

Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten höherfesten Baustählen durch Anwendung von Nachbehandlungsverfahren

Ulrike Kuhlmann

Joachim Bergmann

André Dürr

Rayk Thumser

Hans-Peter Günther

Uwe Gerth

Nach dem bisherigen Kenntnisstand haben geschweißte höherfeste Stähle die gleiche Ermüdungsfestigkeit wie geschweißte niedrigfeste Stähle. Um höherfeste Stähle auch in ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen effektiv einsetzen zu können bedarf es daher zusätzlicher Anstrengungen um die Ermüdungsfestigkeit zu erhöhen, z.B. durch Anwendung von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren. Im Stahlbau besteht jedoch bis heute nicht die Möglichkeit die positiven Effekte einer Schweißnahtnachbehandlung normativ zu berücksichtigen.

In dieser Arbeit werden erste Ergebnisse eines laufenden Forschungsprojekts vorgestellt, in dem die Effektivität des Schweißnahtnachbehandlungsverfahrens WIG-Aufschmelzen und des neuartigen Verfahrens „Ultrasonic Impact Treatment“ (UIT) zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen untersucht wird.

1 Einleitung

Der Stahlindustrie ist es in den letzten Jahren gelungen, wettbewerbsfähige höherfeste Stähle ($f_{y,k} > 400 \text{ N/mm}^2$ bis 1100 N/mm^2) zu entwickeln, deren Festigkeit nicht wie bei Stählen der älteren Generation durch Zuführung entsprechender Legierungsanteile, sondern durch ein geeignetes Zusammenspiel von Walz- und Wärmebehandlungsverfahren erfolgt [1]. Diese neuen Stahlsorten erfüllen damit die Forderungen der Stahlbaupraxis nach einer hohen Festigkeit bei gleichzeitig guter Schweißbarkeit und guter Zähigkeit [1]-[5]. Höherfeste Stähle sind daher für den Einsatz in leichten und hochbeanspruchten Konstruktionen prädestiniert und führen neben dem reduzierten Materialverbrauch auch zu einer Verbesserung der Öko-Bilanz von Stahlkonstruktionen. Als einer der Hauptgründe für den noch immer verzögerten Einsatz von höherfesten Stählen in Konstruktionen unter wechselnder Beanspruchung ist die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen zu nennen, da die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen im un-

behandelten Zustand im Gegensatz zum ungeschweißten Grundwerkstoff weitestgehend unabhängig von der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs ist. Aus diesem Grunde beschränkt sich die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit in den derzeit gültigen Normen im Brückenbau [6] sowie in den zukünftigen europäischen Stahlbaunormen [7] lediglich auf den Kerbfall sowie auf die Spannungsschwingbreite unabhängig von der Streckgrenze. Eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit, lokal begrenzt auf die wesentlichen Konstruktionsdetails eines Tragwerks, ist daher für den Einsatz von höherfesten Stählen von großer Bedeutung. Effektive Verfahren zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit sind Schweißnahtnachbehandlungsverfahren, deren positiven Effekte im Stahlbau jedoch bisher nicht ausnutzbar sind.

Im Rahmen des laufenden AiF-Forschungsprojekts „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ werden am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart und an der Materialforschungs- und Prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar die Anwendung und die Effektivität der Nachbehandlungsverfahren WIG-Aufschmelzen und UIT (Ultrasonic Impact Treatment) zur Steigerung der Ermüdungsfestigkeit eines typischen Konstruktionsdetail des Stahlbaus, der Quersteife eines Biegeträgers, untersucht und gegenüber gestellt. Hierzu werden im Folgenden erste Ergebnisse der Versuche an Klein- und Großprüfkörpern aus den Stahlsorten S355, S460 und S690 sowie von Bauteilversuchen an Trägern aus der Stahlsorte S690 dargestellt.

2 Anwendung höherfester Baustähle

2.1 Allgemeines

Höherfeste Stähle können vor allen in Tragwerken eingesetzt werden, bei denen die statische Festigkeit bemessungsmaßgebend ist und die Kriterien der Verformungen, Stabilität und Ermüdung von untergeordneter Bedeutung sind. In ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen können die Vorzüge der höheren statischen Festigkeit bisher jedoch nur beschränkt ausgenutzt werden, da schlankere Querschnitte zu einer vergleichsweise höheren Ermüdungsbeanspruchung führen und die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen unabhängig von der Streckgrenze erfolgt.

2.2 Kranbau

Der Einsatz von höher- und hochfesten Baustählen ermöglicht insbesondere im Mobilkranbau eine Leichtbauweise mit hoher Tragfähigkeit und geringem Eigengewicht. Eine vorteilhafte Anwendung von höher- und hochfesten Baustählen bietet sich jedoch bisher nur dann an, wenn bei Abwendung von niedrigfesten Baustählen nicht die Ermüdungsfestigkeit sondern die statische

Festigkeit bemessungsmaßgebend ist [8]. Um der Einschränkung der Vorzüge von höher- und hochfesten Stählen zu begegnen, sind entweder kerbscharfe Schweißdetails in wenig beanspruchte Bereiche der Konstruktion zu legen oder es ist andernfalls ein Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit für das maßgebende Kerbdetail erforderlich [9]. Daher sind derzeit auch im Kranbau Bestrebungen im Gange die Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höher- und hochfesten Stählen durch Anwendung von geeigneten Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung zu verbessern [8], [10].

2.3 Schiffbau

Auch im Schiffbau tritt das Gewichtsproblem von Schiffen zunehmend in den Vordergrund. Die Tendenz zum Bau mit höherfesten Stählen nimmt dabei mit der Größe des Schiffes zu [11]. Vorbehalte zur Verwendung von höherfesten Stählen bestehen auch hier hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit, da bei Vorhandensein schweißtechnisch oder konstruktiv bedingter Kerben das höhere Festigkeitsniveau von höherfesten Stählen gegenüber niedrigfesten Stählen nicht völlig ausgeschöpft werden kann [11], [12], [13].

