

Ermüdungsverhalten HFH-nachbehandelter Kerbdetails des Mobilkranbaus

Im Mobilkranbau werden ultrahochfeste Feinkornbaustähle mit Streckgrenzen von bis zu 1100 bzw. 1300 N/mm² eingesetzt. Kritisch ist das Ermüdungsverhalten der geschweißten Kerbdetails, die hauptsächlich im oberen Zeitfestigkeitsbereich beansprucht werden. Eine Möglichkeit, die Lebensdauer zu erhöhen, stellt der Einsatz von Schweißnahtnachbehandlungsmethoden wie beispielsweise das höherfrequente Hämmern (HFH) dar. Bestehende Bemessungsvorschläge zur Erfassung von HFH berücksichtigen lediglich Stahlsorten bis maximal S960 und Blechdicken größer gleich 5 mm. Der Einfluss einer HFH-Behandlung auf das Ermüdungsverhalten geschweißter, ultrahochfester Stähle mit Streckgrenzen von 960 N/mm² und höher im oberen Zeit- bzw. im Kurzzeitfestigkeitsbereich ist bisher nicht hinreichend abgedeckt. An vier kranbautypischen Kerbdetails aus S960, S1100 und S1300 wurden Ermüdungsversuche zur Erfassung des Einflusses von HFH durchgeführt. Im Vergleich zum unbehandelten Nahtzustand konnten infolge einer HFH-Behandlung signifikant höhere Ermüdungsfestigkeitswerte sowie Lebensdauersteigerungen ab einer Lastwechselzahl von etwa 10 000 festgestellt werden. In Übereinstimmung mit existierenden Untersuchungen flacht die Wöhlerlinie infolge einer HFH-Behandlung auf etwa $m \sim 5$ ab, wenn die Ermüdungsrisse von den behandelten Nahtübergangskerben ausgehen. Die Einordnung der Versuchsergebnisse für den HFH-behandelten Nahtzustand in vorhandene Bemessungsansätze zeigt, dass die Kerbfallklassen aller Bemessungsansätze konservativ sind.

Fatigue behaviour of HFH-treated notch details of mobile crane structures. *In mobile crane structures, ultra high strength fine grained structural steels (UHS) with yield strengths up to 1100 N/mm² and 1300 N/mm² respectively are used. The fatigue life of welded notch details which can be classified into the upper finite fatigue life region is critical. One possibility to improve the fatigue behaviour is the application of post weld treatment methods like high frequency hammer peening (HFH). Existing design recommendations for the consideration of HFH are limited to maximum steel grades of S960 and plate thicknesses of 5 mm and higher. The influence of HFH-treatment on the fatigue behaviour of welded ultra high strength steels with yield strengths of 960 N/mm² and higher – loaded in the upper finite and low cycle fatigue (LCF) life region respectively – has not been investigated sufficiently so far. For this reason, fatigue tests have been performed at four typical welded notch details of mobile crane structures made of S960, S1100 and S1300 to determine the influence of HFH on the fatigue strength. The results of the HFH-treated specimens showed a significant improvement of the fatigue strength in comparison with the as welded toe condition. Furthermore, a fatigue life improvement due to HFH treatment can be observed at loading cycles of 10000 and higher. In accordance with existing investigations, the slope of the S-N-line increases to approximately $m \sim 5$ due to HFH treatment if the fatigue cracks start from the treated weld toes. The classification of the test results for the HFH-treated toe condition shows, that FAT classes of existing design proposals are conservative.*

1 Einleitung

Das Ermüdungsverhalten geschweißter Verbindungen wird vorwiegend durch Rissfortschritt ausgehend von rissähnlichen Imperfektionen an den

Schweißnahtübergängen und im Nahtwurzelbereich dominiert. Der Nachweis der Ermüdungssicherheit erfolgt daher entsprechend verschiedener Regelwerke ([1], [2]) unabhängig von der Höhe der Werkstoffstreckgrenze.

Die in den Regelwerken definierten Kerbfallklassen basieren vorwiegend auf Ermüdungsversuchen, die den mittleren und unteren Zeitfestigkeitsbereich abdecken.

Von den Stahlherstellern werden derzeit Stahlsorten mit Streckgrenzen von bis zu 1300 N/mm² angeboten, so genannte ultrahochfeste Feinkornbaustähle (UHS). Der Einsatz dieser Stahlsorten in geschweißten, ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen ist jedoch nur für Anwendungen mit hohen Eigenlasten oder hohen zyklischen Beanspruchungsamplituden sinnvoll, wie es beispielsweise bei Mobilkränen der Fall ist. Aufgrund der hohen Materialausnutzung lassen sich die Nutzlastbereiche von Mobilkränen in den oberen Zeit- bzw. Kurzzeitfestigkeitsbereich (LCF) einstufen, so dass die Lebensdauer der an Kranbauteilen vorkommenden geschweißten Kerbdetails zeitlich begrenzt ist.

Eine Möglichkeit, die Ermüdungsfestigkeit zu erhöhen, stellt der Einsatz von Schweißnahtnachbehandlungsmethoden wie beispielsweise das höherfrequente Hämmern (HFH) dar. Durch die Anwendung von HFH werden hauptsächlich Druckeigenspannungen in den behandelten Nahtübergangsbereichen induziert, die in einer Translation und Rotation der Wöhlerlinie resultieren. Aus diesem Grund schneiden sich die Wöhlerlinien unbehauelter ($m \sim 3$) und HFH-behandelter ($m \sim 5$) Kerbdetails theoretisch im oberen Zeitfestigkeitsbereich. Bisher wurde der Einfluss von HFH vorwiegend an Stahlsorten mit Streckgrenzen bis zu 960 N/mm² wissenschaftlich untersucht, so dass bestehende Bemessungsvorschläge zur Erfassung von HFH lediglich Stahlsorten bis maximal S960 und Blechdicken

größer gleich 5 mm berücksichtigen. Zur Erweiterung der Anwendbarkeit von HFH auf geschweißte UHS mit Stahlsorten bis zu S1300 und Blechdicken größer gleich 4 mm wurden daher Ermüdungsversuche an vier kranbautypischen Kerbdetails durchgeführt.

2 Stand der Technik zum höherfrequenten Hämmern

Das höherfrequente Hämmern stellt hinsichtlich seiner Wirkungsweise eine Weiterentwicklung herkömmlicher Hämmerverfahren [3] als Schweißnahtnachbehandlungsmethode dar (s. Bild 1) und wurde in den vergangenen Jahren verstärkt wissenschaftlich untersucht. Durch die Anwendung mittels HFH werden die lokalen, kerbscharfen Nahtübergänge plastisch verformt (s. Bild 2). Die Tiefe der Behandlungspur beträgt etwa 0,1 bis 0,3 mm ([4] bis [7]) und hängt neben der geometrischen Form der Bolzenspitze insbesondere von der Festigkeit des zu behandelnden Werkstoffes bzw. dessen Härte ab. Die plastische Verformung des Nahtübergangsbereiches resultiert in einer Kaltverfestigung der oberflächennahen Mikrostruktur. Mikrohärtemessungen zeigen, dass die Tiefe der aufgehärteten Randschicht bis zu etwa 1,5 mm betragen kann ([6], [8]). Durch die Nachbehandlung mit HFH wird der Eigenspannungszustand durch induzierte Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich gezielt verändert, so dass das Ermüdungsverhalten der Nahtübergangskerbe wesentlich beeinflusst wird. Die Höhe induzierter Druckeigenspannungen hängt von der Größe der Streckgrenze f_y des zu behandelnden Werkstoffes ab und nimmt mit steigender Streckgrenze zu.

Eigenspannungsmessungen an HFH-behandelten Nahtübergangskernen zeigen, dass die induzierten Druckeigenspannungen quer zur Nahtichtung bis in eine Tiefe von etwa 1 bis 2 mm reichen können und Werte von bis zu 75 % von f_y bzw. auch Werte oberhalb von f_y aufgrund von Kaltverfestigung einnehmen können ([4] bis [7], [9] bis [12]).

