

# Die *Esonix*<sup>®</sup> Ultrasonic Impact Technology – eine Methode zur Erhöhung der Lebensdauer von Schweißkonstruktionen

**Peter Gerster**

Kapellenstraße 173 D-89584 Ehingen/Do.

Telefon: +49(0)7391/757621 Telefax: +49(0)7391/757617

E-Mail: [Gersterp@aol.com](mailto:Gersterp@aol.com)

## 1 Tragfähigkeit von Schweißverbindungen

Obwohl die schweißtechnische Verarbeitung als beherrscht angesehen werden kann, gelten nach der „Änderung und Ergänzung der Anpassungsrichtlinie Stahlbau – Ausgabe Dezember 2001“ und der „Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-30.1-1, Juni 1999“ stärkere Reduzierungen für die Beanspruchbarkeit von Schweißverbindungen aus hochfesten Stählen als für normalfeste Stähle, was durch eingeschränkte Werte im Fall von Kehlnähten oder nicht geprüften voll durchgeschweißten Nähten ausgedrückt wird.

Aus den sehr restriktiven Regelungen der DIN 18800 und dem Eurocode EC 3 ergeben sich entsprechend große Schweißvolumina. Dies schränkt nicht nur die Wirtschaftlichkeit der hochfesten Stähle ein – größere Schweißvolumina führen auch zu höheren Eigenspannungen und höheren Schrumpfungen, was wiederum einen höheren Richtaufwand zur Folge haben kann.

Diese einschränkende Regelungen auf schweißtechnischer Seite stehen zur Zeit in Überprüfung. Erste Zwischenergebnisse lassen durchaus die Vermutung zu, dass die oben angesprochenen Einschränkungen zu restriktiv, wenn nicht sogar nicht begründet sind. In diesem Bericht werden unter anderem die hervorragenden Zwischenergebnisse der Untersuchungen aus dem AIF-Forschungsprojekt P 620 des Institutes für Konstruktion und Entwurf an der Universität Stuttgart sowie der MFPA der Bauhaus-Universität Weimar vorgestellt. Thema des Projektes:

**„Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“**

## 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 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. Die DAST-Richtlinie 011 dagegen gibt in Anlehnung an DIN 15018 bzw. DIN 4132 einen Betriebsfestigkeitsnachweis für hochfeste Stähle, der Vorteile gegenüber normalfesten Stählen bei tendenziell niedrigen Beanspruchungsgruppen, geringerer Kerbschärfe sowie bei Überlagerung positiver Mittelspannungen, das heißt R-Werten im positiven Bereich vorsieht.

Um der Einschränkung der Vorzüge hochfester Stähle bei schwingender Beanspruchung zu begegnen, erscheint es vorteilhaft, Schweißnähte möglichst in wenig belastete Bereiche der Konstruktion zu legen. Darüber hinaus gibt es seit langem Bestrebungen, die Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen durch geeignete Nachbehandlungsverfahren der Schweißnähte zu verbessern. Zur Anwendung kommen dabei Schleifen, WIG-Aufschmelzen der Nahtübergänge, Hämmern und Kugelstrahlen.

Der Verbesserungseffekt beruht im Fall des Schleifens und des WIG-Aufschmelzens auf einer Verringerung der Kerbwirkung der Einbrandkerbe; beim Hämmern und Kugelstrahlen werden dagegen günstige Druckeigenspannungen in Oberflächennähe aufgebaut.

In Mitteleuropa noch wenig bekannt ist die UIT-Behandlung, eine Ultraschall-Schlagbehandlung, bei der der Nahtübergang unter sehr hoher Frequenz (circa 27 kHz) gehämmert wird, womit auch hier die Oberflächen verfestigt und Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich induziert werden sowie der Nahtübergang wesentlich verbessert wird. Dieses Verfahren zeichnet sich durch einfache Bedienbarkeit und hohe Reproduzierbarkeit aus.

Tabelle 1 zeigt, dass die Verbesserung der Schwingfestigkeit dieses Verfahrens auf mehreren Effekten beruht und somit die erreichte Lebensdauererhöhung mit keinem der bisherigen Verfahren allein erreicht wird. Wie die Ergebnisse noch zeigen, kann bei diesem Verfahren sogar die Schwingfestigkeit des Grundwerkstoffes erreicht werden.

