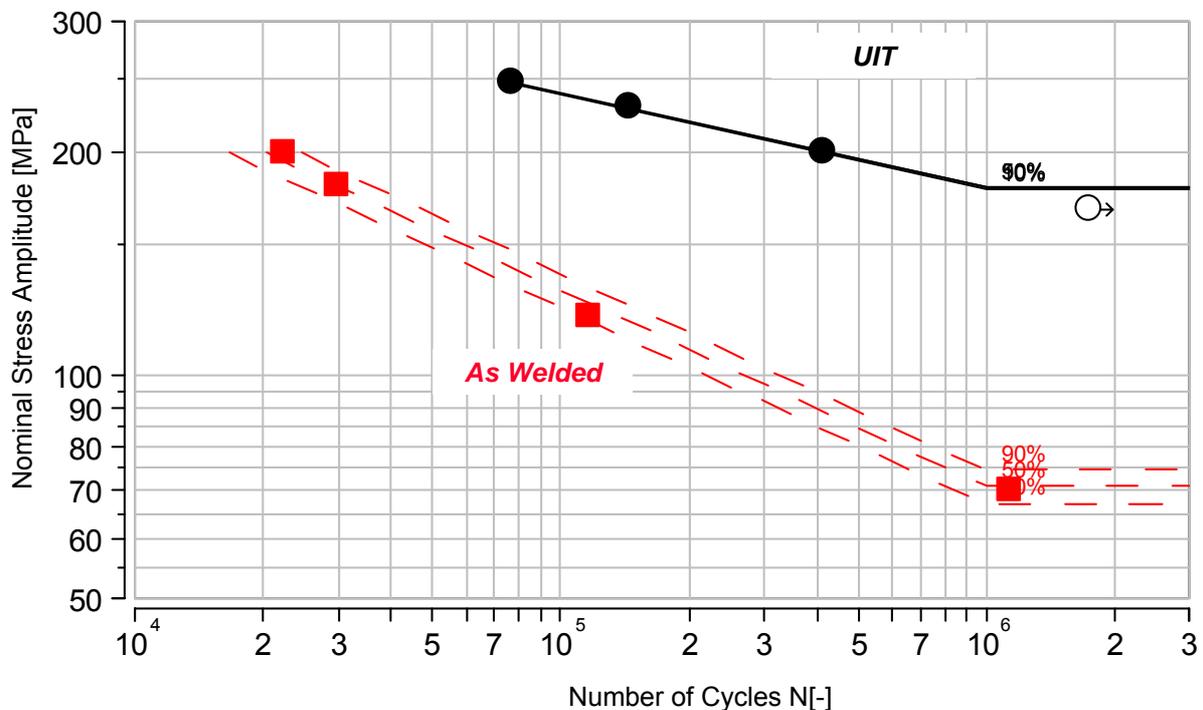
**Bild 8:** Wöhlerdiagramm des Stahles S460 Spannungsverhältnis  $R = 0,1$



**Bild 9:** Wöhlerdiagramm des Stahles S460 Spannungsverhältnis  $R = 0,1$

Bild 9 veranschaulicht deutlich, dass die UIT behandelten Proben alle im Bereich des unbeeinflussten Grundwerkstoffes gerissen sind und nicht mehr im Nahtübergangsbereich und zwar sowohl bei dem Spannungsverhältnis  $R = 0,1$  und  $R = -1$ .