Die Wöhlerlinien HFH-behandelter Kerbdetails verlaufen deutlich flacher mit Neigungen von $m \sim 5$ im Vergleich zu $m \sim 3$ für den unbehan-

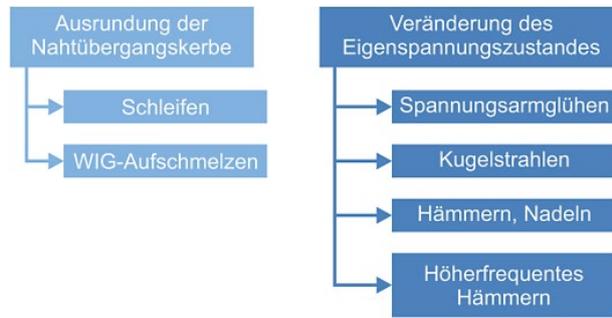


Bild 1. Einteilung von Schweißnahtnachbehandlungsmethoden hinsichtlich ihrer Wirkungsweisen
Fig. 1. Differentiation of post weld treatment methods with regard to their effectiveness

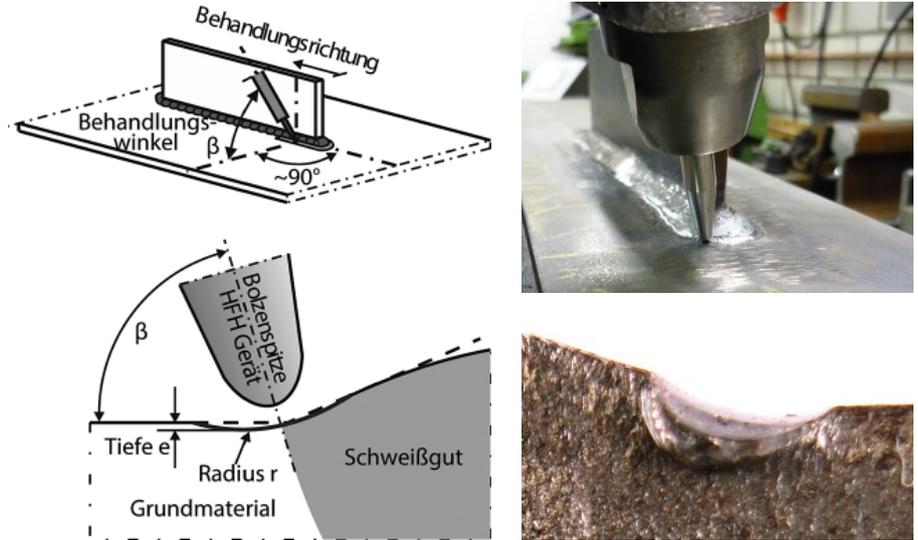


Bild 2. Lokale Nachbehandlung der Nahtübergangskerbe durch höherfrequentes Hämmern
Fig. 2. Local treatment of the weld toe due to high frequency hammer peening

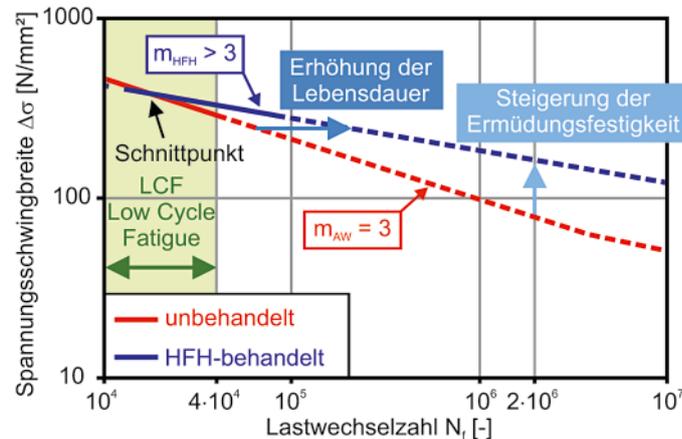


Bild 3. Schematischer Vergleich von Wöhlerlinien unbehandelter und HFH-behandelter Kerbdetails
Fig. 3. Schematic comparison of S-N-lines of untreated and HFH-treated notch details

delten Nahtzustand (s. Bild 3). Diese Rotation der Wöhlerlinie ist insbesondere auf den veränderten Eigenspannungszustand zurückzuführen, der in einer Verlängerung der Rissinitiierungsphase resultiert. Mit zunehmenden Beanspruchungen nimmt der lebensdauersteigernde Effekt der HFH-

Behandlung infolge eines schnelleren Abbaus der Druckeigenspannungen ab. Neben der Rotation der Wöhlerlinie wird der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$ zu höheren Ermüdungsfestigkeiten verschoben (s. Bild 3). Die erzielbare Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit nimmt mit steigender

Streckgrenze des zu behandelnden Werkstoffes aufgrund größerer induzierbarer Druckeigenstressungen zu [13].

Der positive Einfluss einer HFH-Behandlung auf die Ermüdungsfestigkeit eines geschweißten Kerbdetails wird derzeit normativ noch nicht berücksichtigt. In der Literatur existieren jedoch verschiedene Ansätze, mit deren Hilfe der Einfluss einer HFH-Behandlung erfasst werden kann. Hierbei wird die Kerbfallklasse des unbehandelten Details mit Hilfe eines Verbesserungsfaktors k , welcher von der eingesetzten Stahlsorte, der Geometrie des Kerbdetails und dem Spannungsverhältnis R abhängt, und ggf. die Neigung der Wöhlerlinie auf $m_{HFH} = 5$ erhöht ([3], [5], [14] bis [15]). Der Großteil der in der Literatur zur Verfügung stehenden Ergebnisse aus Ermüdungsversuchen an HFH-behandelten Kerbdetails bezieht sich auf Stahlsorten S355 und S690. Die bestehenden Bemessungsvorschläge zur Erfassung von HFH berücksichtigen daher Stahlsorten bis maximal S690 oder S960 und Blechdicken größer gleich 5 mm (s. Bild 4). Im Kurzzeitfestigkeitsbereich sowie für Stahlsorten S960 und höher sind diese Bemessungsvorschläge nicht hinreichend abgedeckt. Zur Erweiterung der Anwendbarkeit von HFH auf geschweißte, ultrahochfeste Feinkornbaustähle S960 und höher sind daher weitere Untersuchungen erforderlich.

Aus der Auswertung von vorhandenen Ergebnissen aus Ermüdungsversuchen an unbehandelten und HFH-behandelten Kerbdetails ergeben sich die folgenden Fragestellungen:

- Können die in den Kerbfalkatalogen [1], [2] definierten Wöhlerlinien, die an Versuchskörpern aus Stahlsorten mit niedrigeren Streckgrenzen ermittelt wurden, im oberen Zeit- bzw. Kurzzeitfestigkeitsbereich (LCF, s. Bild 3) mit Lastwechselzahlen von 10000 bis 40000 angewendet werden?
- Inwiefern wirkt sich der Einfluss einer HFH-Behandlung auf die Ermüdungsfestigkeit bei UHS mit Streckgrenzen von 960 N/mm² und höher aus?
- Kann ein lebensdauersteigernder Effekt einer HFH-Behandlung auch im oberen Zeit- bzw. Kurzzeitfestigkeitsbereich (LCF, s. Bild 3) mit vergleichsweise hohen Oberstressungen erzielt werden?
- Bis zu welchen Spannungsschwingbreiten bzw. Lastwechselzahlen ist der Einfluss einer HFH-Behandlung auf die Lebensdauer bzw. Bruchlastwechselzahl nachweisbar?

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsprogramm

Am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen wurden Ermüdungsversuche an vier verschiedenen geschweißten Kerbdetails a) Stumpfstoß mit und ohne Blechdickensprung, b) Quersteife, c) Längssteife und d) Lamelle aus den ultrahochfesten Feinkornbaustählen S960, S1100 und S1300 zur Erfassung des Einflusses des höherfrequenten Hämmerns durchgeführt (s. Tabelle 1) [16]. Für das Kerbdetail der doppelseitig aufgeschweißten Quersteife wurde bei den Versuchskörpern aus S1100 zu-

sätzlich eine Versuchsreihe mit durchgehender Kehlnaht (11-6-QSd) im Vergleich zur ansonsten umlaufenden Nahtausführung für dieses Kerbdetail untersucht. Der Zustand der Nahtübergangskerben aller Versuchskörper unterschied sich in unbehandelt (as welded) und HFH-behandelt. In Summe wurden 119 Ermüdungsversuche durchgeführt.