2.3 Brückenbau

Im Brückenbau ist der Einsatz von höherfesten Baustählen bisher noch sehr beschränkt. Als ein Hauptgrund für den immer noch verzögerten Einsatz ist unter anderen die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen zu nennen.

Der Einsatz von höherfesten Stählen scheint jedoch besonders für den Verbundbrückenbau sinnvoll, da Verbundbrücken im Vergleich zu reinen Stahlbrücken ein im Verhältnis zur Verkehrslast höheres Eigengewicht haben und damit eine geringere Ermüdungsbeanspruchung besitzen. Im Rahmen einer umfangreichen Parameterstudie wurden daher die Anwendungsmöglichkeiten von höherfesten Stählen im Straßen-Verbundbrückenbau untersucht [14], [15]. Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen einen steigenden Einfluss des Ermüdungsnachweises bei Anwendung von höherfesten Stählen bei kurzen und mittleren Spannweiten. Das hohe Festigkeitspotential von höherfesten Stählen kann somit häufig nicht ausgenutzt werden. Ursache ist hierfür z.B. der für die Dimensionierung der Zuggurte im Feldbereich bemessungsmaßgebende Ermüdungsnachweis am Konstruktionsdetail der Quersteife. Ein effektiver Einsatz von höherfesten Stählen kann allerdings ermöglicht werden, wenn die Ermüdungsfestigkeit am Konstruktionsdetail der Quersteife in Bereichen mit hohen Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ lokal erhöht wird, z.B. durch Anwendung von geeigneten Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung.

3 Ermüdungsverhalten höherfester Stähle

Die Ermüdungsfestigkeit von ungeschweißten, polierten Versuchsproben nimmt nahezu linear mit der Streckgrenze zu [16]. Es kann daraus geschlossen werden, dass das Grundmaterial von höherfesten Stählen im kerbfreien Zustand ein besseres Ermüdungsverhalten im Vergleich zum Grundmaterial von niedrigfesten Stählen besitzt. Mit steigender Kerbwirkung wird jedoch der Einfluss der Zugfestigkeit des Grundmaterials auf die Ermüdungsfestigkeit geringer, siehe Bild 1. Bei sehr scharfen Kerben ist die Ermüdungsfestigkeit daher nahezu unabhängig von der Streckgrenze des Grundmaterials.

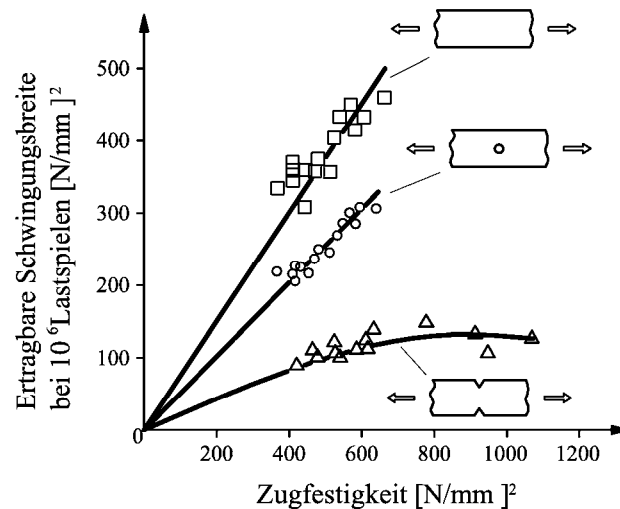


Bild 1: Einfluss der Kerbwirkung auf die Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit der Zugfestigkeit [17]

Ursache hierfür ist die Tatsache, dass scharfe Kerben einem Anriss sehr nahe kommen und damit der Anteil der Risseinleitungsdauer bezogen auf die Gesamtlebensdauer sehr gering ist. Der größte Anteil an der Gesamtlebensdauer ist somit bei kerbscharfen Konstruktionen die Risswachstumsphase, wobei die Risswachstumsgeschwindigkeit nahezu unabhängig von der Zugfestigkeit ist. Da Schweißverbindungen infolge der Schweißeinbrandkerbe und der Schweißnahtwurzel im Regelfall als extrem kerbscharfe Verbindungen anzusehen sind, hat sich bei einer Vielzahl an Untersuchungen an unterschiedlichen Konstruktionsdetails die gleiche Ermüdungsfestigkeit für höherfeste wie für niedrigfeste Stähle ergeben. Sinnvolle Einsatzbereiche von Schweißverbindungen aus höherfesten Stählen ergeben sich jedoch unter folgenden Bedingungen:

- hohe statische Beanspruchung
- hohe Mittelspannung
- geringe Kerbwirkung
- geringe Völligkeit des Betriebslastenkollektives

4 Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit

4.1 Allgemeines

Die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen aus höherfesten 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. Für eine große Anzahl typischer Konstruktionsdetails des Stahlbaus sind entsprechende Detailausbildungen jedoch konstruktiv nur schwer auszuführen.

4.2 Schweißnahtnachbehandlung

4.2.1 Allgemeines

Im Gegensatz zum Maschinenbau ist im Bauwesen der Einsatz von Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung bisher sehr begrenzt. Ursache hierfür sind u.a. die derzeit gültigen Normen im Brückenbau [6] sowie die zukünftigen europäischen Stahlbaunormen [7], die bisher keine Möglichkeit bieten, die Vorteile dieser Verfahren bei der Bemessung in den Ermüdungsnachweisen zu nutzen.

4.2.2 Überblick

Eine Einteilung von Nachbehandlungsverfahren ist grundsätzlich in folgende beiden Hauptgruppen möglich:

- Verringerung der Kerbschärfe am Schweißnahtübergang, z.B. durch Überschleifen oder WIG-Aufschmelzen;
- Erzeugung von Druckeigenstressungen am Schweißnahtübergang, z.B. durch Hämmern, Nadeln, UIT.