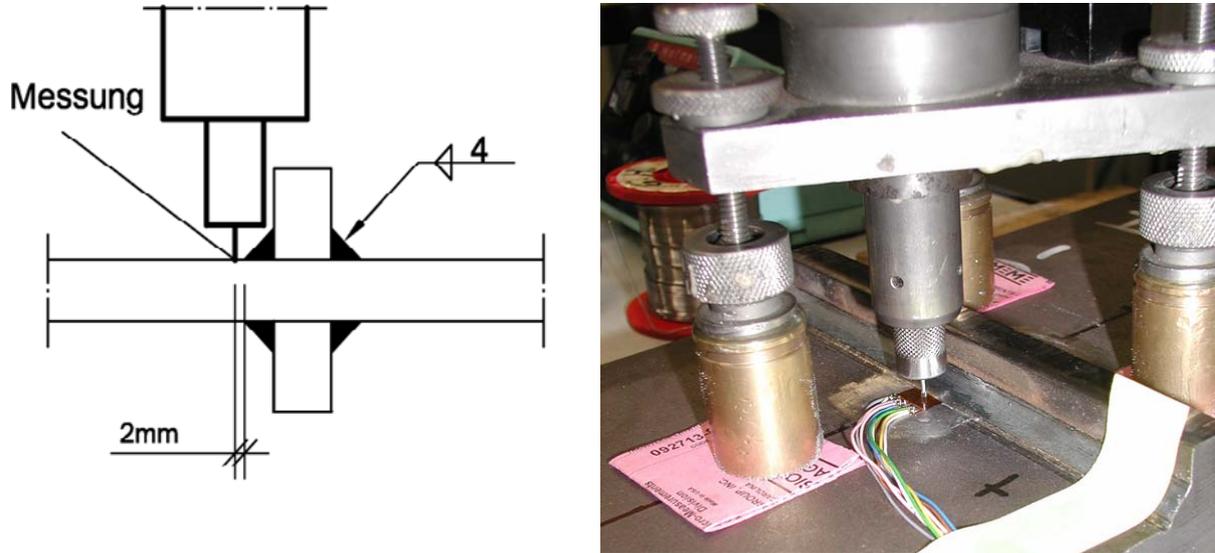
Bild 10 zeigt ein Wöhlerdiagramm des Werkstoffes S355 mit einem Spannungsverhältnis  $R = -1$  aus einer anderen Versuchsreihe an einem anderen Institut ebenfalls an einer Quersteife. Auffallend ist an allen Ergebnissen, dass die Streubreite der Wöhlerlinien nach der UIT-Behandlung deutlich geringer ist.



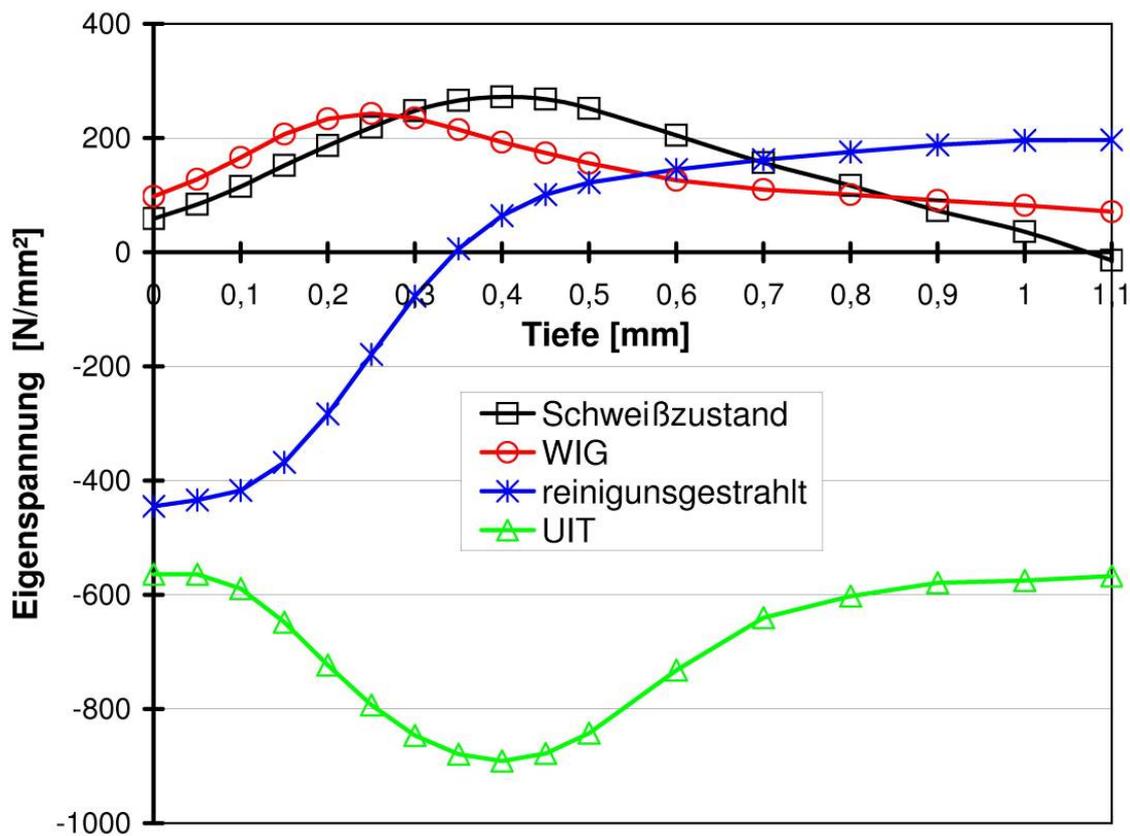
**Bild 10:** Wöhlerdiagramm Werkstoff S355 mit dem Spannungsverhältnis  $R = -1$

