

Hochfeste Feinkornbaustähle im Stahlbau: Anwendung im Stahlbau insbesondere unter der Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Konstruktionen

Ulrike Kuhlmann, Stuttgart; André Dürr, Stuttgart; Falko Schröter, Dillingen

1 Einleitung

Höher- und hochfeste Feinkornbaustähle, d.h. Baustähle mit einer Nennstreckgrenze größer 355 MPa, nehmen im konstruktiven Stahlbau eine immer größere Rolle ein. Während solche Bereiche wie der Baumaschinenbau (z.B. Mobilkrane) schon seit längerem auf solche Stahlqualitäten zurückgreifen, finden sie nun zunehmend auch Eingang in Konstruktionen des klassischen Stahlhoch- und Brückenbaus. Dies drückt sich auch in einer Anpassung der entsprechenden Konstruktions- und Verarbeitungsregelwerke aus, die in diesem Bereich Verwendung finden.

Einschränkungen erfährt die Verwendung dieser Werkstoffe aber vor allem in ermüdungsbeanspruchten Schweißkonstruktionen, wie sie z.B. im Brücken- und Kranbau vorliegen. Im einfachsten Fall gehen die oben angesprochenen Regelwerke davon aus, dass sich das Ermüdungsverhalten hochfester Stähle in Schweißkonstruktionen nicht gegenüber dem von normalfesten Stählen unterscheidet, sodass die Effizienz dieser Stähle bei Ausschlaggebendem Betriebsfestigkeitskriterium kritisch hinterfragt werden muss. Es ist jedoch erwiesen, dass die Ermüdungsfestigkeit von Schweißdetails 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. Umfangreiche Untersuchungen wurden dazu im von der Studiengesellschaft Stahlanwendung geförderten Projekt „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ durchgeführt. Erste Ergebnisse dieses Projekts sollen hier vorgestellt werden.

2 Arten von hochfesten Stahlsorten

Stähle mit hohen Streckgrenzen können durch verschiedene Herstellungsprozesse hergestellt werden. Die Herstellungsrouten stehen natürlich in enger Abhängigkeit zu der chemischen Zusammensetzung des Stahles. Daraus resultieren auch unterschiedliche Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften insbesondere in Hinblick auf die im Stahlbau dominierende Größe der Schweißneigung. Somit unterscheidet man:

- Normalisierte (oder normalisierend gewalzte Stähle): Streckgrenzenklassen bis S460N genormt nach DIN EN 10 113-2,
- Vergütete Stähle: Streckgrenzenklassen bis S960Q genormt nach DIN EN 10 137-2,
- Thermomechanisch gewalzte Stähle: Streckgrenzenklassen bis S460M genormt nach DIN EN 10 113-3.

Weitere Informationen zu den Herstellungsprozessen können [1] entnommen werden. Bild 1 vergleicht die verschiedenen Walz- und Wärmebehandlungsmechanismen im Zeit-Temperatur-Diagramm miteinander.

Es soll nicht unerwähnt werden, dass im Rahmen der Umsetzung der europäischen Bauproduktenrichtlinie mit Datum vom Februar-April 2005 eine neue Norm für Baustahlgüten veröffentlicht wurde. So werden die obigen Normen in Zukunft durch die Teile 3, 4 und 6 der DIN EN 10 025 (02-04/2005) abgedeckt.