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

4.2.3 Überschleifen

Durch Überschleifen der Schweißnahtübergänge erfolgt eine Verringerung der Kerbschärfe sowie das Entfernen von Schweißnahtfehlern an der Oberfläche. Das Ausschleifen der Schweißnahtübergänge ist in vielen Fällen aufgrund der schlechten Zugänglichkeit und des damit verbundenen großen Zeitaufwandes aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll.

4.2.4 WIG-Aufschmelzen

Bei der WIG-Nachbehandlung findet durch nochmaliges Aufschmelzen der Schweißnaht ein Ausrunden des Schweißnahtübergangs statt. Die WIG-Nachbehandlung besitzt den Vorteil, dass sie von vielen Stahlbauunternehmen standardmäßig eingesetzt werden kann. Nachteilig ist, dass das nochmalige Aufschmelzen möglichst in Wannenlage erfolgen soll.

4.2.5 Hämmern, Nadeln

Beim Hämmern oder Nadeln wird der Schweißnahtübergang plastisch verformt und es bilden sich Druckeigenspannungen im Oberflächenbereich. Die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit beruht im Wesentlichen auf folgenden Faktoren:

- Einbringen von Druckeigenspannungen am Ort der potentiellen Rissentstehung,
- Verbesserung der Kerbform durch Einebnen des Nahtübergangs.

Gerade das Einbringen von Druckeigenspannungen ist für die nachhaltige Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von wesentlicher Bedeutung, da das effektive Spannungsverhältnis in den Druckbereich geschoben werden kann und Spannungsamplituden, die ganz oder teilweise im Druckbereich liegen, kaum Schädigungen verursachen. Vorhandene Risse werden durch die Druckspannungen geschlossen, und das Risswachstum wird behindert. Besonders bei höherfesten Stählen können die Vorteile der Druckeigenspannungserzeugung sehr gut ausgenutzt werden, da diese Stähle hohe Druckeigenspannungen zulassen und im Vergleich zu niedrigfesten Stählen eine größere Eigenspannungsempfindlichkeit besitzen [18].

Die Bearbeitung beim Hämmern oder Nadeln erfolgt jedoch bei einer niedrigen Frequenz mit einer damit verbundenen hohen Geräusch- und Vibrationsbelastung. Eine gute Reproduzierbarkeit und damit eine gleich bleibende Qualität ist dabei nicht unbedingt gegeben. Die Nachbehandlungsverfahren Hämmern und Nadeln haben sich daher bisher für die Belange des Stahlbaus als wenig praktikabel erwiesen.

4.2.6 UIT-Verfahren

Das Nachbehandlungsverfahren UIT (Ultrasonic Impact Treatment) ist ein sehr zukunftsträchtiges Verfahren zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen, das für den Einsatz im Stahlbau besonders geeignet erscheint. Das *Esosonix*® UIT-Verfahren wurde (in den 70er Jahren für die sowjetische Marine) von *Statnikov* [19] entwickelt. Es basiert auf einer Umwandlung von harmonischen Schwingungen durch einen Ultraschallwandler in mechanische Impulse und hochfrequente Ultraschallenergie. Die Nachbehandlung des Schweißnahtübergangs erfolgt dabei durch ein mechanisches Hämmern mit einem gehärteten Bolzen bei ca. 200Hz, bei

dem gleichzeitig die Ultraschallenergie mit einer Frequenz von ca. 27-55kHz eingebracht wird. Es zeichnet sich im Gegensatz zu den herkömmlichen Verfahren wie Hämmern oder Nadeln durch folgende Vorteile aus:

- leichte Bedienbarkeit,
- geringe Vibrationsbelastung,
- geringe Geräuschbelastung,
- gute Anpassungsfähigkeit an den Werkstoff und
- hohe Reproduzierbarkeit.

Die Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit erfolgt analog zu den Nachbehandlungsverfahren Hämmern oder Nadeln durch das Einbringen von Druckeigenspannungen und der Verbesserung der Kerbform am Nahtübergang. Die gute Reproduzierbarkeit durch die einfache Handhabung des *Esosonix*® UIT-Verfahrens verringert außerdem die typischen Streuungen bei Ermüdungsversuchen.

5 Experimentelles Arbeitsprogramm

5.1 Überblick

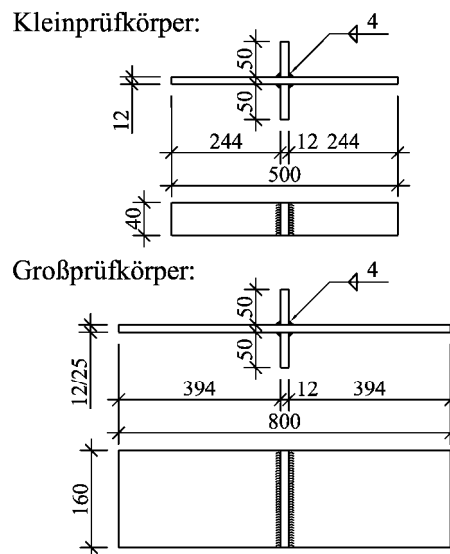
Im Rahmen des AiF-Forschungsprojekts „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“, gefördert durch die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), werden am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart und an der Materialforschungs- und Prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar die Anwendung und die Effektivität von unterschiedlichen Nachbehandlungsverfahren (WIG-Aufschmelzen und UIT) zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen aus höherfesten Stählen untersucht. Hierzu wird der Einfluss der Streckgrenze, der Blechdicke und des Spannungsverhältnisses auf die Ermüdungsfestigkeit am Konstruktionsdetail der Quersteife an Klein- und Großprüfkörpern unter Normalbeanspruchung aus den Stahlsorten S355, S460 und S690 bestimmt. Zur Vergleichbarkeit werden zusätzlich Versuche an Prüfkörpern, die im Schweißzustand belassen sind, durchgeführt. Ergänzend wird der Bauteileinfluss durch Trägerversuche aus dem höherfesten Stahl S690 mit eingeschweißter Quersteife untersucht. Als Begleituntersuchungen erfolgt die Bestimmung von Nahtgeometrie und Kerbfaktoren sowie die Messung von Eigenspannungen über die Tiefe mit Hilfe der Bohrlochmethode. Insgesamt besteht das Versuchsprogramm aus ca. 200 Kleinprüfkörper-, 50 Großprüfkörper- und 12 Trägerversuchen. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Prüfkörper	Einflussfaktor	Stahlsorte	Nachbehandlung	Dicke	Spannungsverhältnis
 Klein- und Großprüfkörper	Nachbehandlung	S355	im Schweißzustand	12mm	R = 0,1
	Stahlsorte	S460	WIG-Aufschmelzen		
	Größe	S690	UIT		
	Mittelspannung	S690	im Schweißzustand	12mm	R = -1 R = 0,5
	Dicke	S690	im Schweißzustand	25mm	R = 0,1
Träger	Bauteil	S690	im Schweißzustand	12mm	R = -1 R = 0,1