**Tab. 1:** Vergleich der verschiedenen Nachbehandlungsverfahren

TECHNOLOGIE	SCHLEIFEN	KUGEL- STRAHLEN	HÄMMERN & NADELN	SPANNUNGS- ARMGLÜHEN	WIG NACHBE- HAND- LUNG	<i>Esonix</i> <sup>®</sup> ULTRASONIC IMPACT TECHNOLOGY
ERGEBNIS						
ERHÖHUNG DER BETRIEBSFESTIGKEIT	●	●	●	●	●	●
ERHÖHUNG DER KOROSSIONS- BESTÄNDIGKEIT		●				●
VERMINDERUNG DES SCHWEISSVERZUGES			●	●		●
VERMINDERUNG DER EIGENSPANNUNGEN				●		●

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, Kugelstrahlen, 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.

### 3 Die *Esonix*® Ultrasonic Impact Technology (UIT)

#### 3.1 Geschichte von UIT

Die *Esonix*® 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.

#### 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.

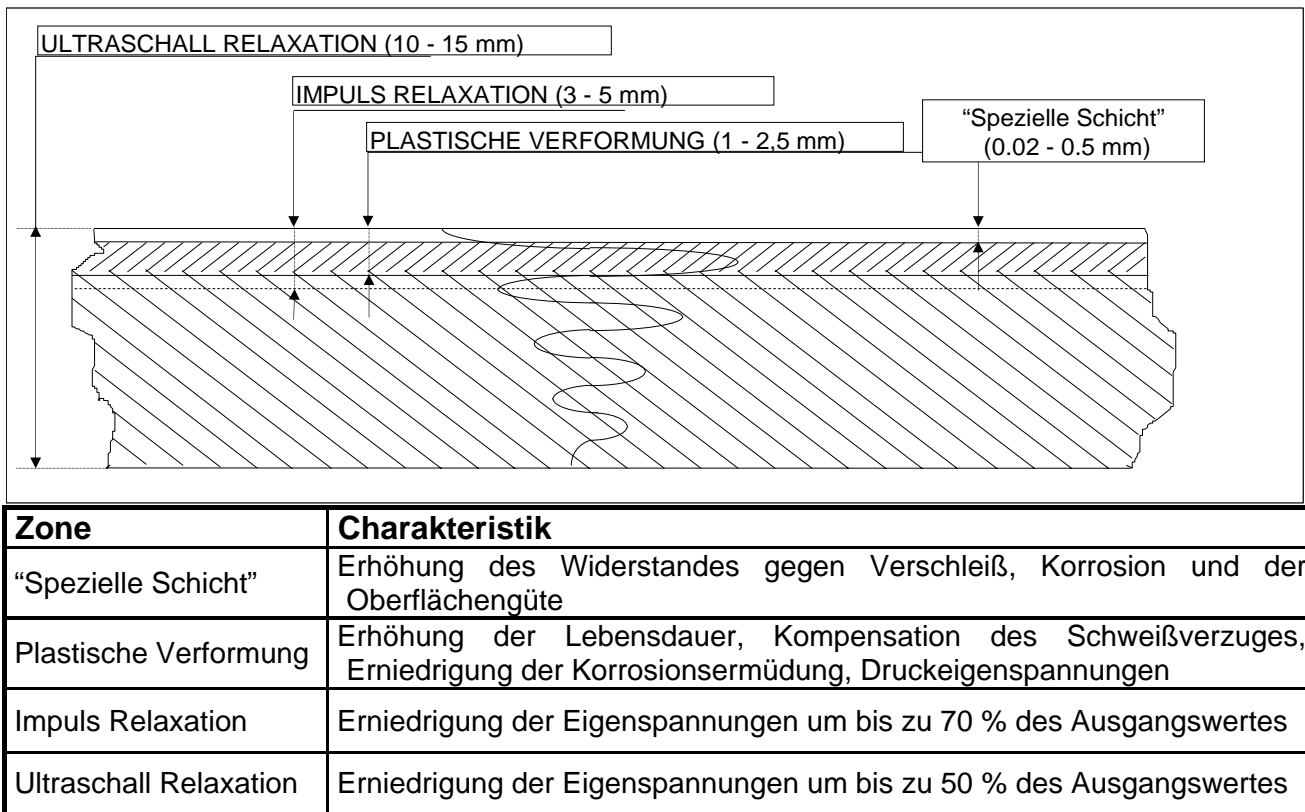


Abb. 1: UIT Ausrüstung



Abb. 2: Behandlung einer Schweißnaht

Die Standardausrüstung (siehe Abb. 1) 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.