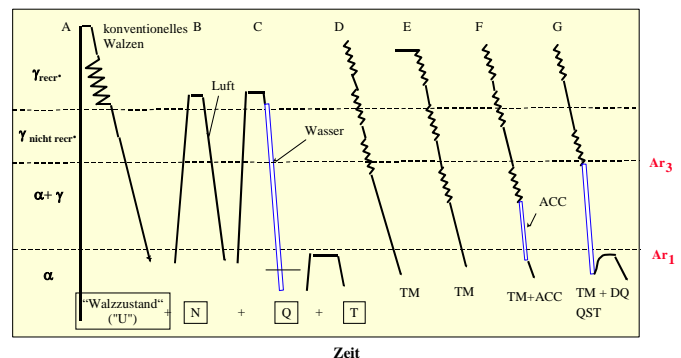


Bild 1. Herstellung von hochfesten Feinkornbaustählen

3 Verwendbarkeit von hochfesten Stahlsorten

Die Verwendung von höherfesten Feinkornbaustählen in den Bereichen des Stahlbaus, die bauaufsichtlichen Forderungen unterliegen, ist durch die zu Grunde liegenden Konstruktionsregelwerke und die Möglichkeit zur Führung eines Übereinstimmungsnachweises (wie er z.B. durch Aufnahme in die Bauregelliste Teil A erfolgen kann) reglementiert.

Davon betroffen sind z.B. die dynamisch belasteten Konstruktionen im Brückenbau oder Kranbahnträger. Wie Tabelle 1 zeigt, sind nur einige hochfeste Werkstoffe im bauaufsichtlich überwachten Bereich standardmäßig zugelassen.

Für Stahlbaukonstruktionen des Hoch- und Brückenbaus hat die Stahlsorte S460M durchaus schon weite Verbreitung gefunden, weil die Schweißneigung und auch sonstige Verarbeitungseigenschaften dieser thermomechanisch gewalzten Stähle an die von normalfesten heranreicht. Ein imposantes Beispiel ist in Bild 2 gegeben. Die 36.000 t-Deckkonstruktion des Viaduc de Millau in Südfrankreich enthält insbesondere in der Mittelstruktur 12.000 t dieser Stahlsorte.

Tabelle 1. Übersicht der charakteristischen Bemessungswerte der im bauaufsichtlich überwachten Bereich einsetzbaren hochfesten Stählen

Stahlgüte	Erzeugnisd. t [mm]	Streckgrenze $f_{y,k}$ [MPa]	Zugfestigk. $f_{y,k}$ [MPa]	E-Modul E [MPa]	G-Modul G [MPa]	Temp.-dehnzahl α_t [K^{-1}]	Basis
S460N/NL	$t \leq 40$	460	550	210000	81000	$12 \cdot 10^{-6}$	Anpassungsrichtlinie Stahlbau Dez. 2001
	$40 < t \leq 80$	430					
	$80 < t \leq 100$	400					
	$t > 100$	festzulegen					Zustimmung im Einzelfall
S460M/ML	$t \leq 40$	460	530	210000	81000	$12 \cdot 10^{-6}$	Anpassungsrichtlinie Stahlbau Dez. 2001
	$40 < t \leq 80$	430					
	$80 < t \leq 120$	festzulegen					Zustimmung im Einzelfall
S690QL1	$3 < t \leq 50$	690	790	210000	81000	$12 \cdot 10^{-6}$	Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1.1



Bild 2. Viaduc de Millau, Südfrankreich

Dort wurde auf hochfeste Stahlqualitäten zurückgegriffen, um die bei der Montage durch Taktschiebverfahren wirkenden Biegemomente aus der Totlast der Konstruktion zu reduzieren.

Ein Ausblick auf das kommende europäische Konstruktionsregelwerk Eurocode soll nicht fehlen. In dem den Stahlbau betreffenden Teil EC 3 sind alle Stahlgüten, d.h. ob normalisiert, thermomechanisch gewalzt oder vergütet, in der Streckgrenzenklassen bis S460 erfasst. Ferner überprüft zurzeit eine Arbeitsgruppe innerhalb des CEN, ob und unter welchen Bedingungen eine Aufnahme von Stählen bis zur Streckgrenzenklasse S690 möglich ist.

4 Verwendung im Stahlbau

Höherfeste Stähle kommen vor allem in Tragwerken zum Einsatz, in denen der statische Nachweis bestimmend ist, d.h. andere Kriterien wie Stabilität, Verformungen oder auch Ermüdung nur von nachgeordneter Bedeutung sind.