3.2 Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden aus Grobblechen mit Erzeugnisdicken von 4 bis 8 mm der ultrahochfesten, wasservergüteten Feinkornbaustähle S960, S1100 und S1300 angefertigt. Zur Vermeidung von thermisch bedingten Aufhärtungserscheinungen und Schnittriefenbildung an den Schnittflächen wurden die Bleche mittels Wasserstrahlverfahren zugeschnitten. Alle Versuchskörper wurden manuell mittels Metall-Aktivgasschweißen (MAGM, 135) unter Verwendung des Schweißzusatzwerkstoffes Union X90 geschweißt. Demzufolge liegt der Nominalwert der Streckgrenze des Zusatzwerkstoffes unterhalb der Streckgrenze der verwendeten Grundwerkstoffe. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass während des Schweißprozesses das Schweißgut durch den Grundwerkstoff lokal auflegiert wird, was zu höheren Festigkeiten im Nahtübergangsbereich im Vergleich zur Streckgrenze des Schweißgutes führt. Derzeit sind noch keine Zusatzwerkstoffe mit Streckgrenzen höher als 960 N/mm² für die schweißtechnische Verarbeitung von UHS ab S1100 verfügbar, so dass die

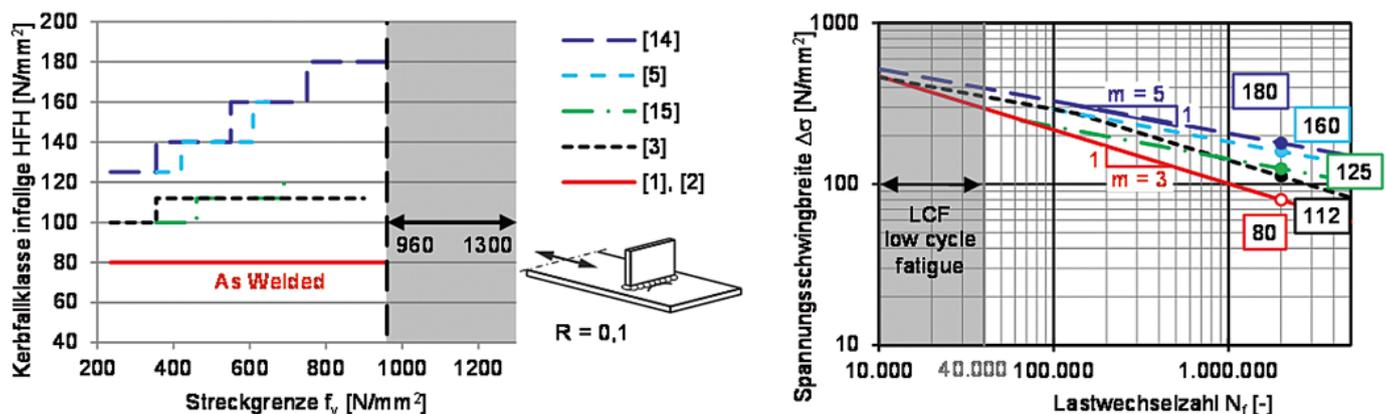
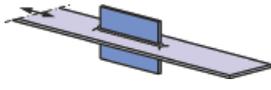
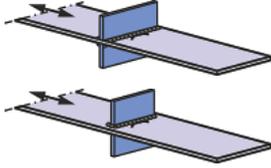
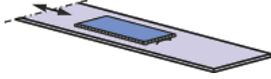
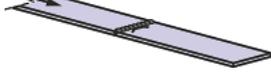
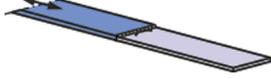


Bild 4. Kerbfallklassen (links) und maximal mögliche Wöhlerlinien (rechts) einer HFH-behandelten Nahtübergangskerbe für das Kerbdetail Quersteife entsprechend verschiedener Bemessungsansätze
 Fig. 4. FAT classes (left) and maximum possible S-N-lines (right) for a HFH-treated weld toe of notch detail of welded transversal stiffener according to different design proposals

Tabelle 1. Versuchsprogramm
Table 1. Test programme

Kerbdetail	Versuchsserie	Anzahl Versuche ¹⁾	Stahlsorte	Blechdicke	σ_{\max}/f_y
 Längssteife	S11-6-LS	5/6	S1100	6 mm	25–55 %
	S13-4-LS	5/5	S1300	4 mm	30–50 %
 Quersteife	11-6-QSd	5/6	S1100	6 mm	45–70 %
	11-6-QS	5/5	S1100	6 mm	35–75 %
	S13-4-QS	5/5	S1300	4 mm	30–50 %
 Lamelle	96-7-La	4/5	S960	7,5 mm	40–65 %
	S11-6-La	6/6	S1100	6 mm	30–55 %
	S13-4-La	5/5	S1300	4 mm	30–45 %
 Stumpfstoß	96-7-S	4/4	S960	7,5 mm	35–65 %
 Stumpfstoß mit Blech- dickensprung	S11-6-S	6/12	S1100	6/8 mm	35–60 %

1) Anzahl der Versuche für den unbehandelten sowie HFH-behandelten Nahtzustand.

Verwendung von Zusatzwerkstoffen mit niedrigeren Festigkeiten in der Fertigung von Stahlkonstruktionen für Mobilkrane üblich ist (so genanntes undermatching) [17].

Bei der Anfertigung der Versuchskörper der Kerbdetails Längssteife und Lamelle wurde darauf geachtet, dass keine Schweißnahtansätze und -enden im Stirnbereich der Lamellen und Steifen gesetzt wurden, da dort die versagenskritischen Bereiche der Versuchskörper im unbehandelten Nahtzustand vorliegen. Für das Kerbdetail Stumpfstoß wurden zwei verschiedene Ausführungsvarianten untersucht: zum Einen als einseitig durchgeschweißte V-Naht mit

Wurzellage für die Stahlsorte S960 (96-7-S) und zum Anderen als V-Naht mit Blechdickensprung und bündiger Wurzel- und Gegenlage für die Stahlsorte S1100 (S11-6-S, s. Bild 5).

3.3 Nachbehandlung durch höherfrequentes Hämmern

Nach dem Schweißen und Zuschnitt der Versuchskörper wurde etwa die Hälfte aller Versuchskörper mittels HFH manuell nachbehandelt. Die HFH-Behandlung wurde größtenteils mittels Pneumatic Impact Treatment (PIT) mit einer Behandlungsfrequenz in Höhe von 90 Hz sowie mit Bolzen-

spitzen vom Radius 2 mm für die Stahlsorten S960 und S1100 und 1,5 mm für die Stahlsorte 1300 durchgeführt. Bei dem Kerbdetail des Stumpfstoßes mit Blechdickensprung (S11-6-S) wurden zusätzlich sechs Versuchskörper mittels High Frequency Impact Treatment (HiFIT) mit Bolzenspitzen vom Radius 1,5 mm behandelt. Die HFH-Behandlung erfolgte an allen Nahtübergangskerben zum Grundmaterial (s. Bild 2). Bei den Kerbdetails Längssteife und Lamelle begrenzte sich die HFH-Behandlung auf die Stirnbereiche der Schweißnähte (s. Bild 6), da dort die versagenskritischen Bereiche vorliegen und eine Nachbehandlung entlang der kompletten Schweißnähte nicht erforderlich ist. In Bild 7 sind die infolge der HFH-Behandlung resultierenden plastischen Eindrückungen an den Nahtübergangskerben dem unbehandelten Nahtzustand exemplarisch für einen Versuchskörper des Kerbdetails des Stumpfstoßes mit Blechdickensprung gegenübergestellt. Während der Nachbehandlung erfolgte eine optische Kontrolle der Behandlungsspuren hinsichtlich der Behandlungsqualität, möglicher Mikrorisse sowie der Spurtiefe.

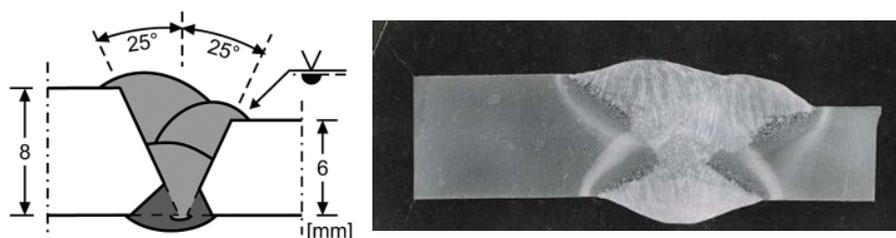


Bild 5. Schweißnahtausführung für das Kerbdetail Stumpfstoß mit Blechdickensprung (links) und Makroschliff (rechts)
Fig. 5. Execution of the weld for the notch detail of butt weld with transition in thickness (left) and macrosection (right)

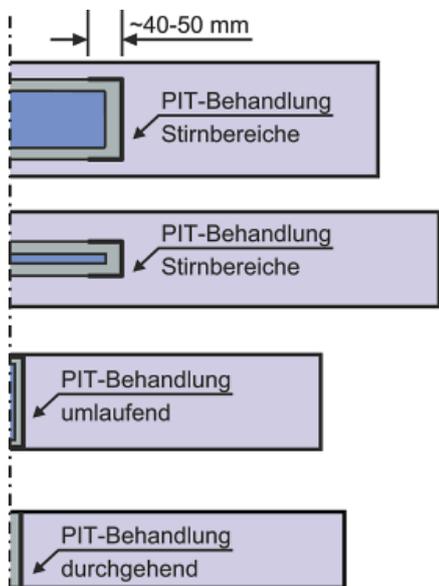


Bild 6. Draufsicht der Behandlungsgebiete der verschiedenen Kerbdetails
 Fig. 6. Top view of the treated areas of the different notch details

Im Rahmen von versuchsbegleitenden Untersuchungen wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin, röntgenographische Eigenspannungsmessungen mit Hilfe eines mobilen Röntgendiffraktometers an jeweils einem unbehandelten und PIT-behandelten Versuchskörper des Kerbdetails Stumpfstoß mit Blechdickensprung aus S1100 (S11-6-S) durchgeführt (s. Tabelle 2). Hierbei wurden jeweils die Eigenspannungen im oberflächennahen Bereich quer und längs zur Nahrichtung an allen vier Nahtübergangskerben (s. Bild 7) gemessen.

