

Zusammenfassung Forschungsbericht FOSTA P1413 / IGF-Nr.: 20800 N

Formoptimierung von aufgeschweißten Lamellen unter Ermüdungsbeanspruchung

Prof. Dr.-Ing. André Dürr¹⁾, Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger²⁾, M.Eng. Jakob Roth¹⁾, Dr.-Ing. Niclas Rausch²⁾

- 1) Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Institut für Material- und Bauforschung, Karlstraße 6, 80333 München
- 2) Technische Universität München, Lehrstuhl für Metallbau, Arcisstraße 21, 80333 München

Eine gewichtsoptimierte Ausführung zur Vermeidung eines unnötig erhöhten Ressourcenverbrauchs ist im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und insbesondere mit dem Hintergrund der deutlich gestiegenen Beschaffungspreise von immer größeren Bedeutung. Hierfür werden im Bauwesen und auch in anderen stahlverarbeitenden Branchen lokale Verstärkungsmaßnahmen, sogenannte Verstärkungslamellen, verwendet. Diese vergrößern lokal den Querschnitt angepasst an die äußere Beanspruchung. Bei wechselnder Beanspruchung, die z. B. durch die Überfahrt des Verkehrs bei Stahlbrücken auftreten, müssen diese Konstruktionen gegenüber einem Ermüdungsversagen bemessen werden. Hierbei führt das sehr kerbscharfe Ende der Lamelle zu einer schlechten Kerbfalleinteilung, die die Widerstandsseite beim Ermüdungsnachweis darstellt.

Besonders das Lamellenende dieses Kerbdetails spielt aufgrund der hohen Kerbschärfe am Schweißnahtübergang eine bedeutende Rolle und kann unter Umständen der limitierende Faktor bei der Bemessung sein. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurde daher die Ausführung und die Ausgestaltung des Lamellenendes genauer untersucht und optimiert. Anhand von bereits bestehenden Forschungsergebnissen und numerischen Voruntersuchungen sollten verschiedene kerbbarme Lamellenauslaufformen identifiziert und bezüglich der Kerbschärfe optimiert werden. Die durchgeführten Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt FOSTA P 1413 „Formoptimierung von aufgeschweißten Lamellen unter Ermüdungsbeanspruchung“ [1] werden im Folgenden kurz vorgestellt und zusammengefasst.

Einleitung

Aufgeschweißte Lamellen werden als lokale Verstärkungsmaßnahme in vielen Bereichen verwendet, um leichtere und somit ressourcenschonende Konstruktionen aus Stahl zu realisieren. Häufig wird dieses Detail bei Stahlbrücken oder bei Land- und Baumaschinen verwendet. Allerdings weist dieses Detail aufgrund der starken Querschnittänderung eine hohe Kerbschärfe auf und besitzt somit unter wechselnder Beanspruchung ein schlechtes Ermüdungsverhalten. Dabei sind in den verschiedenen stahlverarbeitenden Bereichen unterschiedliche Ausführungen dieser Details zu finden, vgl. Abbildung 1. Im Bauwesen werden zumeist einfache rechteckige Formen verwendet, die in den Eckbereichen ausgerundet und teilweise noch am Lamellenende angefast sind. Häufig wird zusätzlich eine kostenintensive Nachbearbeitung durchgeführt, um die Kerbschärfe dieses Details zu verringern. Im Maschinenbau hingegen sind zum Teil aufgeschweißte Lamellen zu finden, die am Ende des Lamellenendes spitz zulaufen und teilweise mit ins Grundblech verlängerten Schweißnähten versehen sind. Forschungsergebnisse in denen die Wirksamkeit der verlängerten Schweißnähte experimentell untersucht wurden, sind nicht bekannt.

Im Bauwesen werden aufgeschweißte Lamellen üblicherweise bei Kastenquerschnitten und auch in offenen Trägerprofilen verwendet. Bei Kastenquerschnitten entsteht aufgrund der fehlenden Aussteifung ein Versatzmoment wohingegen es bei offenen Trägerquerschnitten infolge des Stegs zu einem hohen Steifigkeitssprung kommt. Diese unterschiedlichen Lagerungsbedingungen könnten einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben. Bisher wird der Einfluss der Lagerungssituation beim Ermüdungsnachweis auf Nennspannungsniveau jedoch nicht berücksichtigt.