So sehen z.B. die zurzeit im deutschen Brückenbau geltenden Regelwerke die Führung eines Ermüdungsnachweises vor, der nahezu unabhängig von der Stahlsorte ist [2]. Auch das kommende europäi-

sche Stahlbauregelwerk enthält einen Ermüdungsnachweis, der ganz unabhängig von der Stahlsorte ist [3]. Kapitel 6 widmet sich der Frage, in wie weit hier durch spezielle Nachbehandlungsprozesse doch Vorteile möglich sind.

Im bauaufsichtlich überwachten Bereich wird der Ermüdungsnachweis für S460 und S690 in der Regel durch DAST-Richtlinie 011 auf der Basis von DIN 4132 geführt [4]. Hiernach können diese Stähle durchaus in der ermüdungsbelasteten Konstruktion Vorteile zeigen und zwar bei tendenziell niedrigen Beanspruchungsklassen (d.h. geringere Zyklenzahl bzw. gutmütige Belastungskollektive), höheren Mittelspannungen und niedrigen Kerbklassen.

Eine vorteilhafte Verwendung von höherfesten Stahlgüten auch unter Ermüdungslast erfolgt z.B. im Mobilkranbau. So finden hier im Auslegerbereich ultrahochfeste Stähle bis S1100 Verwendung, indem kerbscharfe und damit ermüdungsrelevante Schweißdetails in den geringer beanspruchten Bereich verlegt werden und Schweißnähte prinzipiell so ausgeführt werden, dass die Kerbschärfe reduziert wird. Auch die oft nicht in den Bereich der Dauerschwingfestigkeit reichende Zyklenzahl kommt hier der Verwendung solcher Stahlgüten entgegen.

Im Brückenbau lassen insbesondere die modernen Bauformen der Verbundbrücken (Stahlträger mit mittragender Betonfahrbahnplatte) vermuten, dass hochfeste Stähle effizient eingesetzt werden können, da diese eine im Verhältnis zu der Verkehrslast höhere Totlasten als reine Stahlbrücken zeigen. Die Studie in [5] untersucht, in welchem Bereich von typischen Zweifeld-Verbundbrücken mit dem Regelquerschnitt RQ10.5 mit zwei offenen geschweißten Längsträgern die Verwendung von hochfesten Stählen sinnvoll ist.

Bild 3 zeigt, in wie weit sich die Querschnittsflächen im Feldbereich durch die Verwendung von hochfesten Stählen reduzieren lassen. Da hier in einem weiten Bereich der Ermüdungsnachweis maßgebend wird, macht die Verwendung von S460M erst ab einer Spannweite von 40 m Sinn – eine profitable Verwen-

derung von S690 sogar erst bei wesentlich größeren Spannweiten. Determinierendes Schweißdetail ist dabei die an den Untergurt angeschweißte Quersteife mit der Kerbgruppe 80.

Auf der anderen Seite kann aber auch festgestellt werden, dass innerhalb des Stützbereichs der statische Nachweis und nicht der Ermüdungsnachweis relevant ist, so dass man hier von der Festigkeit höherfester Stähle voll profitieren kann, um konstruktive Querschnitte zu reduzieren und damit auch Schweißkosten zu sparen.

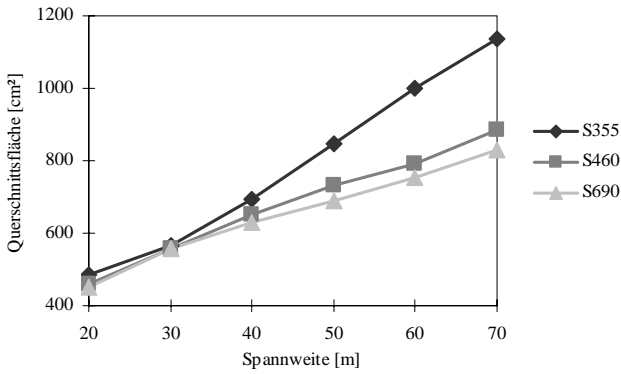


Bild 3. Erforderliche Querschnittsflächen im Feldbereich von Verbundzweifeldträgerbrücken

Ein typisches Beispiel hierfür zeigt Bild 4, eine Brücke im südfranzösischen Rémoulins mit drei kontinuierlichen Feldern mit Spannweiten bis 66 m. Hier wurde durch den Einsatz von S460M im Stützbereich die Flanschdicke über den Pfeilern auf 80 mm reduziert – gegenüber 120 mm für einen klassischen Brückenbaustahl S355.