Infolge der PIT-Nachbehandlung konnte eine deutliche Veränderung des Eigenspannungszustands beobachtet werden. Die gemessenen Eigenspannungen quer zur Nahrichtung,

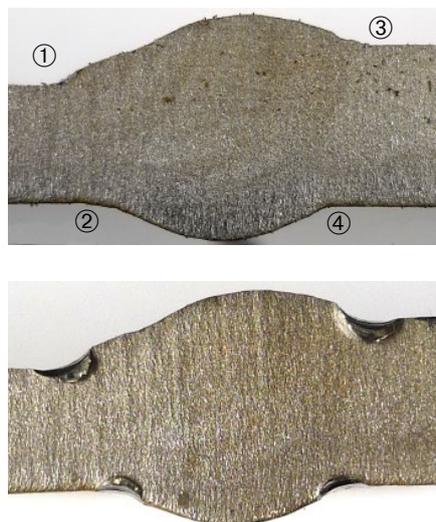


Bild 7. Vergleich der Nahtübergangskerben zwischen unbehandeltem (oben) und HFH-behandeltem (unten) Zustand
 Fig. 7. Comparison of weld toes of untreated (top) and HFH-treated (bottom) condition

die sich mit Normalspannungen aus äußeren Wechsellasten ermüdungswirksam überlagern, liegen für den unbehandelten Nahtzustand bei 0,15 mm Abtragungstiefe im Zugspannungsbereich und verlagern sich für den PIT-behandelten Nahtzustand in den Druckspannungsbereich mit durchschnittlich gemessenen Werten von etwa 75 % der Streckgrenze, so dass die in der Literatur vorhandenen Ergebnisse von Eigenspannungsmessungen an HFH-behandelten Nahtübergängen bestätigt werden.

3.4 Versuchsdurchführung

Die Ermüdungsversuche wurden unter Normalkraftbeanspruchung kraftgesteuert mit einstufigem Spannungs-kollektiv im Zugschwellbereich und

einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ bis zum Versagen der Versuchskörper durch Bruch durchgeführt. Die Ermüdungslasten wurden iterativ bestimmt, um Bruchlastwechselzahlen zwischen etwa 10000 und 40000 für die Versuchskörper mit unbehandeltem Nahtzustand zu erzielen und somit den oberen Zeit- bzw. Kurzzeitfestigkeitsbereich (LCF), welcher für die hier untersuchten Stahlsorten einen wichtigen Anwendungsbereich insbesondere im Hinblick auf ermüdungsbeanspruchte Bauteile aus dem Mobilkranbau darstellt, abzudecken. Die HFH-behandelten Versuchskörper wurden jeweils auf identischen Lastniveaus getestet, um die Bruchlastwechselzahlen für den unbehandelten und den HFH-behandelten Nahtzustand direkt vergleichen zu können.

4 Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse

4.1 Rissausgangsorte

Erwartungsgemäß versagten alle unbehandelten Versuchskörper aufgrund von Rissinitiierung von den Nahtübergangskerben zum Grundmaterial. Infolge der HFH-Behandlung verlagerten sich die Rissausgangsorte in 32 % der Fälle in Rand- bzw. Oberflächenkerben des Grundmaterials, in den Einspannbereich (Quersteife) oder in den Nahtwurzelbereich (Längssteife und Lamelle), (s. Tabelle 3 und Bild 8). Diese Verlagerung der Rissausgangsorte trat vorwiegend bei niedrigen Spannungsschwingbreiten auf. Der Grund dafür wird darin gesehen, dass die infolge des HFH-Prozesses induzierten Druckeigenspannungen nicht derart abgebaut werden wie auf höheren Beanspruchungsniveaus. Für das mit der niedrigsten Kerbschärfe untersuchte Kerbdetail Quersteife aus S1100 versagten nur 2 von 11 – die beiden höchstbeanspruchten – Versuchskörper mit Rissausgang von den HFH-behandelten Nahtübergangskerben. Demzufolge kann insbesondere bei vergleichsweise niedrigen Belastungsniveaus die Lebensdauer von HFH-behandelten Bauteilen durch angrenzende Kerben im Grundmaterial oder Nahtwurzelbereich limitiert werden, so dass sich eine Verlagerung der bemessungsrelevanten Kerbdetails ergeben kann.

Während der Durchführung der Versuchskörpernachbehandlung er-

Tabelle 2. Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen
 Table 2. Results of the residual stress measurements

Messposition ¹⁾	AW _{Oberfläche}		AW _(0,15 mm Tiefe)		PIT _{Oberfläche}	
	$\sigma_{res,l\ddot{a}ngs}^{2)}$	$\sigma_{res,quer}^{3)}$	$\sigma_{res,l\ddot{a}ngs}^{2)}$	$\sigma_{res,quer}^{3)}$	$\sigma_{res,l\ddot{a}ngs}^{2)}$	$\sigma_{res,quer}^{3)}$
	in N/mm ²					
1: Decklage (6 mm)	149	42	-7	140	-760	-768
2: Gegenlage (6 mm)	-205	-14	-231	136	-600	-774
3: Decklage (8 mm)	-47	-4	81	150	-505	-687
4: Gegenlage (8 mm)	-225	129	-214	58	-630	-1008

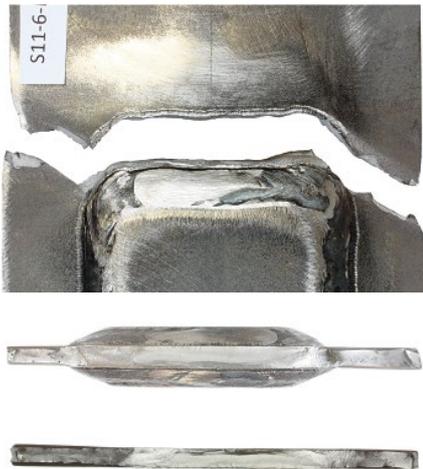
Messfehler ~ 10 bis 50 N/mm²
¹⁾ Messpositionen entsprechend Bild 7
²⁾ Eigenspannungen längs zur Nahrichtung
³⁾ Eigenspannungen quer zur Nahrichtung

Tabelle 3. Rissausgangsorte der HFH-behandelten Versuchskörper
Table 3. Failure modes of HFH-treated test specimens

Kerbdetail	Versuchs- serie	Stahl- sorte	Rissausgang von			
			Naht- übergang	Naht- wurzel	Grund- material ¹⁾	Einspan- nung
Längssteife	S11-6-LS	S1100	5	1	-	-
	S13-4-LS	S1300	2	1	2	-
Quersteife	11-6-QSd	S1100	1	-	2	3
	11-6-QS	S1100	1	-	2	2
	S13-4-QS	S1300	4	-	1	-
Lamelle	96-7-La	S960	2	2	1	-
	S11-6-La	S1100	4	1	1	-
	S13-4-La	S1300	5	-	-	-
Stumpfstoß	96-7-S	S960	4	-	-	-
Stumpfstoß mit Blechkicken- sprung	S11-6-S	S1100	12	-	-	-
Σ			40	5	9	5

¹⁾ Rand- oder Oberflächenkerben im Grundmaterial

a) Rissausgang von der Nahtübergangskerbe
 $\sigma_{max} = 0,55 \cdot f_{y,nom}$



b) Rissausgang von der Nahtwurzelkerbe
 $\sigma_{max} = 0,30 \cdot f_{y,nom}$



Bild 8. Bruchbilder und -flächen von zwei HFH-behandelten Versuchskörper des Kerbdetails Lamelle
Fig. 8. Fracture types and fracture surfaces of two HFH-treated test specimens of the notch detail welded cover plate



Bild 9. Plastische Eindrückungen im angrenzenden Grundmaterial („Ausrutscher“)
Fig. 9. Plastic deformations in adjacent base material

schwerte ein geringer Nahtanstiegs-
winkel die Spurtreue des HFH-Gerätes,
so dass vereinzelt plastische Eindrückungen im angrenzenden Grundmaterial entstanden (s. Bild 9), die im Folgenden als „Ausrutscher“ bezeichnet werden. Diese „Ausrutscher“ werden zum Teil skeptisch hinsichtlich ihrer Kerbwirkung begutachtet und stellen oftmals ein Diskussionsthema dar, obwohl keine Versuchsergebnisse aus der Literatur bekannt sind, in denen Ermüdungsrisse von diesen „Ausrutschern“ ausgegangen sind. Während der Versuchsdurchführung konnten keine Rissausgänge von diesen „Ausrutschern“ beobachtet werden, so dass sich diese Skepsis versuchstechnisch nicht bestätigt. Es ist davon auszugehen, dass infolge der plastischen Verformung Druckeigenstressungen an der Werkstoffoberfläche resultieren, die sich günstig auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken und somit das Ermüdungsverhalten HFH-behandelter Kerbdetails durch diese „Ausrutscher“ nicht negativ beeinflusst wird.