Zielsetzung des Forschungsprojekts

Das durchgeführte Forschungsvorhaben hat sich im Wesentlichen den folgenden vier Zielen gewidmet:

Ziel 1: *Form- und Fertigungsoptimierung des Kerbdetails „aufgeschweißte Lamelle“.*

Optimierung des Kerbdetails „aufgeschweißte Lamelle“ für den Anwendungsbereich des Brücken-, Kran-, Nutzfahrzeug- und Landmaschinenbau hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit. Die Form- und Fertigungsoptimierung erfolgte dabei auf Grundlage von numerischen Untersuchungen und darauf aufbauenden Versuchen. Neben der Erweiterung der Anwendungsgrenzen von bereits bestehenden Untersuchungen mit abgerundeten Lamellenenden auf größere Blechdicken, wurden auch bisher nicht untersuchte Lamellenauslaufformen wie Lamellenenden mit spitz auslaufenden Schweißnähten untersucht. Neben der bisherigen Standardstahlsorte S355 wurden insbesondere auch die modernen gut verarbeitbaren höher- und hochfesten Stahlsorten S460 und S690 untersucht, um zukünftig leichtere und damit wirtschaftlichere Schweißkonstruktionen zu ermöglichen.

Ziel 2: *Erweiterung des Anwendungsspektrums auf Großstrukturen.*

Bei den Versuchsdaten in der Literatur wurden die Ermüdungsfestigkeiten an Kleinprüfkörpern und dünnen Blechdickenabmessungen untersucht. Um eine auch allgemeingültige Aussage bezüglich der Ermüdungsfestigkeit bei realen Bauteilabmessungen treffen zu können, wurden innerhalb des Projekts Strukturen mit Blechdicken von bis zu 40 mm und einzelne Trägerversuche durchgeführt, damit die Anwendungsgrenzen auf reale Bauteilabmessungen erweitert werden können.

Ziel 3: *Bereitstellung von Anwendungsempfehlungen für die Schweißnahtnachbehandlung des Lamellenauslaufs*

Auf Basis von experimentellen Untersuchungen wurde die Effektivität der Nachbehandlungsverfahren Überschleifen, „höherfrequentes Hämmern“ (HFMI) und WIG-Aufschmelzen für unterschiedliche Lamellenauslaufformen bestimmt. Dabei wurden zu verschiedenen Auslaufformen mehrere Ermüdungsversuche durchgeführt, um eine statistisch abgesicherte Aussage treffen zu können und den Einfluss zu quantifizieren. Aus den in den Ermüdungsversuchen gewonnenen Ergebnissen wurden in einem nächsten Schritt Empfehlungen für die Anwendung der Nachbehandlungsverfahren entwickelt.

Ziel 4: *Erarbeitung eines anwenderorientierten Nachweiskonzept unter Berücksichtigung der Einbausituation*

Bisher steht in den aktuellen Regelungen für das Kerbdetail des Lamellenendes das Nennspannungs- und Strukturspannungskonzept für Standardausführungen zur Verfügung. Die Einstufungen sind hierfür teilweise sehr niedrig. Insbesondere auf Basis des Struktur- und Kerbspannungskonzepts mit modifizierten Kerbfalleinteilungen für optimierte Lamellenauslaufformen können der globale Geometrieinfluss und die Einbausituation genauer betrachtet werden und damit höhere Ermüdungsfestigkeiten für die Bemessung erreicht werden. Im Laufe des Projekts zeigt sich die Anwendung des Strukturspannungskonzepts als nicht zielführend. Im Forschungsprojekt erfolgte daher die Bereitstellung eines Nachweiskonzepts für unterschiedliche Lamellenauslaufformen in Abhängigkeit der Festigkeit auf Basis des Nenn- und Kerbspannungskonzepts. Für unterschiedliche Einbausituationen wurden für die Praxis einfache Modifikationsfaktoren bestimmt.