5 Schweißnahtfaktoren

Nach [6] und [7] gelten für die Schweißnahtberechnung von nicht durchgeschweißten Kehlnähten und von nicht geprüften Stumpfstoßen sowie durchgeschweißten Kehlnähten einschränkende Sicherheitsfaktoren, die in Tabelle 2 den Anweisungen des kommenden Eurocode gegenübergestellt sind. Man sieht, dass nach dieses Regelwerken keine wesentlich höhere Grenzschweißnahtfestigkeit für S460 angenommen werden kann als für einen S355.

Dabei ist anzumerken, dass die Faktoren α_w der deutschen Normen für S460 eigentlich aus dem Faktor β_w

des Eurocodes abgeleitet wurde. Im Rahmen der Aufnahme der höherfesten Werkstoffe in den Eurocode fanden 1990 am TNO in Delft Belastungsversuche an Kehlnähten statt, die in diesen sehr konservativen Annahmen resultierten. Inzwischen wurde aber erwiesen, dass die Schweißgutfestigkeit bei der Stahlgüte S460 einen größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit einer Kehlnaht hat als bei S355, wo im Regelfall eine ausreichende Überfestigkeit des Schweißgutes vorhanden ist. Damit haben auch die Schweißbedingungen, insbesondere die Abkühlzeit, einen wesentlich Einfluss auf die Schweißnahtfestigkeit [8].

Versuche an Flanschmaterial aus S460M an der MPA Karlsruhe haben inzwischen dazu geführt, dass für gewalzte Träger S460M ein Schweißnahtfaktor von $\alpha_w = 0,75$ angesetzt werden kann, womit sich eine wesentlich günstigere Grenzschweißnahtspannung ergibt. Auch ein von verschiedenen Partnern aus Thüringen getragenes Forschungsprojekt („Innovative Konstruktionen für den Maschinen- und Stahlbau durch Kombination neuartiger Werkstoffe“) ergab an Versuchen an Kreuz- und T-Stößen verschiedener Werkstoffkombinationen experimentelle Festigkeiten, die die der Berechnung nach DIN 18 800 bzw. Eurocode teilweise stark überschreiten.

Die Werte für S460 in Tabelle 2 dürfen also als sehr pessimistisch angesehen werden und bedürfen eingehender Prüfung.



Bild 4. Verbundbrücke bei Rémoulins in der Montagephase

Tabelle 2. Grenzschweißnahtspannungen nach DIN 18800 und Eurocode

	DIN 18800 mit Anpassungsrichtlinie und Zulassungen		EC 3, Teil 1.8	
	$\sigma_{w,R,d} = \alpha_w \cdot f_{y,k} / \gamma_M$		$f_{w,R,d} = f_{u,k} / (\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2})$	
	$\sigma_{w,R,d}$ [MPa]	α_w	$f_{w,R,d}$ [MPa]	β_w
S235	203	0,95	208	0,8
S355	258	0,80	261	0,9
S460	251	0,60	263	1,0
S690	376	0,60	-	-

6 Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit

6.1 Allgemeines

Wie in Kapitel 4 eingehend dargestellt, stellt die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten Konstruktionen für die Verwendung von höherfesten Stählen in dynamisch belasteten Stahlbaukomponenten eine einschränkende Größe dar. Da sich bei gängiger Schweißnahtausführung die Ermüdungsfestigkeiten von geschweißten Details aus höherfesten Stählen kaum oder sogar nicht von der von geschweißten Details aus normalfesten Stählen unterscheidet, kann der Konstrukteur vielfach nicht von der höheren statischen Festigkeit profitieren.