4.2 Lebensdauer und Ermüdungsfestigkeit

Die Bruchlastwechselzahlen N_f der un-
behandelten Versuchskörper reichen
von etwa 5000 bis 110000 und decken
somit den LCF-Bereich und oberen
Zeitfestigkeitsbereich ab (s. Bild 10).
Die Einzelergebnisse und die mit einer
Wöhlerlinienneigung in Höhe von
 $m = 3$ statistisch ausgewerteten,
charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten
aller unbehandelten Versuchskörper
(s. Bild 11) liegen zum Teil deutlich
oberhalb der Wöhlerlinien jeweils
zugehöriger Kerbfallklassen entspre-
chend DIN EN 1993-1-9 [1] sowie
IIW [2]. Die konservative Einordnung
in die gegebenen Kerbfallklassen ([1],
[2]) ist auf eine für die schweißtechni-
sche Verarbeitung der hier untersuchten
Stahlsorten erhöhte, praxisübliche
Schweißnahtqualität zurückzuführen,
die sich auch mit Ausnahme der beiden
Serien 96-7-S und S11-6-S in einer
vergleichsweise niedrigen Streuung der
Versuchsergebnisse widerspiegelt.
Ein Einfluss der Werkstoffstreckgrenze
ist für den unbehandelten Nahtzustand
nicht erkennbar.

Infolge der HFH-Behandlung
konnten deutlich höhere Bruchlast-
wechselzahlen N_f im Vergleich zum
unbehandelten Nahtzustand erzielt

werden (s. Bild 10). Aufgrund der infolge des HFH-Prozesses induzierten Druckeigenstressungen (s. Tabelle 2), welche die Dauer der Rissinitiationsphase verlängern, verläuft die *Wöhlerlinie* deutlich flacher im Vergleich zum unbehandelten Nahtzustand und stimmt unter Berücksichtigung der Ergebnisse mit Rissausgang an den HFH-behandelten Nahtübergängen mit einer im Rahmen von Bemessungsvorschlägen oftmals definierten Neigung in Höhe von $m = 5$ ([5], [14] und [15]) sehr gut überein.

Die mittleren und charakteristischen Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{m, 50\%}$ und $\Delta\sigma_{C, 95\%}$ wurden für den unbehandelten Nahtzustand mit einem festen Wert der *Wöhlerlinienneigung* von $m = 3$ und für den HFH-behandelten Nahtzustand mit $m = 5$ sowie zusätzlich mit einem variabel ermittelten Wert ausgewertet (s. Bild 11). Aufgrund der geringen Anzahl der Versuche für jede Versuchsserie wurden für die statistische Auswertung auch Ergebnisse berücksichtigt, bei denen der Rissausgang von den jeweiligen Nahtübergängen abwich (s. Tabelle 3). Diese Art der Auswertung erscheint jedoch berechtigt, da die Ergebnisse HFH-behandelter Versuchskörper mit Rissausgang von den Nahtübergängen (volle Symbole) und mit alternativen Rissausgängen (leere Symbole) größtenteils in einem üblichen Streuband liegen (s. Bild 12). Eine Ausnahme stellen die Ergebnisse am Kerbdetail der Quersteife aus S1100 dar (Serien 11-6-QSd und 11-6-QS), bei denen die Ermüdungsriss hauptsächlich von Kerben im Grundmaterial oder Einspannbereich ausgingen (s. Tabelle 3 und Bild 12) und somit die zugehörige *Wöhlerlinie* für diese Versuchsergebnisse mit einer Neigung von $m = 3$ abgebildet werden kann.

Die Streubänder für den HFH-behandelten Nahtzustand sind teilweise zwar höher als für den unbehandelten Nahtzustand, was insbesondere auf die bei niedrigeren Beanspruchungen variierenden Rissausgangsorte zurückzuführen ist, insgesamt jedoch gering. Die Ergebnisse lassen daher auf eine hohe Nachbehandlungsqualität schließen, die bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren erzielt werden kann.

In Abhängigkeit des Kerbdetails verbessert sich der Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{m, 50\%}$ infolge ei-

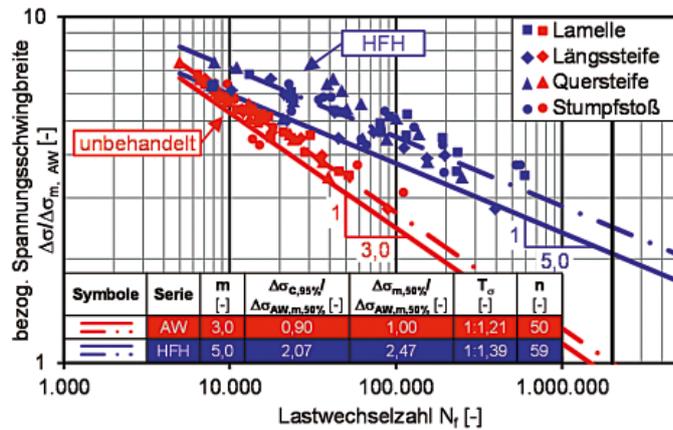


Bild 10. Ergebnisse der Ermüdungsversuche aller Versuchskörper im normierten Wöhlerdiagramm

Fig. 10. Results of the fatigue tests of all specimens within a normalized S-N diagram

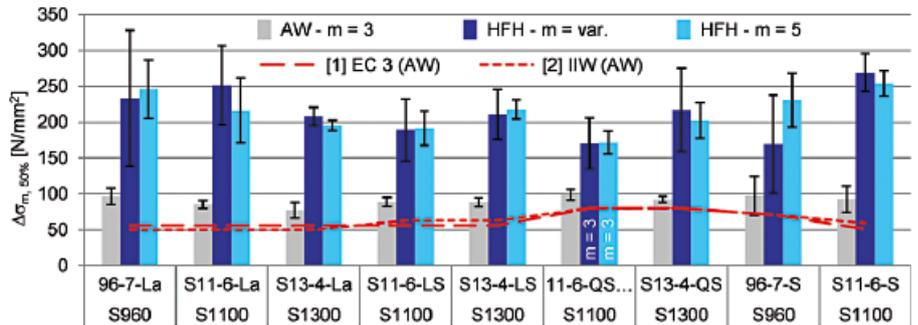


Bild 11. Vergleich zwischen den mittleren Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{m, 50\%}$ und den jeweils zugehörigen Kerbfallklassen entsprechend DIN EN 1993-1-9 [1] und IIW [2]

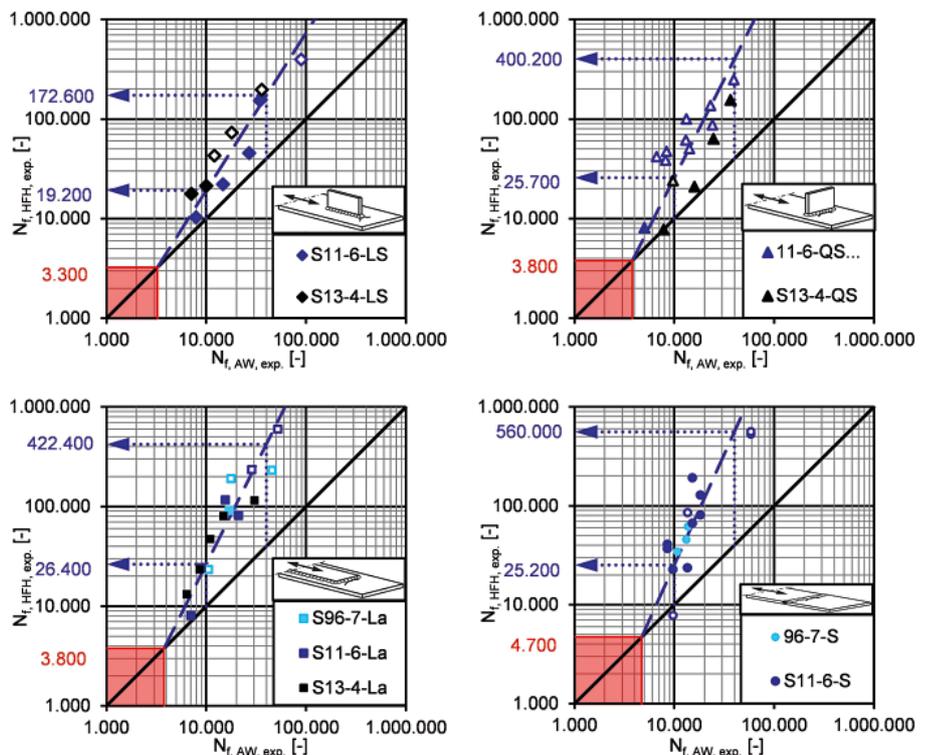


Bild 12. Vergleich der Bruchlastwechselzahlen N_f für den unbehandelten und HFH-behandelten Nahtzustand