**Abb. 3:** 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 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 5 mm - abhängig von den Materialeigenschaften
- Reduzierung von Zugeigenstressungen
- Erhöhung der mechanisch technologischen Eigenschaften
- Verbesserung der Eigenschaften der Oberfläche und unter der Oberfläche

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

#### 4. Zwischenergebnisse aus dem AIF-Forschungsprojekt P 620

Ziel dieses Projektes ist 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. Tabelle 2 zeigt das komplette Testprogramm.

Tab. 2: Test Programm für Kleinprobentests und Trägertests

Probe	Einflussfaktor	Material	Behandlung	Blechedicke	Spannungsverhältnis
 Kleinproben Teststück	Referenztest	S355 S460 S690	geschweißt WIG-behandelt UIT	12mm	R = 0.1
	Spannungsverhältnis	S690	geschweißt UIT	12mm	R = -1 R = 0.5
	Dickeneinfluss	S690	geschweißt UIT	25mm	R = 0.1
Trägertest	Größeneffekt	S690	geschweißt UIT	12mm	R = -1 R = 0.1



Abb. 4: Kleinproben Typ 1

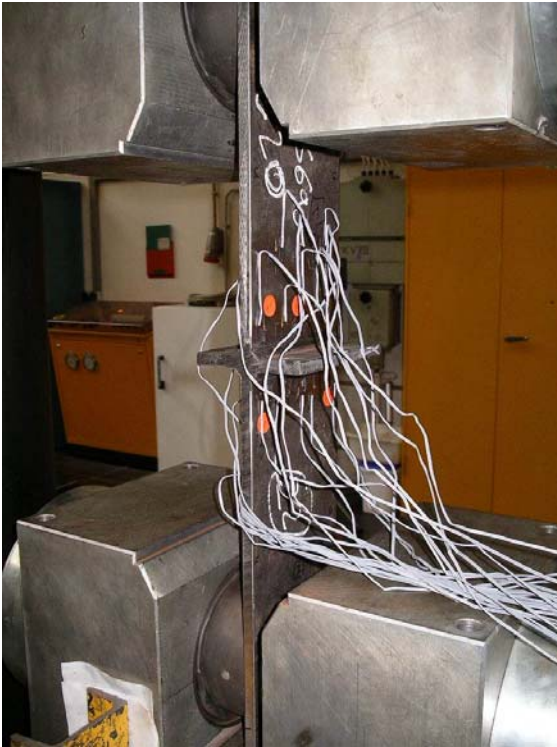


Abb. 5: Kleinproben Typ 2+3

Neben den Kleinproben wurden auch 12 komplette 4 m lange Träger aus S690 geschweißt um eine gesicherte Aussage machen zu können. Bei den Träger 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.