5.2 Herstellung der Versuchskörper

Bei der Herstellung der Klein- und Großprüfkörper wurden vorab die Quersteifen an beiden Seiten der Stahlplatten mit einer Länge von ungefähr 1.000mm vollmechanisch aufgeschweißt. Anschließend wurden die einzelnen Prüfkörper durch Sägeschnitt aus den Platten herausgetrennt. Bei der Herstellung der Träger mit einer Länge von 4,0m wurden zuerst die Längsnähte zwischen Flansche und Steg vollmechanisch geschweißt. Anschließend wurden die Quersteifen eingepasst und rundum mit Hand verschweißt. Die einzelnen Abmessungen der unterschiedlichen Prüfkörper können Bild 2 entnommen werden.

**Bild 2: Abmessungen der Klein- und Großprüfkörper**

5.3 Nachbehandlung

5.3.1 WIG-Aufschmelzen

Das WIG-Aufschmelzen des Nahtübergangs wurde vor dem Trennen zu einzelnen Prüfkörpern mit Hand durchgeführt. Dabei waren nur eine sehr geringen Vorschubgeschwindigkeit von ca. 7cm/min möglich.

5.3.4 *Esonix*® UIT-Verfahren (Ultrasonic Impact Treatment)

Die Anwendung des *Esonix*® UIT-Verfahrens erfolgte bei den Klein- und Großprüfkörpern abschließend am bereits zugeschnittenen Prüfkörper am Schweißnahtübergang. Die Ausführung erfolgte mit einer Frequenz von 27kHz durch einen oder mehrere gehärtete Bolzen mit einem Durchmesser von 3mm, siehe Bild 3. Die Nachbehandlung konnte optisch kontrolliert werden, da plastische Verformungen durch Eindrückungen am Schweißnahtübergang mit einer glänzenden Oberfläche deutlich erkennbar waren. Im Regelfall war zur Nachbehandlung ein Arbeitsgang ausreichend. Die Träger wurden nur im Bereich der Quersteife nachbehandelt.



Bild 3: UIT-Behandlung des Nahtübergangs

5.4 Ermüdungsversuche

5.4.1 Kleinprüfkörper

Die ersten Ergebnisse der Ermüdungsversuche an Klein- und Großprüfkörpern mit Einstufenkollektiv sind in den Bildern 4 bis 6 als Wöhlerdiagramme aufgetragen. Auf die Angabe von charakteristischen Werten für die Ermüdungsfestigkeit wurde aufgrund der bisher noch zu geringen Anzahl von Versuchen verzichtet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch Anwendung von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren die Ermüdungsfestigkeit sowohl im Zeitfestigkeitsbereich als auch im Dauerfestigkeitsbereich deutlich gesteigert werden kann. Insbesondere im Dauerfestigkeitsbereich ist eine deutliche Verschiebung des Abknickpunktes hin zu wesentlich geringeren Lastspielzahlen zu erkennen. Die besten Ergebnisse konnten bisher mit dem Nachbehandlungsverfahren UIT erreicht werden. Die Dauerfestigkeiten lagen bei Anwendung des UIT-Verfahrens für die Stahlsorten S355 und S460 um ca. 250% über den theoretischen Dauerfestigkeiten bei 5 Millionen Lastspielzahlen der im Schweißzustand belassenen Prüfkörper. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich ist die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch die UIT-Behandlung deutlich geringer. Als Ursache wird hierfür der Abbau der positiven Druckeigenstressungen aufgrund der hohen lokalen Kerbbeanspruchungen angesehen.

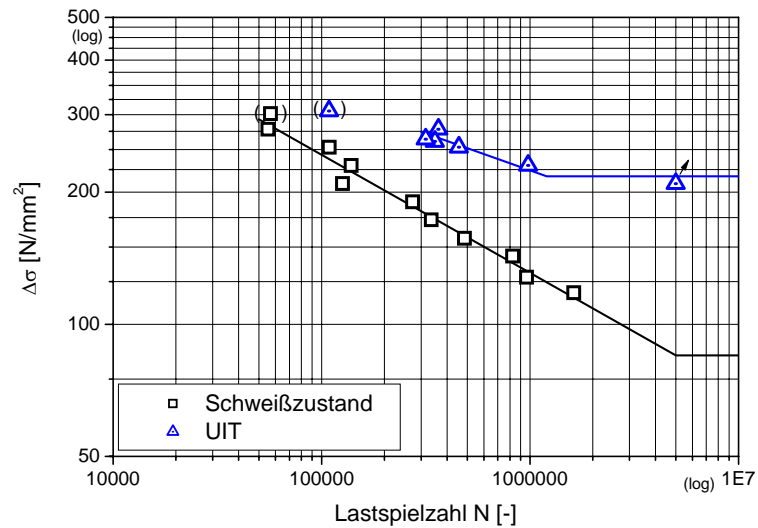


Bild 4: Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S355, R=0,1)