Fig. 12. Comparison of loading cycles until failure N_f for the as welded and HFH treated toe condition

ner HFH-Behandlung bei Auswertung mit einer *Wöhler*linienneigung von $m = 5$ um Faktoren von 2,2 bis 2,8 im Vergleich zum unbehandelten Nahtzustand. Die Ergebnisauswertung für die Kerbdetails Längssteife (LS) und Stumpfstoß (S) lassen einen Einfluss der Werkstoffstreckgrenze auf die Wirksamkeit der HFH-Behandlung erkennen. Die Ermüdungsfestigkeiten lagen bei Verwendung der Stahlsorten S1300 (LS) bzw. S1100 (S) um etwa 15 % bzw. 10 % höher als bei Verwendung von S1100 (LS) bzw. S960 (S). Die Ergebnisse der beiden Kerbdetails Lamelle und Quersteife zeigen keinen erkennbaren, lebensdauersteigernden Einfluss mit zunehmender Werkstoffstreckgrenze.

Die Bruchlastwechselzahlen N_f unbehaltener und HFH-behandelter Versuchskörper schneiden sich theoretisch im LCF Bereich bei einer Lastwechselzahl von etwa 4000 (s. Bild 12). In dem für die Anwendung dieser Stahlsorten wichtigen oberen Zeitfestigkeitsbereich mit Bruchlastwechselzahlen N_f von 10000 bis 40000 für den unbehaltenden Nahtzustand werden in Abhängigkeit von Kerbdetail und Streckgrenze infolge einer HFH-Behandlung Lebensdauerzunahmen um Faktoren von etwa 2 bis 10 erzielt. Mit zunehmenden Spannungsschwingbreiten nimmt der lebensdauersteigernde Effekt der HFH-Behandlung ab, da von einem schnelleren Abbau der Druckeigenstressungen auszugehen ist.

Bei der Bewertung des Einflusses der Werkstoffstreckgrenze sind die unterschiedlichen Randbedingungen wie Blechdicken, Schweißnahtgeometrie und Winkelverzug zu beachten. Bei vergleichsweise niedrigen Blechdicken ist davon auszugehen, dass sich das durch den HFH-Prozess erzielbare Eigenspannungsfeld nicht derart ausbilden kann, wie es bei größeren Blechdicken möglich ist. Abweichungen in der lokalen Nahtgeometrie sowie teilweise aufgetretene Winkelverzüge ([18] bis [19]) werden im Rahmen des Nennspannungskonzeptes auf der Einwirkungsseite nicht erfasst, so dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beeinträchtigt wird. Die Bewertung der Ergebnisse mit Hilfe weiterer Konzepte, wie dem Struktur- und Kerbspannungskonzept, ist daher Bestandteil weiterer Untersuchungen ([20] bis [21]).

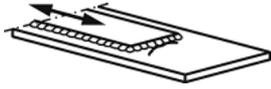
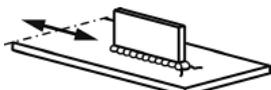
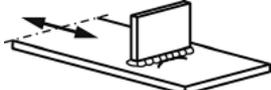
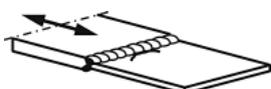
Eine ausschließliche Betrachtung der Höhe der Streckgrenze der jeweils eingesetzten Grundwerkstoffe erscheint ebenfalls nicht sinnvoll, da die Versuchskörper aller Versuchsreihen mit dem Zusatzwerkstoff X90 geschweißt wurden. Im wärmebeeinflussten Bereich liegt daher eine Mismatch-Verbindung vor, so dass die Festigkeit im lokalen Nahtübergangsbereich, die einen wesentlichen Einflussfaktor für die infolge des HFH-Prozesses induzierten Druckeigenstressungen darstellt, durch die Werkstoffeigenschaften des Schweißzusatzwerkstoffes begrenzt wird.

4.3 Bemessungsempfehlungen

Die Ergebnisse für den HFH-behandelten Nahtzustand wurden in die im Rahmen von Bemessungsempfehlun-

gen vorgeschlagenen Kerbfallklassen zur Berücksichtigung von HFH zunächst vereinfacht für die jeweils maximal gültige Streckgrenze eingeordnet (s. Tabelle 4). Die 95 %-Fraktilwerte der Versuchsergebnisse $\Delta\sigma_{C,95\%}$ für den HFH-behandelten Nahtzustand liegen mit Ausnahme des Kerbdetails der Quersteife der Stahlsorte S1100, dessen Ergebnisse aufgrund vorwiegender Rissausgänge von Grundmaterial- oder Einspannkerben mit einer abweichenden Neigung von $m = 3$ ausgewertet wurden, zum Teil deutlich oberhalb aller Kerbfallklassen der unterschiedlichen Bemessungsansätze (s. Bild 13). Die Auswertung der Ergebnisse für die Kerbdetails Längssteife, Quersteife und Stumpfstoß zeigt, dass die jeweils nach den verschiedenen Bemessungsansätzen zugeordneten Kerbfallklassen konservativ sind (s. Bild 14). Der Bemessungs-

Tabelle 4. Maximal mögliche Kerbfallklassen verschiedener Bemessungsansätze zur Berücksichtigung von HFH
 Table 4. Maximum FAT classes of different design proposals for the consideration of HFH

Bemessungsansatz	EC 3 (AW)	IIW	Dürr	REFRESH	Yildirim
Quellen	[1]	[2] bis [3]	[15]	[5]	[14]
Bezugsregelwerk	-	IIW	EC 3	EC 3	IIW
Neigung m	3,0	3,0	5,0	5,0	5,0
max. Stahlsorte	S690	S900	S690	S690	S960
Kerbdetail	Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_C$				
Lamelle 	56	71	-	-	-
Längssteife 	56	90 ¹⁾	-	112 ³⁾	160
Quersteife 	80	112 ¹⁾	125 ²⁾	160 ³⁾	180
Stumpfstoß 	71	100 ¹⁾	-	140 ³⁾	180
Stumpfstoß mit Blechdickensprung 	51	80	-	100 ³⁾	140

1) Die Verschneidung mit der Kerbfallklasse 160 mit $m = 5,0$ ist zu beachten.
 2) Die Verschneidung mit der Kerbfallklasse 80 mit $m = 3,0$ ist zu beachten.
 3) Die *Wöhler*linien gelten für Lastwechselzahlen mit $N \geq 10^5$.

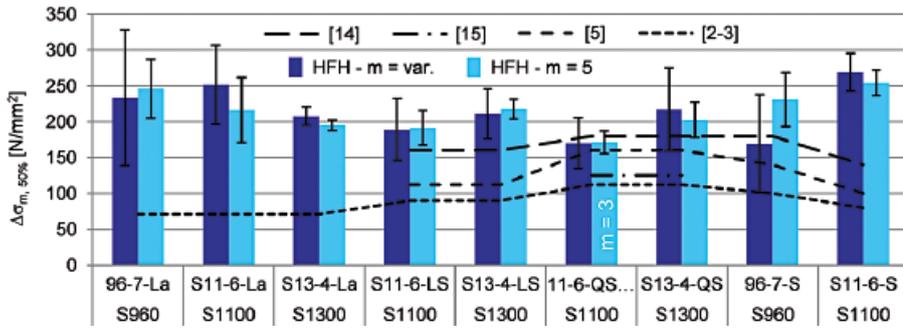


Bild 13. Vergleich der Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{m,50\%}$ mit Kerbfallklassen verschiedener Bemessungsvorschläge für den HFH-behandelten Nahtzustand
 Fig. 13. Comparison of the fatigue strengths $\Delta\sigma_{m,50\%}$ with FAT classes of different design proposals for the HFH-treated toe condition

sungsvorschlag nach Yildirim [14] stellt die beste Näherungslösung dar, da die diesem Ansatz zugrundeliegenden Ermüdungsversuche Streckgrenzen von

bis 960 N/mm² berücksichtigen. Insbesondere für das Kerbdetail des Stumpfstoßes mit Blechdickensprung scheint eine weitere Höherstufung infolge ei-

ner HFH-Behandlung in die Kerbfallklasse 160 möglich.