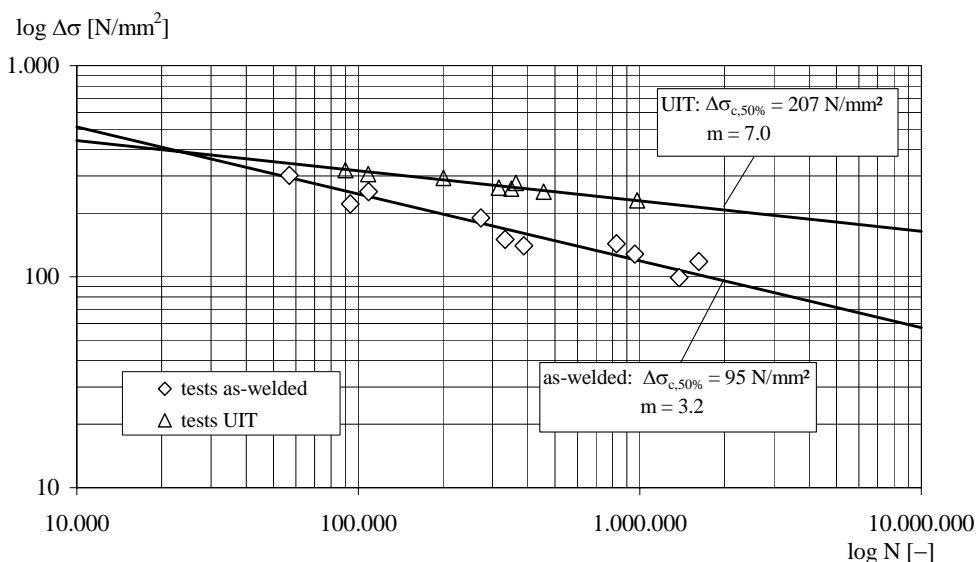


Die ersten Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zu den Kleinprüfkörper die Trägernahat „im Schweißzustand belassen“ die Ermüdungsfestigkeit um ca. 20% geringer lag, die Anrisse aber immer von den Schweißnähten der Quersteifen ausgingen. Bei den UIT behandelten Träger lagen die Anrisse nicht mehr in diesem Bereich, sondern jeweils in der Längsnaht der Träger, bei mindestens doppelter Lebensdauer.



**Abb. 6:** Probe mit Dehnungsmessstreifen **Abb. 7:** Bruch im Grundwerkstoff S690 UIT

Abbildung 6 zeigt die Probe vom Typ 2 eingespannt in der Prüfmaschine mit angebrachten Dehnungsmessstreifen. In der Abbildung 7 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. Abbildung 8 zeigt die Wöhlerlinie eines S355 bei einem Spannungsverhältnis  $R = 0,1$ .



**Abb. 8:** Wöhlerlinie 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. Abbildung 9 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.

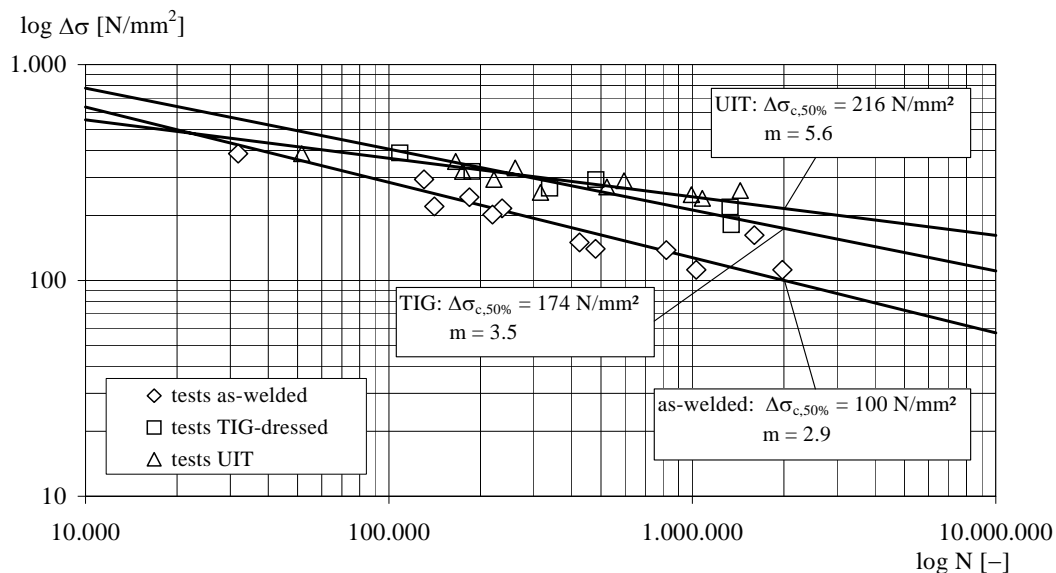


Abb. 9:  
Wöhlerlinie  
Stahl S460  
R = 0,1

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 können, wurden diese Eigenspannungen vor und nach der UIT-Behandlung gemessen. Hierbei ist eine sichere Messung die Bohrlochmethode. Die Abbildung 10 zeigt diese Methode, während in Abbildung 11 das Ergebnis dargestellt ist.