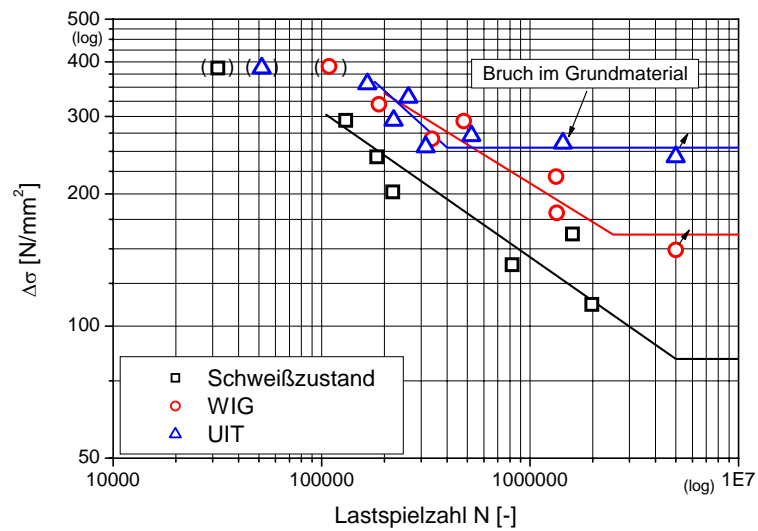


Bild 5: Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S460, R=0,1)

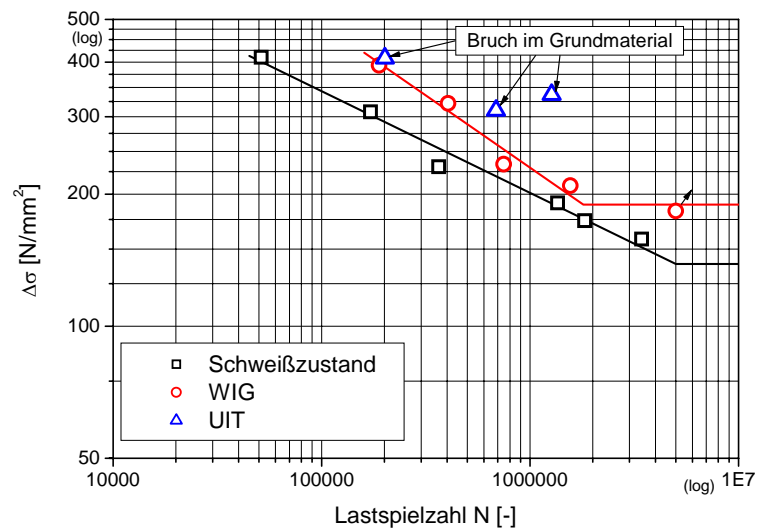


Bild 6: Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S690, R=0,1)

Die Versuchskörper versagten üblicherweise am Schweißnahtübergang, nur bei den Versuchen der Stahlsorte S690QL1 war die Verbesserung am Schweißnahtübergang durch die Anwendung des UIT-Verfahrens so hoch, dass sich die Anrisse bei den Spannungsverhältnissen $R = -1$ und $R = 0,1$ vom Nahtübergang ins Grundmaterial, siehe Bild 7, oder in den Einspannbereich verlagerten.



Bild 7: Ermüdungsversagen im Grundmaterial

Bei den im Schweißzustand belassenen Prüfkörpern zeigte sich weiterhin die Tendenz, dass die Stahlsorte S690 um ca. 50-60% höhere Ermüdungsfestigkeiten besitzt als die Stahlsorten S355 und S460. Bisherige Untersuchungen zum Mittelspannungseinfluss ergaben sowohl bei den Prüfkörpern im Schweißzustand als auch bei den UIT-nachbehandelten Prüfkörpern Ergebnisse in der Größenordnung nach DIN 4132 [20]. Im Weiteren zeigte sich ein deutlicher geometrischer Größeneinfluss für die Prüfkörper im Schweißzustand. Im Vergleich zu den Kleinprüfkörpern mit einer Breite von 4cm ergaben sich bei den Großprüfkörpern mit einer Breite von 16cm um ca. 20% geringere Ermüdungsfestigkeiten. Dieser Größeneinfluss konnte jedoch bei den Prüfkörpern mit UIT-Nachbehandlung nicht mehr festgestellt werden. Es kann daher angenommen werden, dass die typischen großen Streubreiten bei Ermüdungsversuchen an Schweißverbindungen durch eine UIT-Nachbehandlung reduziert werden können.

Die Durchführung von weiteren Versuchen an Klein- und Großprüfkörpern ist vorgesehen, um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten und weitere Einflussfaktoren wie Blechdicke oder das Auftreten von Überlasten zu untersuchen.

5.4.2 Trägerversuche

Die bisherigen vier Trägerversuche wurden mit Hilfe des Resonanzprüfverfahren bei einem Spannungsverhältnis von $R = -1$ durchgeführt. Für die beiden durchgeführten Trägerversuche im unbehandelten Schweißzustand ergaben sich Anrisse am Kerbdetail der Quersteife, siehe Bild 8. Die Ermüdungsfestigkeiten waren dabei um ca. 35% geringer als bei den Kleinprüfkörperversuchen.



Bild 8: Ermüdungsversagen im Bereich der Quersteife

Bei den beiden Trägerversuchen, bei denen die Quersteife mit dem UIT-Verfahren behandelt wurde, verlagerte sich der Anriss vom Nahtübergang der Quersteife in die Längsnaht bzw. in den Bereich der Lasteinleitung. Die Lebensdauer der mit UIT behandelten Träger lag dabei um ca. 40% über der Lastspielzahl der Trägerversuche mit unbehandelter Quersteife. Weitere Trägerversuche sind vorgesehen, insbesondere bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$.