Die Forschungsziele wurden im Rahmen des Forschungsprojekts über sechs einzelne Arbeitspakete er-



Abbildung 1: Ausführungsbeispiele im Bauwesen und im Maschinenbau, entnommen aus [1]

reicht. Eine Zuordnungsübersicht der unterschiedlichen Arbeitspakete (APs) und deren Beziehung zueinander wird in der folgenden Abbildung 2 visualisiert:

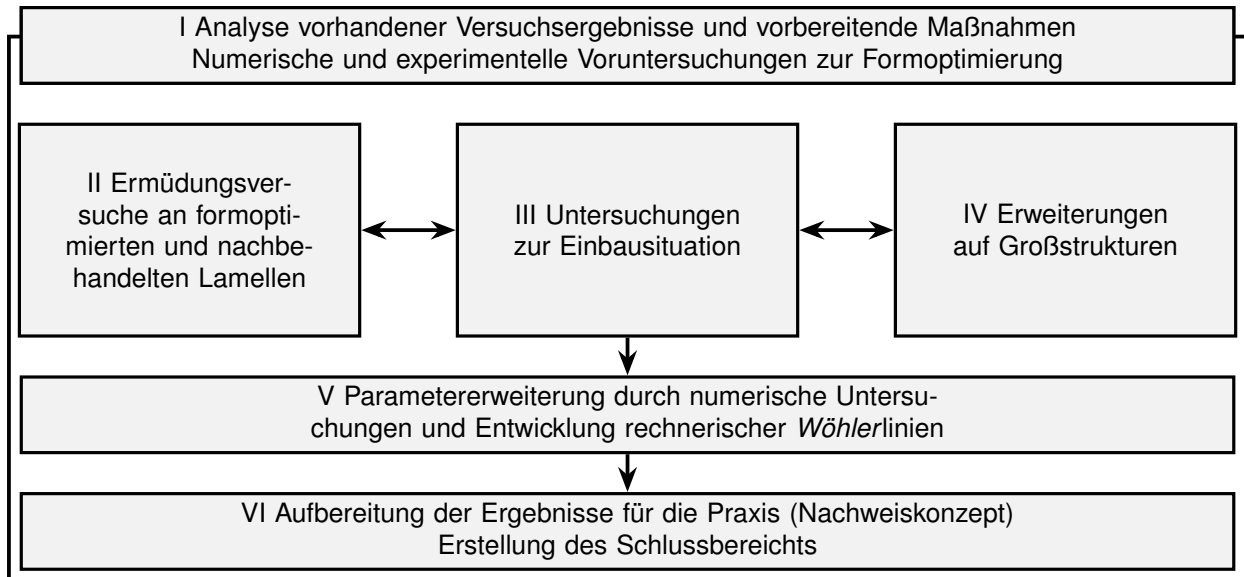


Abbildung 2: Übersicht über die einzelnen Arbeitspakete

Erkenntnisse aus der Literaturrecherche

Bereits in den frühen 1930er Jahren wurden von *Wilson et al.* [2, 3] und *Graf* [4, 5] erste Versuche an zweischnittigen Blechverbindungen unter Zugbeanspruchung und an Biegeträgern durchgeführt, um das Ermüdungsverhalten unterschiedlicher Ausführungen bewerten zu können. Dabei kamen unterschiedliche Formen und Ausführungen zur Anwendung. Beide Untersuchungen zeigten einen geringen Einfluss der Lamellenform auf das Ermüdungsverhalten. Allerdings konnte dieser positive Einfluss auf die Lebensdauer den deutlich größeren Arbeitsaufwand für die Erstellung der abweichenden Formen im Vergleich zur rechteckigen Standardform in wirtschaftlicher Sicht nicht aufwiegen, weshalb das Optimierungspotential als zu gering eingeschätzt wurde. Die groß angelegten Untersuchungen von *Munse* und *Stallmeyer* [6] konnten diese Erkenntnis bestätigen.