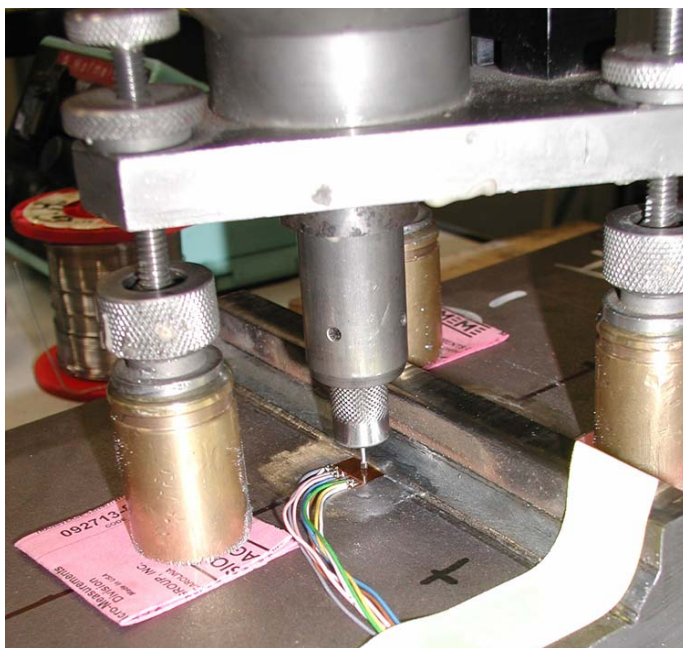
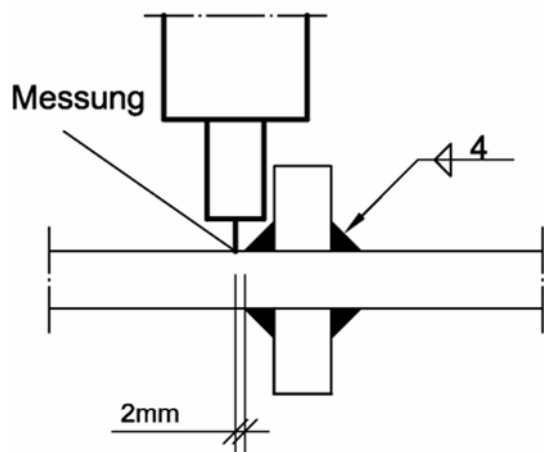