Für das Kerbdetail Lamelle existiert bisher kein Bemessungsvorschlag, so dass lediglich der allgemein gültige IIW-Ansatz [3] anwendbar ist, sofern ein Ermüdungsversagen mit Beginn von der Schweißnahtwurzel ausgeschlossen werden kann. Insbesondere im Zeitfestigkeitsbereich ist der IIW-Ansatz jedoch zu konservativ, so dass sowohl eine weitere Höherstufung der Kerbfallklasse infolge einer HFH-Behandlung sowie eine Anpassung der Wöhlerlinienneigung auf $m = 5$ möglich ist (s. Bild 14). Die Ergebnisse der untersuchten Versuchskörper liegen ausnahmslos für alle Rissausgänge oberhalb der eingezeichneten Kerbfallklasse 160.

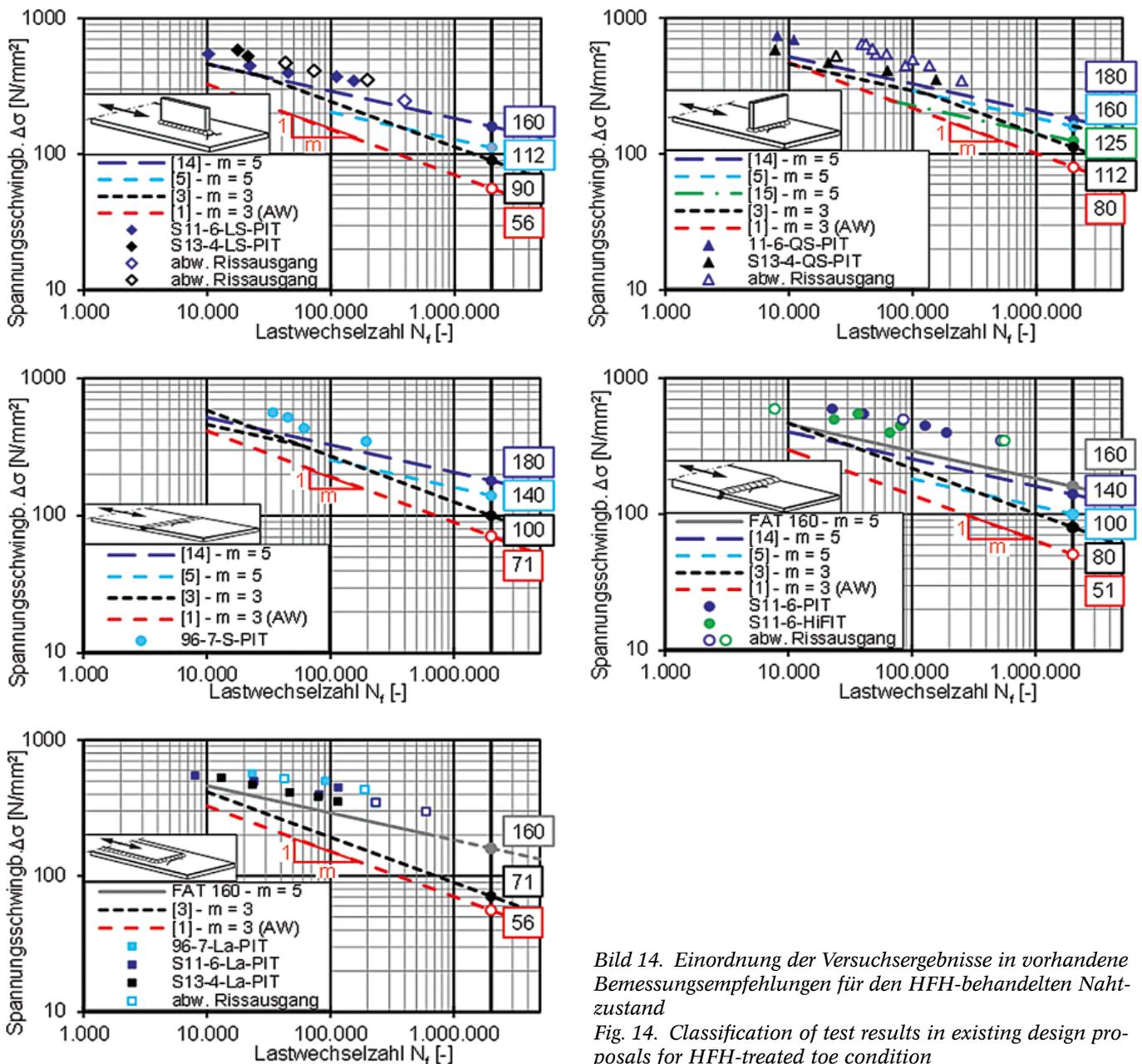


Bild 14. Einordnung der Versuchsergebnisse in vorhandene Bemessungsempfehlungen für den HFH-behandelten Nahtzustand
 Fig. 14. Classification of test results in existing design proposals for HFH-treated toe condition

Bei der Einstufung der Versuchsergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Ermüdungsversuche für den HFH-behandelten Nahtzustand vorwiegend im oberen Zeitfestigkeitsbereich durchgeführt und daher die *Wöhler*linien zur Bestimmung des Bezugswertes der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{C,95\%}$ bezogen auf $2 \cdot 10^6$ Lastwechsel in den unteren Zeitfestigkeitsbereich extrapoliert wurden. Im unteren Zeitfestigkeitsbereich können angrenzende Kerbdetails wie der Schweißnahtwurzelbereich bemessungsrelevant werden, deren Ermüdungsverhalten durch die HFH-Behandlung nicht positiv beeinflusst wird.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird noch keine Erweiterung der vorhandenen Bemessungsansätze auf Stähle bis S1300 vorgenommen. Die Entwicklung eines Bemessungskonzeptes zur Berücksichtigung von HFH bei geschweißten ultrahochfesten Stahlsorten bis S1300 erfolgt in [20].

4.4 Übertragbarkeit auf die praktische Anwendung

Die Auswertung der Ermüdungsversuche zeigt, dass die Lebensdauer infolge einer Nachbehandlung mittels HFH im oberen Zeitfestigkeitsbereich mit maximalen Spannungen σ_{\max} bis zu 75 % der Werkstoffstreckgrenze (s. Tabelle 1) verbessert werden kann. Einzelne Überlasten, die beispielsweise während des Betriebs eines Mobilkrans auftreten, können die Wirksamkeit einer HFH-Behandlung infolge Eigenspannungsabbau reduzieren, wenn die lokale Beanspruchung an der Nahtübergangskerbe die lokale Werkstoffstreckgrenze überschreitet [22]. Demzufolge begrenzen existierende Bemessungsansätze zum Teil die maximalen Oberspannungen σ_{\max} bzw. Spannungsschwingbreiten $\Delta\sigma$ eines Lastkollektives auf 80 % bzw. 90 % der Streckgrenze ([3], [14]). Untersuchungen in [5] zeigen jedoch, dass insbesondere bei Verwendung höherfester Stähle ein stabiles Verhalten induzierter Druckeigenspannungen unter zyklischen Beanspruchungen beobachtet werden kann und keine signifikanten Beeinträchtigungen des Ermüdungsverhaltens HFH-behandelter Nahtübergangskerben durch einzelne Überlasten bzw. quasistatische Vorlasten auftreten. Dieser Umstand ist ins-

besondere auf die aus dem HFH-Prozess resultierende Randschichtverfestigung zurückzuführen.

Bei der Bemessung von HFH-behandelten Nahtübergangskerben können angrenzende Kerbdetails wie Oberflächenfehler, Schnittkanten oder der Nahtwurzelbereich bemessungsrelevant werden, welche die Lebensdauer der ermüdungsgefährdeten Konstruktion begrenzen. Wenn HFH während der Fertigung einer neuen Konstruktion zum Einsatz kommt, sollten daher die nachzubehandelnden Kerbdetails mit einer hohen Ausführungsqualität schweißtechnisch verarbeitet werden und nach dem Schweißprozess entstandene Fehler vor der Nachbehandlung beseitigt werden. Während der Ausführung der Schweißnahtnachbehandlung ist die Sicherstellung der Behandlungsqualität von großer Bedeutung. In ([5], [23] und [24]) sind Vorschläge zur Verfahrensanweisung und Qualitätssicherung HFH-behandelter Schweißnahtdetails erarbeitet worden, die die Bereiche Personalschulung, Schweißnahtoberflächenvorbereitung, Arbeitssicherheit, Funktionstüchtigkeit, Anwendung, Qualitätskontrolle und Dokumentation abdecken.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen von Ermüdungsversuchen wurde der Einfluss einer HFH-Nachbehandlung auf das Ermüdungsverhalten geschweißter, ultrahochfester Feinkornbaustähle S960, S1100 und S1300 untersucht. Im Vergleich zum unbehandelten Nahtzustand konnten infolge einer HFH-Behandlung signifikant höhere Ermüdungsfestigkeiten sowie Lebensdauersteigerungen ab einer Lastwechselzahl von etwa 10 000 festgestellt werden. Die *Wöhler*linien HFH-behandelter Versuchskörper verlaufen aufgrund der durch den HFH-Prozess induzierten Druckeigenspannungen im Nahtübergangsbereich deutlich flacher und stimmen unter Berücksichtigung der Ergebnisse mit Rissausgang von den HFH-behandelten Nahtübergängen mit einer im Rahmen von Bemessungsempfehlungen vorgeschlagenen Neigung in Höhe von $m = 5$ sehr gut überein. Bei Auswertung der *Wöhler*linien mit einer Neigung von $m = 5$ konnte die Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zum unbehandelten Naht-