5.5 Bestimmung von Nahtgeometrie und Kerbfaktoren

Kerben jeglicher Art führen zu einer Störung des Kraftflusses innerhalb eines Bauteils und verursachen dadurch starke lokale Spannungsspitzen, die die Ermüdungsfestigkeit deutlich herabsetzen. Dies ist darin begründet, dass die Ermüdungsschädigung bis zur Risseinleitung ein äußerst lokaler Vorgang ist. Um den Einfluss der Kerbwirkung abschätzen zu können, wurde die Nahtgeometrie einzelner Prüfkörper mit Hilfe von Silikonabdrücken der Schweißnaht vermessen. Anschließend wurden rechnerisch elastische Kerbfaktoren mit Hilfe der Finite Elemente Methode bestimmt. Als maßgebende Größen für den Kerbfaktor beim Konstruktionsdetail der Quersteife sind vor allem der Kerbradius, der Nahtanstiegswinkel sowie die plastischen Eindrückungen durch das UIT-Verfahren bzw. der Einbrand aus dem WIG-Aufschmelzen anzusehen. Die mittleren Messwerte und die dazugehörigen Kerbfaktoren für die Prüfkörper aus der Stahlsorte S460 können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Mittlere Kerbfaktoren für Prüfkörper aus S460

Stahlsorte	Nachbehandlung	Nahtanstiegswinkel	Eindrückung bzw. Einbrand	Kerbradius	Kerbfaktor
S460	im Schweißzustand	41,0°	-	1,1mm	2,51
	WIG-Aufschmelzen		0,15mm	7,0mm	1,54
	UIT		0,08mm	2,4mm	2,08

Werden die Nennspannungen einer Versuchsreihe mit den Kerbfaktoren multipliziert und zusammen mit der Versagensschwingspielzahl in ein Wöhlerdiagramm eingetragen, entstehen so-

genannte Kerbspannungswöhlerlinien, bei denen der Einfluss des Kerbfaktors ausgesondert ist. Vorhandene Streuungen in der Schweißnaht aus Nahtgeometrie, Rauigkeit, Nahtfehlern, Eigenstressungen und Werkstofffestigkeiten sind in diesen Kerbspannungswöhlerlinien beinhaltet. Durch eine Gegenüberstellung der einzelnen Versuchsreihen kann der Einfluss der Kerbwirkung auf die Ermüdungsfestigkeit beurteilt werden. Nach Bild 9 kann somit angenommen werden, dass z.B. für die Stahlsorte S460 die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit beim WIG-Aufschmelzen hauptsächlich durch die Erhöhung des Kerbradius und der dadurch reduzierten Kerbwirkung zurückzuführen ist, denn die mittlere Ermüdungsfestigkeitskurve mit WIG-nachbehandelten Prüfkörpern liegt in etwa auf gleicher Höhe wie die mit im Schweißzustand belassenen Prüfkörpern. Beim UIT-Verfahren kann die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit nicht allein durch die Kerbradiusvergrößerung erklärt werden, da die mittlere Ermüdungsfestigkeitskurve für die UIT-behandelten Prüfkörper immer noch über der mit im Schweißzustand belassenen Prüfkörpern liegt.

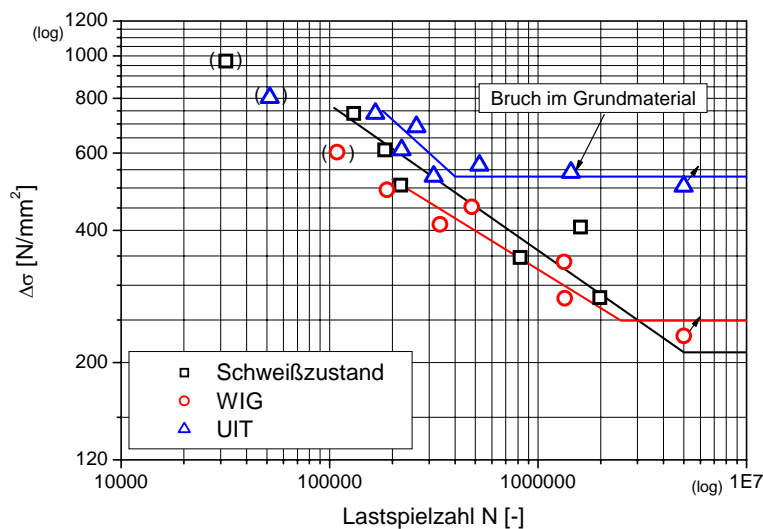


Bild 9: Kerbspannungswöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S460, $R=0,1$)

5.6 Eigenspannungsmessungen

Insbesondere das Einbringen von Druckeigenstressungen wird für die wesentliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit beim UIT-Verfahren angesehen. Besonders wirksam ist das Einbringen von Eigenstressung bei Stählen mit hoher Festigkeit.

Der Eigenstressungsverlauf wurde mit Hilfe der Bohrlochmethode über eine Tiefe bis zu ca. 1,1mm an unbehandelten und nachbehandelten Prüfkörpern im Bereich des Schweißnahtübergangs bestimmt. Als maßgebend für die durchgeführten Ermüdungsversuche sind die Eigenstressungen senkrecht zur Schweißnaht anzusehen, da sich diese näherungsweise mit den Spannungen aus der Belastung überlagern. Die Ergebnisse der Messungen zeigten, dass bei allen

Stahlsorten die Zugeigenspannungen infolge des Schweißvorgangs durch die Anwendung des UIT-Verfahrens über die gesamte Messtiefe von 1,1 mm durch Druckeigenspannungen aufgehoben werden, siehe Bild 9. Bedeutend für die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit ist vor allem das Einbringen von Eigenspannungen an bzw. dicht unter der Oberfläche bis zu einer Tiefe, die etwa dem technischen Anriss entspricht (ca. 0,5mm) [21]. Die maximalen Druckeigenspannungen traten im Regelfall in einer Tiefe von 0,3-0,4mm auf. Bei Anwendung des WIG-Aufschmelzens lagen die Eigenspannungen noch im Zugbereich wie bei den im Schweißzustand belassenen Prüfkörpern. Auffallend ist auch das geringe Eigenspannungsniveau bei den im Schweißzustand belassenen Prüfkörpern aus der Stahlsorte S690.