Der wesentliche Effekt durch die UIT-Behandlung ist neben der Verbesserung der Geometrie des Nahtüberganges das Einbringen von Druckeigenspannungen. Um hier eine Aussage machen zu kön-

nen, wurden diese Eigenspannungen vor und nach der UIT-Behandlung gemessen. Hierbei ist eine sichere Messung die Bohrlochmethode. Die Bild 11 zeigt diese Methode, während in Bild 12 das Ergebnis dargestellt ist.



**Bild 11:** Skizze und Foto der Eigenspannungsmessung nach der Bohrlochmethode

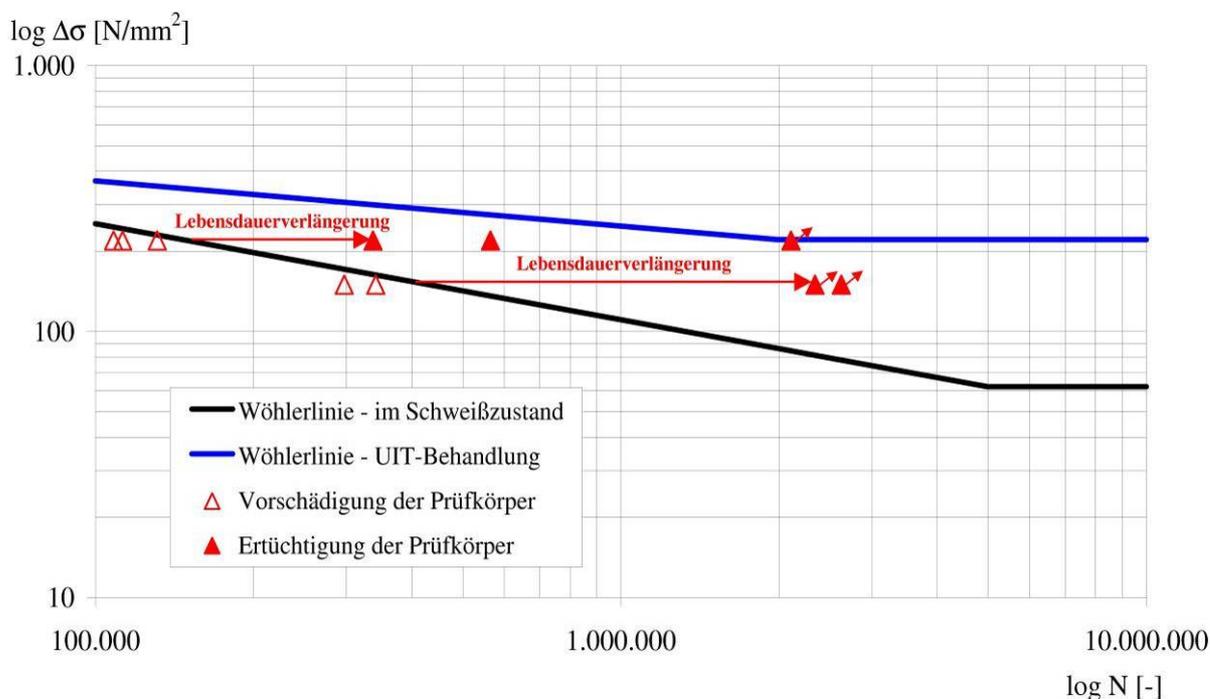


**Bild 12:** Schweißspannungen senkrecht zur Schweißnaht, Stahlsorte S690QL1

## 5 Lebensdauererweiterung durch nachträgliche Ertüchtigung mit UIT

Es liegt natürlich auch 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 Ermüdungsfestigkeit beaufschlagt. Nach einer darauf folgenden UIT-Behandlung wurde der Ermüdungsversuch weitergeführt. Die im Rahmen einer Diplomarbeit an der Uni Stuttgart ermittelten Versuchsergebnisse in Bild 13 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 13:** Lebensdauererweiterung durch nachträgliche Ertüchtigung mit UIT Beispiel Quersteife S460  
 $R = 0,1$

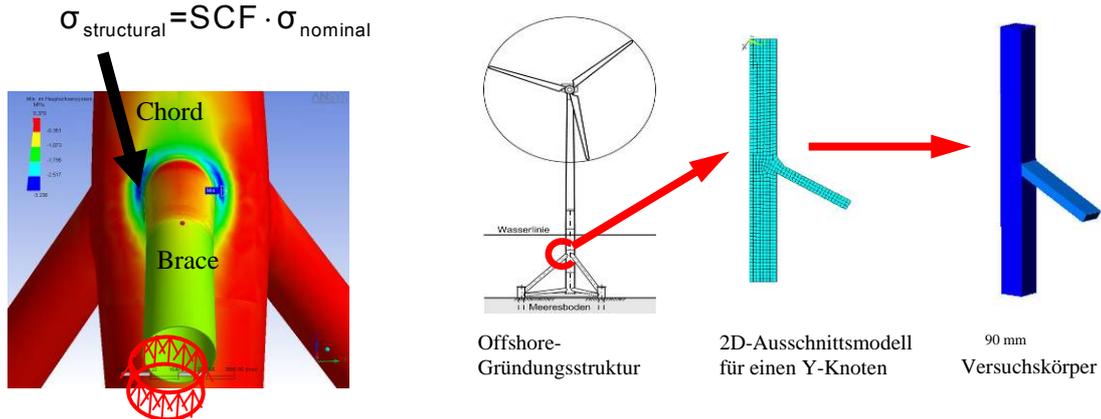