zustand durch die Anwendung von HFH mindestens verdoppelt werden. Für die Kerbdetails Längssteife (LS) und Stumpfstoß (S) konnte eine Zunahme der Ermüdungsfestigkeit HFH-behandelter Versuchskörper von 15 % bzw. 10 % bei einem Anstieg der Streckgrenze von 1100 auf 1300 N/mm² (LS) bzw. 960 auf 1100 N/mm² (S) beobachtet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Neigungen schneiden sich die *Wöhler*linien unbehandelter und HFH-behandelter Versuchskörper theoretisch bei etwa 4 000 Lastwechseln. Im LCF-Bereich mit Bruchlastwechselzahlen N_f von etwa 10 000 bis 40 000 für den unbehandelten Nahtzustand werden infolge einer HFH-Behandlung etwa die zwei- bis zehnfachen Lebensdauern erreicht. Im Rahmen bestehender Bemessungsempfehlungen zur Berücksichtigung von HFH vorgeschlagene Kerbfallklassen sind konservativ im Vergleich zu den Ergebnissen für den HFH-behandelten Nahtzustand. Aufgrund der lokalen Verbesserung des Ermüdungsverhaltens können angrenzende Kerbdetails wie Schnittkanten oder der Nahtwurzelbereich bemessungsrelevant werden.

Das Ermüdungsverhalten unter variablen, betriebsähnlichen Beanspruchungskollektiven unter Berücksichtigung von Überlasten oder Vorlasten bedarf einer experimentellen Absicherung und ist Gegenstand weiterführender Untersuchungen. Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse wird in [20] ein Bemessungskonzept zur Berücksichtigung von HFH bei geschweißten ultrahochfesten Stahlsorten bis S1300 entwickelt.

Danksagung

Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen der von der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) geförderten KmU-Kurzstudie P938 „Einfluss des höherfrequenten Hämmerns auf die Ermüdungsfestigkeit ultrahochfester Stähle der Festigkeitsklassen S960, S1100 und S1300 am Beispiel geschweißter Kerbdetails“ [16] am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung bei der FOSTA sowie für die Bereitstellung von Material, die Anfertigung und Nachbehandlung

der Versuchskörper sowie die beratende Unterstützung bei den folgenden Industriepartnern: ThyssenKrupp Steel Europe AG, SSAB, DEPA Gesellschaft für Kranauslegerteile mbH, PITec GmbH und Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM Berlin, Fachbereich Integrität von Schweißverbindungen.

Literatur

- [1] DIN EN 1993-1-9:2012-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauteilen – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009.
- [2] *Hobbacher, A.*: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding, Doc. IIW-1823-07 ex XIII-2151r4-07/ XV-1254r4-07, 2008.
- [3] *Haagensen, P. J., Maddox, S. J.*: IIW recommendations on methods for improving the fatigue strength of welded joints. International Institute of Welding, Woodhead Publishing, 1st Edition, Cambridge, 2013.
- [4] *Kuhlmann, U., Ummenhofer, T., Kudla, K., Weidner, P.*: Untersuchungen zur Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren im Stahlwasserbau. Schlussbericht, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), 2013.
- [5] *Ummenhofer, T.* et al.: REFRESH – Lebensdauererweiterung bestehender und neuer geschweißter Stahlkonstruktionen. Schlussbericht Projekt P 702, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. FOSTA, Düsseldorf, 2011.
- [6] *Kuhlmann, U., Günther, H.-P.*: Experimentelle Untersuchungen zur ermüdungssteigernden Wirkung des PIT-Verfahrens. Versuchsbericht, Universität Stuttgart, 2009.
- [7] *Kuhlmann, U., Dürr, A., Bergmann, J., Thumser, R.*: Effizienter Stahlbau aus höherfesten Stählen unter Ermüdungsbeanspruchung. Schlussbericht Projekt P 620, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. FOSTA, Düsseldorf, 2006.
- [8] *Statnikov, E. S., Korostel, V. Y., Manelik, A. D.*: On identify in UIT preparation for comparative testing and field application. International Institute of Welding, Doc. XIII-2180-07, 2007.
- [9] *Yildirim, H. C., Marquis, G. B., Barsoum, Z.*: A round robin study of high-frequency mechanical impact (HFMI)-treated welded joints subjected to variable amplitude loading. *Welding in the World* 57 (2013), no. 3, pp. 437–447.
- [10] *Puthli, R.* et al.: Detaillösungen bei Ermüdungsfragen und dem Einsatz hochfester Stähle bei Türmen von Off-shore-Windenergieanlagen. Schlussbericht Projekt P 633, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. FOSTA, Düsseldorf, 2008.
- [11] *Cheng, X., Fisher, J. W., Prask, H. J., Gnäupel-Herold, T., Yen, B. T., Roy, S.*: Residual stress modification by post-weld treatment and its beneficial effect on fatigue strength of welded structures. *International Journal of Fatigue* 25 (2003), no. 9–11, pp. 1259–1269.
- [12] *Janosch, J. J.* et al.: Improvement of fatigue strength in welded joints (in HSS and in aluminium alloys) by ultrasonic hammer peening. *Welding in the World* 37 (1996), no. 2, pp. 72–83.
- [13] *Yildirim, H. C., Marquis, G. B.*: Overview of fatigue data for high frequency mechanical impact treated welded joints. *Welding in the World* 56 (2012), no. 7–8, pp. 82–96.
- [14] *Yildirim, H. C.*: Design aspects of high strength steel welded structures improved by high frequency mechanical impact (HFMI) treatment. PhD-Thesis, Aalto Universität, Finnland, 2013.
- [15] *Dürr, A.*: Zur Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen aus höherfesten Baustählen bei Anwendung von UIT-Nachbehandlung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.
- [16] *Stranghöner, N., Berg, J.*: Einfluss des höherfrequenten Hämmerns auf die Ermüdungsfestigkeit ultrahochfester Stähle der Festigkeitsklassen S960, S1100 und S1300 am Beispiel geschweißter Kerbdetails. Schlussbericht KmU-Kurzstudie P938, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. FOSTA, Düsseldorf, 2014 (in Vorbereitung).
- [17] *Gundel, W., Hamme, U., Herion, S.*: Ermüdungsfestigkeit geschweißter Konstruktionen aus hoch- und höchstfesten Feinkornbaustählen in der Praxis. DVS Berichte, Band 267, 2010, S. 220–224.
- [18] *Stranghöner, N., Berg, J., Schiborr, M., Neuhoff, R.*: Einfluss des höherfrequenten Hämmerns auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter ultrahochfester Stähle. Tagungsband 16. Duisburger Schweißtage, Duisburg, 30. Juni 2011, S. 75–85.
- [19] *Berg, J., Stranghöner, N.*: Höherfrequentes Hämmern am Beispiel geschweißter ultrahochfester Stähle. 18. DAST-Kolloquium, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Aachen, 16.–17. Oktober 2012, S. 125–130.
- [20] *Berg, J.*: Zum Einfluss des Höherfrequenten Hämmerns auf die Ermüdungsfestigkeit geschweißter ultrahochfester Feinkornbaustähle. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2014 (in Vorbereitung).
- [21] *Berg, J., Stranghöner, N.*: Application of design concepts at high frequency hammer peened welded ultra high strength steels. 37. IABSE Symposium, 3.–5. September 2014, Madrid, Spanien (angenommen).
- [22] *Farajian, M.*: Welding residual stress behavior under mechanical loading. *Welding in the World* 57 (2013), no. 2, pp. 157–169.
- [23] *Marquis, G., Barsoum, Z.*: Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed procedures and quality assurance guidelines. *Welding in the World* 58 (2014), no. 1, pp. 19–28.
- [24] *Statnikov, E. S., Trufiakov, V. I., Mikheev, P. P., Kudryavtsev, Y.*: Specification for weld toe improvement by ultrasonic impact treatment. *Welding in the World* 44 (2000), no. 1, pp. 5–7.

Autoren dieses Beitrages:

Jörn Berg M.Sc., joern.berg@uni-due.de,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner,
natalie.stranghoener@uni-due.de,
Universität Duisburg-Essen,
Institut für Metall- und Leichtbau,
Universitätsstraße 15, 45141 Essen