Es ist jedoch klar, dass die Ermüdungsfestigkeit von höherfesten Stählen dadurch gesteigert werden kann, dass die Kerbschärfe der Schweißdetails reduziert wird. Neben besonderen Vorkehrungen zur Erzielung einer entsprechenden Schweißnahtqualität kann dies auch durch Nachbehandlungsmethoden erreicht werden.

Diese Nachbehandlungsmethoden wirken entweder in die Richtung, dass die Kerbschärfe am Schweißnahtübergang verringert wird, wie es z.B. durch das WIG-Umschmelzen oder schon ein einfaches Nachschleifen erzielt werden kann. Beim WIG-Umschmelzen findet dabei durch ein nochmaliges Aufschmelzen der Schweißnaht ein Ausrunden des Schweißnahtübergangs statt.

Zum anderen werden durch Nachbehandlungsmethoden wie Hämmern oder Nadeln Druckeigenspannungen in den Nahtübergang eingebracht. Dabei wird der Nahtübergang plastisch verformt, sodass sich Druckeigenspannungen 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.

Eine große Anzahl an Untersuchungen zu den Auswirkungen der Nachbehandlungsmethoden Hämmern und Nageln an Schweißdetails aus hochfesten Stählen existieren bereits. So empfiehlt [10] für das Detail einer Quersteife (unbehandelt: Ermüdungsklasse 80) mit Nachbehandlung eine Kerbklasse von 100. Damit lässt sich im Feldbereich der oben angesprochenen Verbundbrücke die notwendige Querschnittsfläche um 14 % reduzieren.

6.2 Ultrasonic Impact Treatment (UIT)

Ein relativ neues und bisher in Europa eher unbekanntes Verfahren der Schweißnahtnachbehandlung stellt das Ultrasonic Impact Treatment (UIT) dar, welches ursprünglich im Bereich der sowjetischen U-Boot-Technik entwickelt wurde [9]. Ein Ultraschallwandler wandelt dabei harmonische Schwingungen in mechanische Impulse um. Dabei erfolgt die eigentli-

che 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 5). Dadurch wird gleichzeitig die Kerbschärfe an der Schweißnaht verbessert und Druckeigenspannungen eingebracht. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der leichten Bedienbarkeit, der geringen Geräuschbelastung sowie der guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.



Bild 5. Ultrasonic Impact Treatment

6.3 Forschungsprojekt P620

Mit dem Hintergrund, durch bessere Ermüdungsfestigkeiten die Wirtschaftlichkeit von Stahlverbundbrücken zu fördern, wurden im Rahmen des AIF-Forschungsprojekts „Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung“ am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart sowie an der Materialforschungs- und Prüf-anstalt der Bauhaus-Universität Weimar die Effizienz von verschiedenen Nachbehandlungsverfahren an Schweißdetails aus höherfesten Stählen untersucht. Insgesamt besteht das Versuchsprogramm aus 200 Kleinprüfkörpern, 50 Großprüfkörpern sowie 12 Trägerversuchen. Dabei erfolgt eine Konzentration auf das für Brücken wie oben beschriebene kritische Kerbdetail Quersteife.

Im Folgenden sollen erste Zwischenergebnisse des Projekts dargestellt werden, die [11] entnommen wurden.

Die Bilder 6-8 zeigen die ersten Ergebnisse an Kleinprüfkörpern aus verschiedenen Stahlsorten unter der Belastung eines Einstufenkollektivs mit $R=0,1$. Dabei wurden die Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_C$ bei 2 Millionen Lastwechsel bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % angegeben. Auf die Angabe von charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten wird hier auf Grund der noch geringen Anzahl von Versuchen verzichtet.

Es wird deutlich, dass durch die Nachbehandlung die Ermüdungsfestigkeit gesteigert werden kann, wobei die besten Ergebnisse mit dem UIT-Verfahren erzielt werden. Im Bereich der Kurzzeitfestigkeit ist der Effekt jedoch deutlich kleiner als im Bereich der Dauerfestigkeit, da hier die eingebrachten Druckspannungen einen geringeren Effekt gegenüber der äußeren Last aufweisen. Die Versuchkörper versagten üblicherweise am Schweißnahtübergang, nur bei Versuchen der Güte S690 mit Anwendung des UIT-Verfahrens verla-

gerten sich die Risse ins Grundmaterial oder den Einspannbereich.