Im Bezug auf eine mögliche alternative Ausführung führten *Fisher et al.* [7] ein großangelegtes Forschungsvorhaben durch, bei dem rechteckige Lamellen auf geschweißte und gewalzte offene Trägerprofile geschweißt wurden. Diese wurden mit und ohne Verstärkungsstirnaht durchgeführt. Diese zeigten keine Unterschiede im Ermüdungsverhalten und sind in der Ausführung gleichzustellen.

Im Bezug auf unterschiedliche Nachbearbeitungsmethoden wurden von *Kuhlmann* und *Drebenstedt* [8] Versuche an dickwandigen aufgeschweißten Lamellen auf einem Grundblech mit einer Wandstärke von bis zu $t=50$ mm durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde die Stirnaht sehr aufwändig vollständig überschleifen. Dabei zeigte sich, dass die Ermüdungsfestigkeit deutlich gesteigert werden kann. Allerdings ist diese Steigerung der Ermüdungsfestigkeit mit hohen Fertigungskosten verbunden.

Zur Anwendung von auslaufenden Schweißnähten lagen kaum experimentelle Versuchsergebnisse in der Literatur vor. In [9] und [10] wurden Versuche an Verstärkungsblechen mit auslaufenden Schweißnähten durchgeführt. Es wurde allerdings keine Vergleichsserie im umschweißten Zustand untersucht, sondern die Auswirkung von Nachbehandlungsverfahren im Vergleich zur as-welded Ausführung. Sowohl das verwendete WIG-Aufschmelzen als auch das höherfrequente Hämmern (HFMI) zeigte dabei eine positive Wirkung auf das Ermüdungsverhalten. Bei anderen Details wie z.B. der aufgeschweißten Längssteife wurden im Rahmen der Forschungsprojekte FOSTA P 293 [11] und P 512 [12] aus- und einlaufende Schweißnähte auf das Ermüdungsverhalten hin untersucht. Dabei konnte eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit bei beiden Ausführungen im Vergleich zur umschweißten Variante festgestellt werden. Allerdings zeigte sich ein

deutlicher Einfluss der Schweißrichtung auf die Versuchsergebnisse. So führten auslaufend geschweißten Proben zu deutlich besseren Versuchsergebnissen.

Zusammenfassend konnten die folgenden Erkenntnisse aus der Literaturrecherche gewonnen werden:

- Die Lamellenform hat nur einen geringen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten.
- Die Anwendung einer Nachbearbeitung mittels vollständigen Überschleifen der Stirnnaht führt zu einer Steigerung der Ermüdungsfestigkeit. Diese ist jedoch sehr kostenintensiv und steht einer wirtschaftlicheren Ausführung dieses Details entgegen.
- Die Wirksamkeit von auslaufenden Schweißnähten auf das Ermüdungsverhalten von aufgeschweißten Lamellen wurde bisher nicht gezielt untersucht. Nachbearbeitungsmethoden wie das WIG-Aufschmelzen sowie das höherfrequente Hämmern scheinen sich allerdings auch bei auslaufenden Schweißnähten positiv auf das Ermüdungsverhalten auszuwirken.
- Bei aufgeschweißten Längssteifen konnte eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit durch auslaufende Schweißnähte festgestellt werden. Allerdings zeigte sich ein deutlicher Fertigungseinfluss der bei Übertragung auf aufgeschweißte Lamellen berücksichtigt werden sollte.

Voruntersuchungen zur Identifizierung möglicher Ausführungen

In einem ersten Schritt wurden auf Basis der Erkenntnisse der Literaturrecherche unterschiedliche Lamellenformen ausgewertet, die zum Teil mit den Nachbehandlungsmethoden Überschleifen, WIG-Aufschmelzen oder höherfrequentes Hämmern (HFMI) zusätzlich bearbeitet wurden. Um die verschiedenen Ausführungsvarianten hinsichtlich des Ermüdungsverhaltens bewerten zu können, wurden für die verschiedenen Lamellenformen Kerbspannungsfaktoren für unterschiedliche Lagerungssituationen ermittelt. Zur Anwendung kamen dabei ein Grundblech mit jeweils einer einseitig modellierten Lamelle, als auch einer beidseitigen Fixierung der Lamelle auf dem Grundblech. Zusätzlich wurde die Lamelle jeweils auf einem Kasten- und einem offenen Trägerprofil modelliert. Die genauen Randbedingungen der Modellierung können [1] entnommen werden.