Aufgrund dieser hervorragenden Ergebnisse, die auch bereits in anderen Instituten festgestellt wurden, läuft nun ein von der EUREKA gefördertes Forschungsvorhaben unter der Federführung des Institutes für Bauteilerhaltung und Tragwerk (IBT) an der Universität Braunschweig. Der Titel dieses Vorhabens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

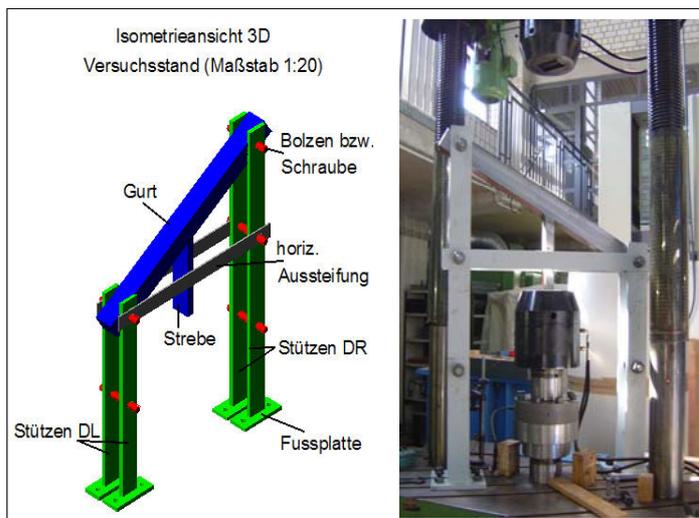
**6 UIT-Behandlung bei Windenergieanlagen**

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 14. 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 14:** Rohrknoten mit Gründungsstruktur und Geometrie der Prüfkörper

Ebenfalls in Bild 14 ist die Geometrie der Prüfkörper dargestellt, während Bild 15 den Versuchsaufbau zeigt. Die Versuche wurden auf der Prüfmaschine HUS 600 durchgeführt. Für die Lagerung der Prüfkörper im Versuchsstand war eine spezielle Auflagerkonstruktion erforderlich. Die Prüfkraft wurde vom unteren Zylinder der Prüfmaschine über eine Klemmlänge von 60 mm in die Strebe eingeleitet. Bild 16 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 17 zeigt die UIT-Behandlung des Nahtüberganges zum dickeren Gurtblech (90 mm), während Bild 18 die erreichten Ergebnisse der Proben mit und ohne UIT-Behandlung darstellt.