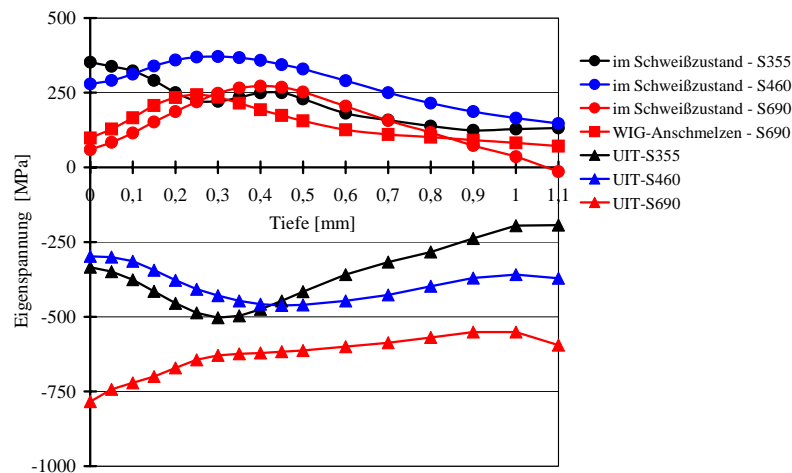


Bild 10: Schweißeigenspannungen senkrecht zur Schweißnaht

6 Ertüchtigung von bestehenden Konstruktionen

Tragwerke unter Ermüdungsbeanspruchung werden im Regelfall für eine bestimmte Lebensdauer ausgelegt. Es stellt sich hierbei die Frage, wie die Sicherheit eines Tragwerkes einzustufen ist, bei dem die Lebensdauer rechnerisch nahezu erreicht ist, Ermüdungsrisse aber, wie häufig in der Praxis, noch nicht erkennbar sind. Hierzu wurden Ermüdungsversuche im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart am Konstruktionsdetail der Quersteife durchgeführt, um die Effektivität des UIT-Verfahrens an vorgeschädigten Prüfkörpern zu untersuchen [22].

Zunächst wurden unbehandelte Proben im Einstufenkollektiv bis zur Bruchschwingenspielzahl N_B gefahren. In einem weiteren Schritt wurden dann identische Proben bis zu einer Schwingenspielzahl von $N = 0,75$ bis $0,9 \cdot N_B$ beansprucht, um so eine reale Vorschädigung im Bauteil zu simulieren. Im Anschluss erfolgte eine optische Prüfung der Schweißnahtübergänge mit Hilfe einer Lupe und dem Magnetpulververfahren. Es konnten dabei keine Anrisse von erkennbarer Größe gefunden werden. Nach einer darauf folgenden UIT-Behandlung des Schweißnahtübergangs er-

folgte die Fortführung des Ermüdungsversuchs bis zum Versagen. Die ersten Versuchsergebnisse zeigten, siehe Bild 11, dass das UIT-Verfahren auch bei der Ertüchtigung von bestehenden Konstruktionen sehr viel versprechend ist. Die Lebensdauer lag bei den vorgeschädigten Prüfkörpern mit nachträglicher UIT-Behandlung des Schweißnahtübergangs mindestens 2,5-fach über der Lebensdauer der Prüfkörper ohne Nachbehandlung oder es wurde sogar die Dauerfestigkeit erreicht.

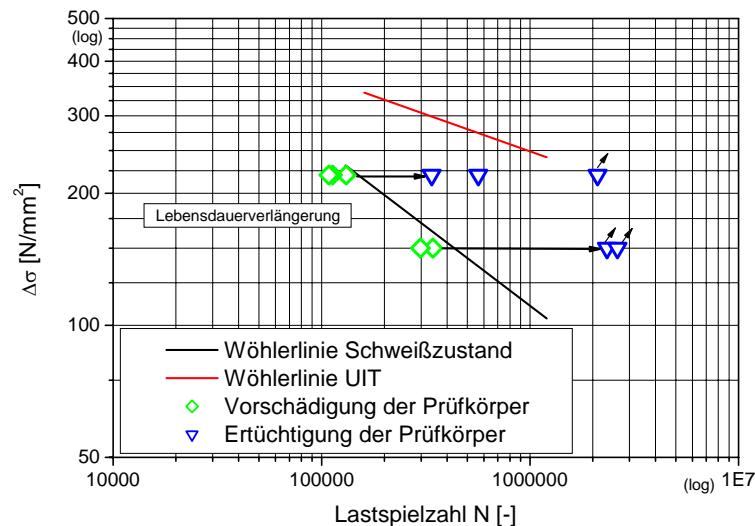


Bild 11: Lebensdauererlängerung durch nachträgliche Ertüchtigung mit UIT (Großprüfkörper, Quersteife, S460, R=0,1)

Aufgrund der großen Streuungen der Ergebnisse, sind weiterführende Untersuchungen angestrebt, insbesondere um die Effektivität des UIT-Verfahrens zur Ertüchtigung von bestehenden Konstruktionen in Abhängigkeit vom Vorschädigungsgrad und möglicherweise auch der Anrissgröße festzulegen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend können folgende Folgerungen bei der Anwendung von höherfesten Stählen in ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen gezogen werden:

- Eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit und eine damit verbundene effektive Anwendung von höherfesten Stählen kann durch den lokal begrenzten Einsatz von Nachbehandlungsverfahren an den kritischen Konstruktionsdetails erreicht werden.
- Die ersten Ergebnisse von Ermüdungsversuchen am Konstruktionsdetail der Quersteife ergaben bei Anwendung der Nachbehandlungsverfahren WIG-Aufschmelzen und UIT wesentliche Steigerungen bei der Ermüdungsfestigkeit und insbesondere der Dauerfestigkeit. Besonders das UIT-Verfahren erscheint aufgrund der einfachen Anwendbarkeit in die Praxis übertragbar zu sein.