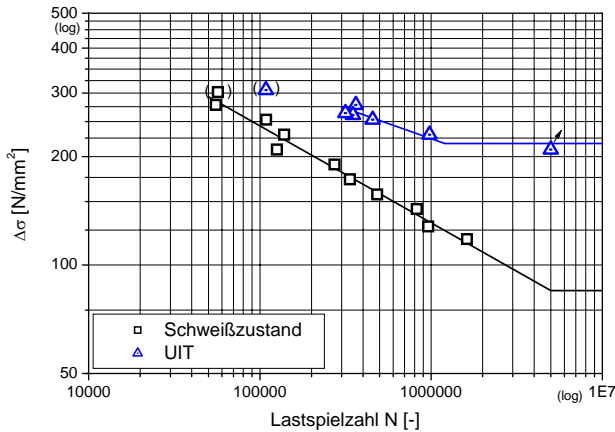


Bild 6. Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S355, R=0,1)

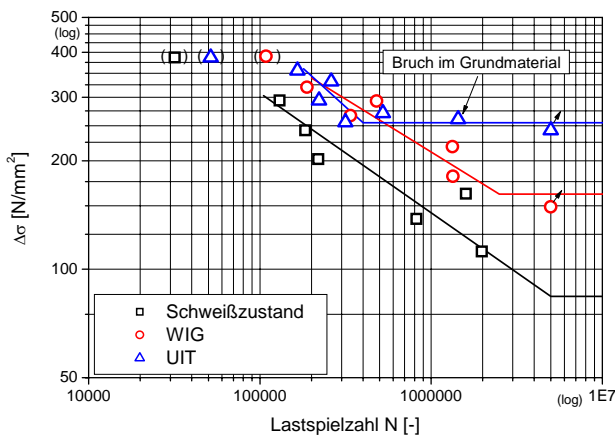


Bild 7. Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S460, R=0,1)

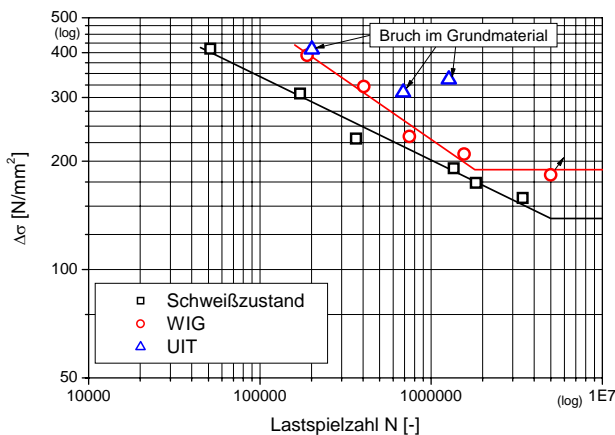


Bild 8. Wöhlerdiagramm (Kleinprüfkörper, Quersteife, S690, R=0,1)

Zu der Stahlgüte S690 wurde auch der Parameter Mittelspannung mit R-Werten von -1 ; $0,1$ und $0,5$ variiert. Es ergab sich an UIT-nachbehandelten Proben ein leichter Einfluss der Mittelspannung auf die Ermüdungsfestigkeit in der Größenordnung der DIN 4132.

Des Weiteren konnte ein deutlicher Einfluss der Größe des Prüfkörpers im Schweißzustand festgehalten werden. Bei den Großprüfkörpern mit einer Breite von etwa 160 mm ergaben sich rund 20 % geringere Ermüdungsfestigkeiten als bei den Kleinprüfkörpern von 40 mm Breite. Bei Prüfkörpern mit UIT-Nachbehandlung konnte dieser Einfluss nicht mehr festgestellt werden.