**Bild 15:** Versuchsaufbau

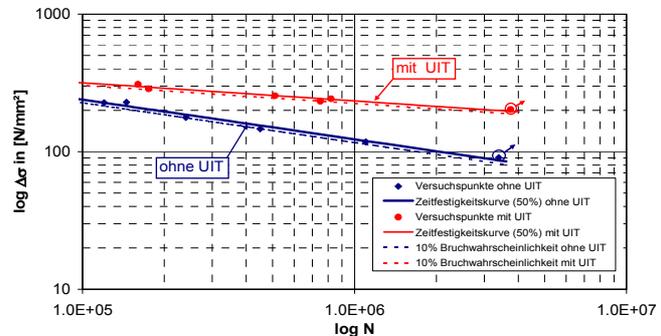


**Bild 16:** Messtechnische Vorbereitung



**Bild 17:** UIT-Behandlung der Probe

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



**Bild 18:** Ergebnisse der erreichten Lastspiele

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  $\Delta\sigma_c = 204,5 \text{ N/mm}^2$  mehr als doppelt so groß. Bereits in dem schon erwähnten Forschungsvorhaben P 620 mit dem Titel „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ der Universität Stuttgart [5], wurde festgestellt, dass bei dem höherfesten Werkstoff S690QL alle Proben im Grundwerkstoff gerissen sind. Die Anwendung dieser UIT-Technologie ermöglicht in diesem Fall eine Gewichtsreduzierung von 55.000 kg / Anlage.

## 7 Ergebnisse von Schwingfestigkeitsuntersuchungen am Werkstoff S1100QL

Bei den Mobilkränen, Tragarmen von Betonpumpen, LKW-Ladekranen, usw. wird aus Gewichtsgründen immer mehr der Werkstoff S1100QL eingesetzt. Da auch hier die Bauteile dynamisch beansprucht werden, hat die Firma ThyssenKrupp Stahl in Zusammenarbeit mit ESAB B.V. in Holland und Applied Ultrasonics Schwingversuche mit und ohne UIT-Behandlung durchgeführt. In den Tabellen 2 und 3 sind die chem. Zusammensetzung und mechanisch technologischen Werte des verwendeten Grundwerkstoffes XABO 1100 aufgeführt.

**Tabelle 1:** Chemische Zusammensetzung in %

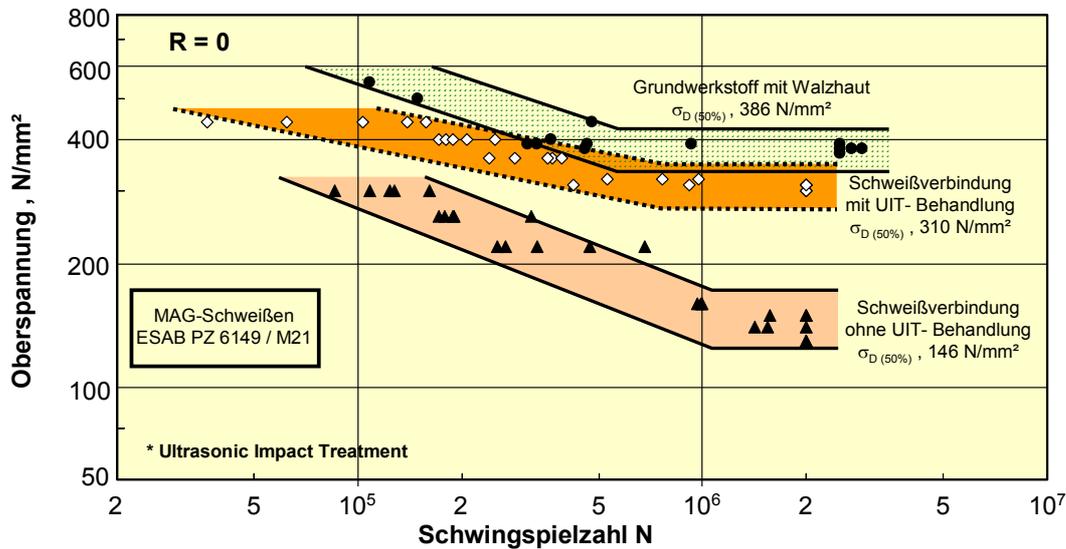
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Cu	Mo	N	Ni	V	CET
0,16	0,31	0,96	0,012	0,002	0,033	0,62	0,04	0,62	0,0078	1,93	-	0,40