Abb. 10: Skizze und Foto der Eigenspannungsmessung nach der Bohrlochmethode

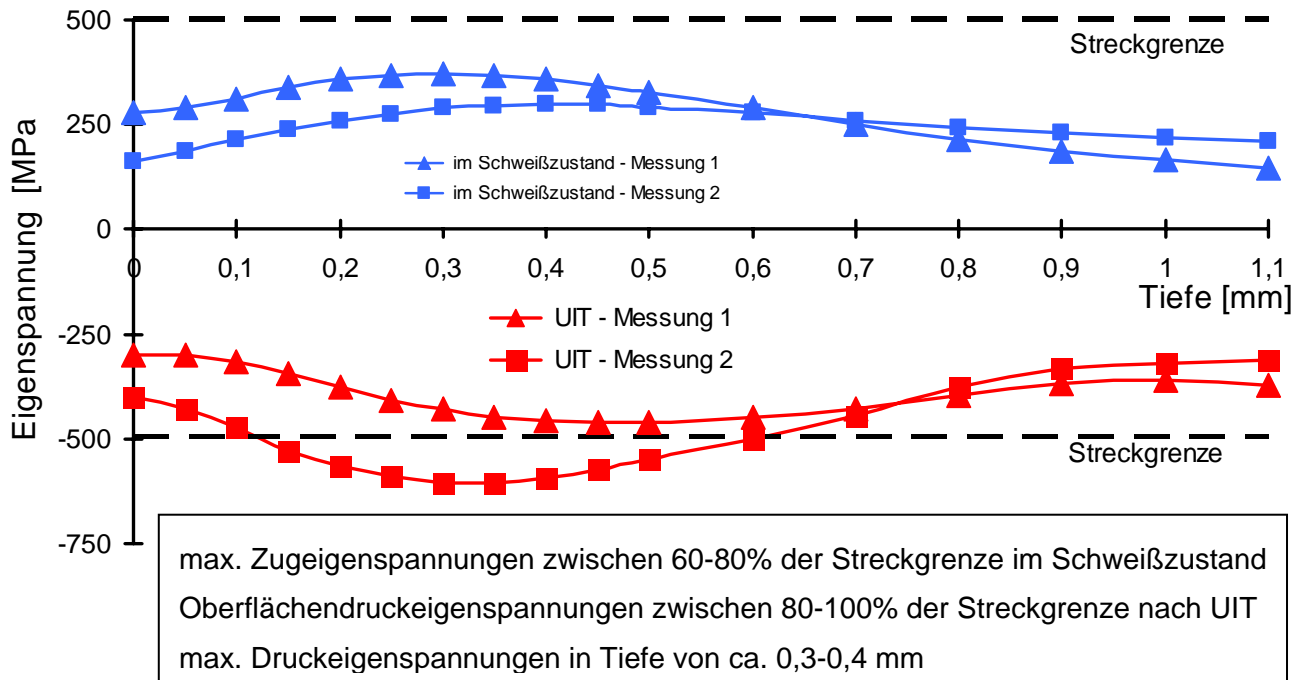


Abb. 11: Eigenspannungsmessungen am Werkstoff S460ML senkrecht zur Naht

### 5. Ergebnisse von Schwingfestigkeitsuntersuchungen am Werkstoff S1100QL

Bei den Mobilkränen, Tragarmen von Betonpumpen, LKW-Ladekränen, 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 3 und 4 sind die chem. Zusammensetzung und mechanisch technologischen Werte des verwendeten Grundwerkstoffes XABO 1100 aufgeführt.

Tab. 3: 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

Tab. 4: Mechanisch technologische Werte

Blechedicke (mm)	Schmelze	$R_e$	$R_m$	$R_e/R_m$	$A_5$	$A_v$ bei -40 °C (J)
		(N/mm <sup>2</sup> )		(%)		
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 betrug 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. Abbildung 12 gibt Auskunft über das Schwingverhalten der mit Fülldraht geschweißten Verbindung. Hieraus ist ersichtlich, dass ähnliche Festigkeitssteigerungen 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.