An geschweißten Trägern wurden Ermüdungsversuche mit einem Spannungsverhältnis von $R=-1$ durchgeführt. Für die Träger ohne eine Nachbehandlung der Naht begann wie erwartet der Anriss am Kerbdetail der Quersteife mit Ermüdungsfestigkeiten, die rund 35 % geringer waren als bei Kleinprüfkörperversuchen. Bei den Trägern mit UIT-Nachbehandlung wurde eine Verlagerung des Anrisses vom Nahtübergang der Quersteife in die Längsnaht festgestellt mit einer Lebensdauer, die um ca. 40 % höher ist als im unbehandelten Zustand. Weitere Versuche erfolgen hier, um die ersten Ergebnisse statistisch abzusichern.

Ferner wurden Nahtgeometrien und Kerbfaktoren bestimmt. Dazu sei auf [11] verwiesen.

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 70 – 90 % der rechnerischen Ermüdungsfestigkeit beaufschlagt. Nach einer darauf folgenden UIT-Behandlung wurde der Ermüdungsversuch weitergeführt. Erste Versuchsergebnisse in Bild 9 zeigen, dass die Anwendung des UIT-Verfahrens auch zur Ertüchtigung bestehender Konstruktionen sehr vielversprechend ist. Durch die nachträgliche UIT-Behandlung lassen sich Restlebensdauern, die mindestens das 15-fache der Restlebensdauer ohne Nachbehandlung betragen, erzielen.

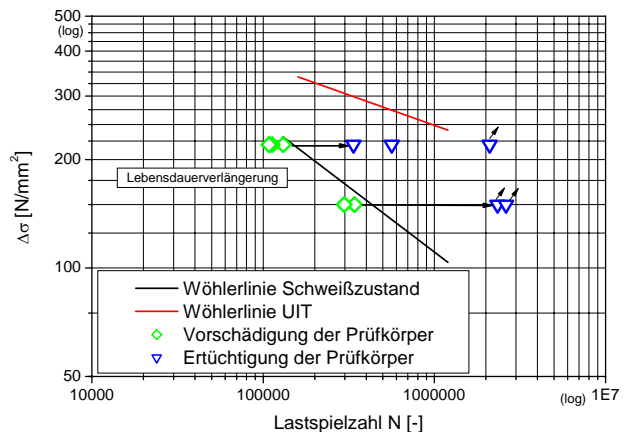


Bild 9. Lebensdauererweiterung durch nachträgliche Ertüchtigung mit UIT (Großprüfkörper, Quersteife, S460, R=0,1)

7 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.

8 Schrifttum

- [1] Schröter, F.: Höherfeste Stähle für den Stahlbau - Auswahl und Anwendung. Bauingenieur 78 (2003) S. 426-432.
- [2] DIN-Fachbericht 103: Stahlbrücken (2003).
- [3] prEN 1993-1-9: Eurocode 3, Teil 1-9: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Ermüdung, Entwurf Status 49 (2004).
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbau: DAST-Richtlinie 011, Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm², Anwendung für Stahlbauten, (1988).
- [5] Kuhlmann, U.; Dürr, A.; Roos, F.: Ermüdungsnachweis für Straßen-Verbundbrücken nach DIN-Fachbericht. Stahlbau 72 (2003) S. 679-682.
- [6] Änderung und Ergänzung der Anpassungsrichtlinie Stahlbau - Ausgabe Dezember 2001, DIBt-Mitteilungen 33 (2002) Nr. 1.
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.1-1 (1999).
- [8] Hölbling, W.; Müller, G.; Saal, H.: Tragverhalten von Kehlnahtverbindungen von höherfesten Feinkornbaustählen. Stahlbau 74 (2005) S. 1-8.
- [9] Statnikov, E. et al.: Ultrasonic tool for ultrasonic strengthening and relaxation treatment. Patent of the RF No. 472782 (1975).
- [10] Haagensen, P.; Maddox, S.: Post weld improvement for steel and aluminium structures. IIW Doc. XIII-1815-00 (2004).
- [11] 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 (zur Veröffentlichung).