**Tabelle 2:** Mechanisch technologische Werte

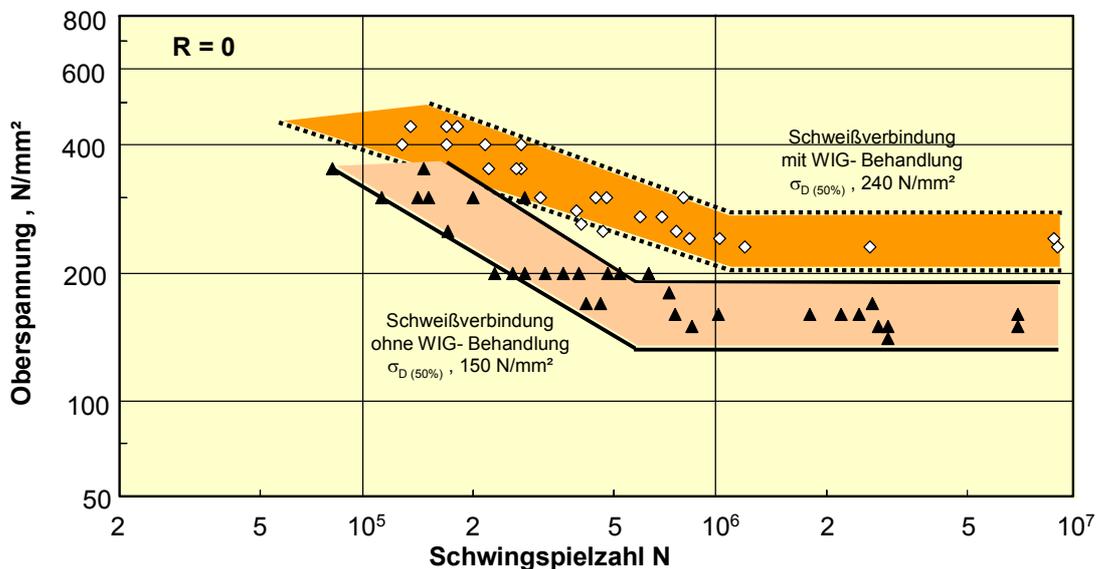
Blechdicke (mm)	Schmelze	$R_e$ (N/mm <sup>2</sup> )	$R_m$ (%)	$R_e/R_m$ -40 °C (J)	$A_5$	$A_v$ bei
10	636058	1189	1427	83	10	40, 41, 44

Bei den mechanisch-technologischen Eigenschaften zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den unbehandelten und UIT behandelten Schweißverbindungen. Die Überprüfung der Schwingfestigkeit wurde an Flachzugproben mit einer Probenbreite im Schweißnahtbereich von 30 mm durchgeführt. Die Untersuchungen wurden auf einem 600 kN-Horizontal-Resonanzpulsler als Zug-Schwellversuche mit einem Spannungsverhältnis von  $R = 0$  durchgeführt. Die Lastspielfrequenz be-

trug etwa  $2000 \text{ min}^{-1}$ . Wegen der bei Schwingversuchen üblichen Streuung wurden je Versuchsdurchgang 30 Proben eingesetzt. Zum Vergleich dienten ungeschweißte XABO 1100 Proben mit Walzhautoberfläche. Bild 19 gibt Auskunft über das Schwingverhalten der mit Fülldraht geschweißten Verbindung. Hieraus ist ersichtlich, dass ähnliche Ermüdungsfestigkeitssteigerungen wie bei den Stählen S355 und S460 nämlich ca. 110% sowie eine Lebensdauererlängerung um das ca. 10-fache und mehr. Außerdem erreichen die Werte fast die des unbeeinflussten Grundwerkstoffs.