- Das UIT-Nachbehandlungsverfahren wirkt um so effektiver, je höher die statische Festigkeit der Werkstoffe ist.
- Erste Ergebnisse zur Ertüchtigung von vorgeschädigten Konstruktionen ergaben deutliche Verlängerungen der Restlebensdauer. Auch hier erscheint der Einsatz des UIT-Verfahrens sehr viel versprechend.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ wird mit finanzieller Förderung durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF), Köln, aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA), Berlin, durchgeführt. Dank gilt der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) für die Unterstützung und die fachliche Begleitung. Die Autoren bedanken sich ebenfalls bei den Firmen Dillinger Hüttenwerke und voestalpine Grobblech für die Stahllieferung, bei den Firmen Donges Stahlbau, Max Bögl Stahl- und Anlagenbau, Plauen Stahl Technologie und Schachtbau Nordhausen für die Fertigung der Probekörper und bei den Firmen Applied Ultrasonics und Eurosonix für die Bereitstellung der Fachkenntnis und Durchführung der UIT-Nachbehandlung.

Literatur

- [1] *Hubo, R.; Schröter, F.:* Stähle für den Stahlbau – Auswahl und Anwendung in der Praxis. In: Kuhlmann, U. (Hrsg.): Stahlbau-Kalender 2001, Ernst & Sohn, 2001, S. 545-589.
- [2] *Hubo, R.; Hanus, F.E.:* Thermomechanisch gewalzte Grobbleche für den Stahlbau. Stahlbau 63 (1994), Heft 3, S. 84-89.
- [3] *Dengler, J.M.; Becker, F.; Herion, R.:* HISTAR: A New Generation of High-Strength Beams with Excellent Weldability. Proceedings of the International Conference on Processing, Microstructure and Properties of Microalloyed and Other Modern High-Strength Low Alloy Steels, Pittsburgh, PA, June 3-6, 1991.
- [4] *Blum, M.:* Schweißbeignung einer neuen Generation gewalzter Stahlträger – Feinkornbaustähle für den Stahlbau. der praktiker 50 (1998), Heft 10, S. 357-364.
- [5] *Blum, M.; Girkes, A.:* Wirtschaftlicher bauen mit Walzträgern aus TM-QST-Stahl. der praktiker 52 (2000), Heft 7, S. 252-255.
- [6] DIN-Fachbericht 103: Stahlbrücken. Ausgabe 2003.

- [7] prEN 1993-1-9: Eurocode 3, Teil 1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Ermüdung. Entwurf Status 49, Februar 2004.
- [8] *Hamme, U.; Hauser, J.; Kern, A.; Schriever, U.*: Einsatz hochfester Baustähle im Mobilkranbau. Stahlbau 69 (2000), Heft 4, S. 295-305.
- [9] *Mang, F.; Herion, S.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Kästner, M.*: Bemessungsregeln zur Beurteilung von Kranstrukturen – Klassifizierung von kranbauspezifischen Kerbdetails. Forschungsbericht P 293, Studiengesellschaft für Stahlanwendung, 2000.
- [10] *Bleck, W.; Hummel, H.; Kern, A.; Schriever, U.*: Ermüdungsverhalten von Mobilkranbauteilen aus hochfesten Baustählen. Stahlbau 73 (2004), Heft 11, S. 901-907.
- [11] *Kalla, G.; Engel, D.; Probst, J.-O.*: Verwendung und Verarbeitung von Grobblechen im Schiffbau aus der Sicht einer Klassifikationsgesellschaft. In: Grobblech – Herstellung und Anwendung, Dokumentation 570, Stahl-Informations-Zentrum, 2001.
- [12] *Fricke, W.; Weißenborn; Eggert, L.; Huisman, G.*: Erschließung des hochfesten Stahls für den Schiffbau. AVIF-Forschungsvorhaben A164, CMT-Bericht 1/2004.
- [13] *Petershagen, H.*: Schwingfestigkeit und Fertigung – brauchen wir neue Konzepte?. In: Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Valtinat, Arbeitsbereich Stahlbau und Holzbau, TU Hamburg-Harburg, 2001.
- [14] *Roos, F.*: Anwendung von höherfesten Baustählen im Straßen-Verbundbrückenbau. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Mitteilung Nr. 2003-13X, 2003.
- [15] *Kuhlmann, U.; Dürr, A.; Roos, F.*: Ermüdungsnachweis für Straßen-Verbundbrücken nach DIN-Fachbericht. Stahlbau 72 (2003), Heft 9, S. 679-682.
- [16] *Haibach, E.*: Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag GmbH, 1989.
- [17] *Gurney, T.R.*: Fatigue of welded structures. Cambridge University Press, 1979.
- [18] *Wohlfahrt, H.; Krull, P.*: Auswirkungen mechanischer Oberflächennachbehandlungen auf das Dauerschwingverhalten unter Einschluß von Ribbildung und Rissausbreitung. Mechanische Oberflächennachbehandlung, Grundlagen – Bauteileigenschaften – Anwendungen, Wiley-VCH, 2000.
- [19] *Statnikov, E. et al.*: Ultrasound tool for strain strengthening and relaxation treatment. Patent of the RF No. 472782, 1975.

- [20] DIN 4132: Kranbahnen, Stahltragwerke, Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung. Februar 1981.
- [21] *Radaj, D.*: Ermüdungsfestigkeit, Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau, Springer-Verlag, 1995.
- [22] *Muck, A.*: Ertüchtigung von ermüdungsbeanspruchten Schweißverbindungen durch Anwendung von Ultrasonic Impact Treatment (UIT). Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2005.

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Dr.-Ing. H.-P. Günther, Dipl.-Ing. André Dürr, Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart, Prof. Dr.-Ing. Joachim Bergmann, Dipl.-Ing. Rayk Thumser, Dr.-Ing. Uwe Gerth, Materialforschungs- und Prüfanstalt (MFPA) an der Bauhaus-Universität Weimar