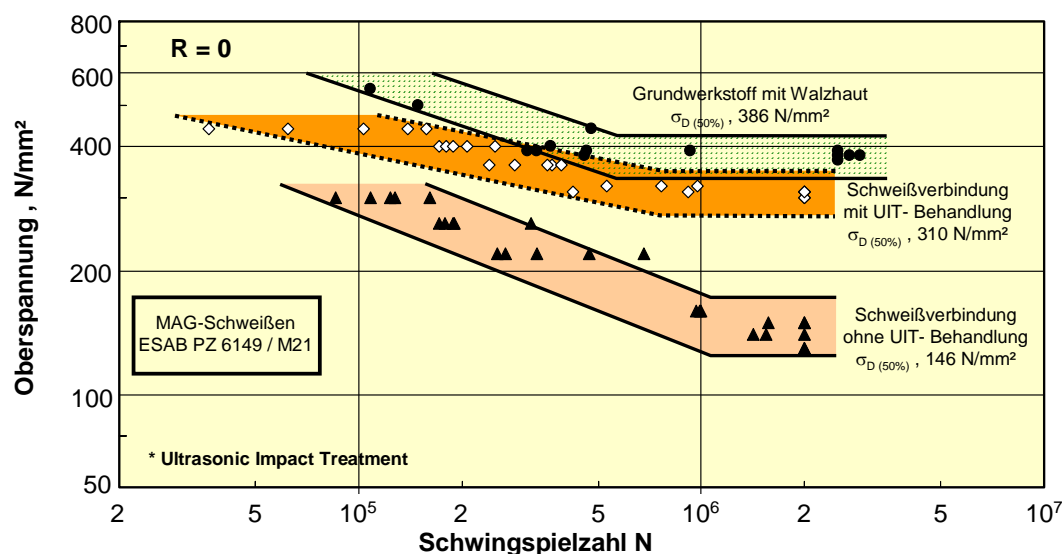


Abb. 12: Schwingfestigkeitswerte Stumpfstoß XABO 1100 UIT behandelt

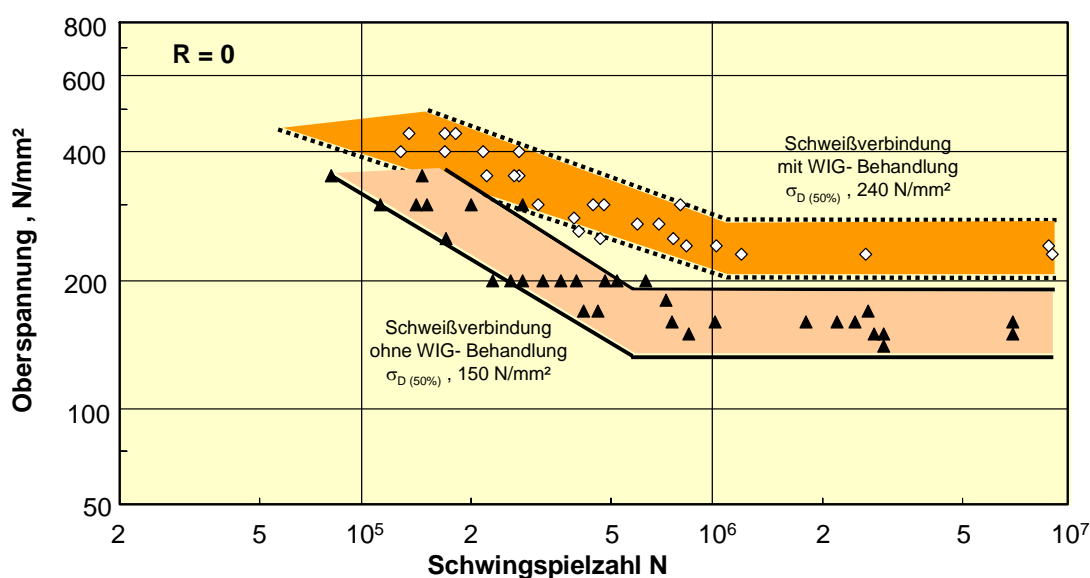


Abb. 13: Schwingfestigkeitswerte Stumpfstoß XABO 1100 WIG behandelt

Als Vergleich zeigt die Abbildung 13 die erreichten Werte durch die Behandlung nach dem WIG-Aufschmelzverfahren, die jedoch nur eine Verbesserung der Schwingfestigkeit um ca. 60% brachte.

## 6. Andere Anwendungsgebiete

Durch die plastische Verformung der Oberfläche und somit Einbringung von Druckeigen-  
spannungen werden die Zugeigen-  
spannungen im Bauteil praktisch eliminiert. So laufen zurzeit Versuche durch die UIT-Behandlung auf eine Spannungsarmglühung zu verzichten zu können. Die wurde bereits mit Erfolg an bestimmten Bauteilen und Werkstoffen auch durch Abnahme-gesellschaften akzeptiert. Ein weiteres Betätigungsfeld ist die Dimensio-  
nierung von Windkraftanlagen. Auch hier laufen Projekte mit den Herstellern, Abnahme-  
gesellschaften und Universitäten.



Abb. 14: Windkraftanlagen Offshore

Durch den problemlosen Einsatz auf Baustellen eignet sich das UIT Verfahren auch bei Reparaturen, zum Beispiel Bronzepropeller, Weichen und Kreuzungstücke an Eisenbahn-  
schienen, da in diesem Fall auch auf eine Spannungsarmglühung verzichtet werden kann.

## 7. 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 metallische Werkstoffe geeignet. Täglich kommen neue  
Anwendungen hinzu. Zurzeit werden auch an der Universität Stuttgart UIT -Behandlungen  
an bereits vorgeschädigten Proben durchgeführt. Mit diesen Untersuchungen soll festge-  
stellt werden, ob durch eine nachträgliche UIT-Behandlung ebenfalls solch deutliche  
Lebensdauererhöhungen erreicht werden. Die wäre dann für eine vorbeugende Behand-  
lung, bzw. Sanierung von zum Beispiel Brückenbauwerken und weitere dynamisch  
belastete Konstruktionen interessant.

## 8. 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] Hamme, U.; Hauser, J.; Kern, a.; Schriever, U.; Einsatz hochfester Baustähle im Mobilkranbau; Stahlbau 69 (2000) 4, 295-305
- [4] Dürr, A.: Ermüdungsverhalten von höherfesten Baustählen S460TM und S690QL im Stahlbau, Dissertation in Vorbereitung, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf
- [5] Wegmann, H.: ThyssenKrupp Stahl Bericht Av-we 279/PCG-TM-03/04 vom 06.01.2004
- [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