**Bild 19:** Schwingfestigkeitswerte Stumpfstoß XABO 1100 UIT behandelt



**Bild 20:** Schwingfestigkeitswerte Stumpfstoß XABO 1100 WIG behandelt

Als Vergleich zeigt Bild 20 die erreichten Werte durch die Behandlung nach dem WIG-Aufschmelzverfahren, die jedoch nur eine Verbesserung der Schwingfestigkeit um ca. 60% brachte.

## 8 Andere Anwendungsgebiete

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 zu verzichten zu können. Die wurde bereits mit Er-

folg an bestimmten Bauteilen und Werkstoffen auch durch Abnahmegesellschaften akzeptiert. Im Mai/Juni 2007 wurde in Rotterdam eine Bohrinsel von Nobel Drilling bereit erfolgreich mit der UIT-Technologie saniert.

Durch den problemlosen Einsatz auf Baustellen eignet sich das UIT Verfahren auch bei Reparaturen, zum Beispiel Bronzepropeller, Weichen und Kreuzungsstücke an Eisenbahnschienen, da in diesem Fall auch auf eine Spannungsarmglühung verzichtet werden kann. Bei Kavitationsschäden an Schiffschrauben können diese heute unter Wasser ausgeschliffen, geschweißt und auch unter Wasser UIT behandelt werden, d.h. das Schiff muss nicht mehr ins Trockendock eingebracht werden und kann somit nach kurzer Reparaturzeit den Hafen wieder verlassen.

## 9 Zusammenfassung

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 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 Schweißnaht-Nachbehandlungsverfahren ist UIT wesentlich besser bei deutlich geringerem gerätetechnischen 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 Verfahren für alle metallischen Werkstoffe geeignet. Täglich kommen neue Anwendungen hinzu. Es wurden auch an der Universität Stuttgart UIT -Behandlungen an bereits vorgeschädigten Proben durchgeführt. Mit diesen Untersuchungen sollte festgestellt werden, ob durch eine nachträgliche UIT-Behandlung ebenfalls solch deutliche Lebensdauererhöhungen erreicht werden. Das wäre dann für eine vorbeugende Behandlung, bzw. Sanierung von zum Beispiel Brückenbauwerken und weitere dynamisch belastete Konstruktionen interessant. Diese Untersuchungen werden zurzeit mit dem europäischen Forschungsvorhaben „Refresh“ unter der Federführung von dem Institut für Bauteilerhaltung und Tragwerk der Universität Braunschweig durchgeführt. Durch solche Lebensdauer verlängernde Maßnahmen bestehender Bauteile entsteht ein erheblicher volkswirtschaftlicher Nutzen.

## 10 Literatur

- [1] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1-1 Juni 1999
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbau, DASt-Richtlinie 011, Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm<sup>2</sup> Februar 1988
- [3] Muck, A.: Ertüchtigung von ermüdungsbeanspruchten Schweißverbindungen durch Anwendung von UIT: Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwicklung
- [4] Forschungsbericht P 620 „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
- [5] Kuhlmann, U., Bergmann, J., Dürr, A., Thumser, R., Günther, H.-P., Gerth, U.: Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten höherfesten Baustählen durch Anwendung von Nachbehandlungsverfahren Stahlbau 74 (2005) Heft 5 S. 358-365
- [6] Statnikov, E.S.; Muktepavel, V.O.; Kuzmenko, A.Z.; Blomquist, A.; Comparison of ultrasonic impact treatment (UIT) and other fatigue life improvement methods, IIW Document XIII 1817-00
- [7] Germanischer Lloyd: Rules and Regulations IV Non-marine Technology Part 2- Offshore Wind Energy, Germanischer Lloyd Windenergie, Hamburg 2004
- [8] Schaumann, P.; Keindorf, Ch.; Wilke, F.: Abschlussbericht zum Thema: „Experimentelle und Numerische Untersuchungen von Knotenverbindungen für Offshore Strukturen“