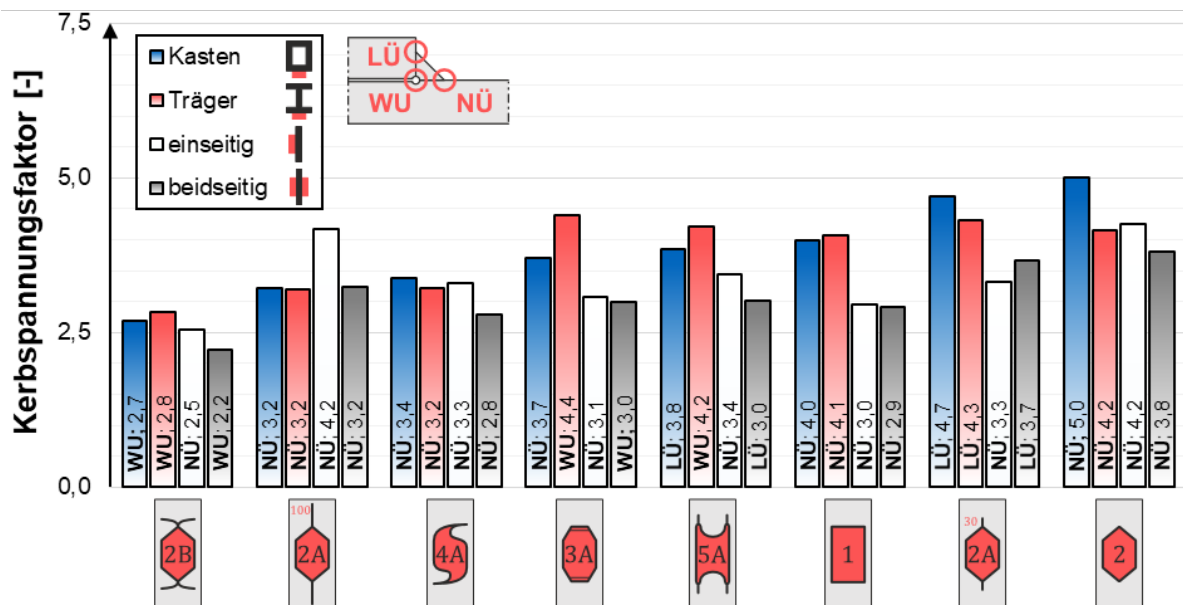


Abbildung 3: Ergebnisse der numerischen Untersuchungen sortiert nach den Kerbspannungsfaktoren bei einer Lagerung auf einem Kastenprofil, entnommen aus [1]

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, hat die Lagerungssituation einen erkennbaren Einfluss auf die Höhe der Kerbfaktoren. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch bei den Ermüdungsversuchen im Rahmen der ex-

perimentellen Versuche mit den unterschiedlichen Lamellenformen und -ausführungen. Die unterschiedlichen Ausführungen können Abbildung 4 entnommen werden. Dabei kamen sowohl unterschiedliche Lamellenformen als auch auslaufende Schweißnähte mit unterschiedlichen Verlauf der auslaufenden Naht zur Anwendung. Teilweise wurden die Proben sowohl mit einseitig als auch mit beidseitig aufgeschweißten Lamellenausführung geprüft. Falls eine Nachbehandlung durchgeführt wurde, ist dies in Abbildung 4 vermerkt. Insgesamt wurden 56 Versuche an einseitig und beidseitig aufgeschweißten Lamellen im Rahmen der Vorversuche durchgeführt.

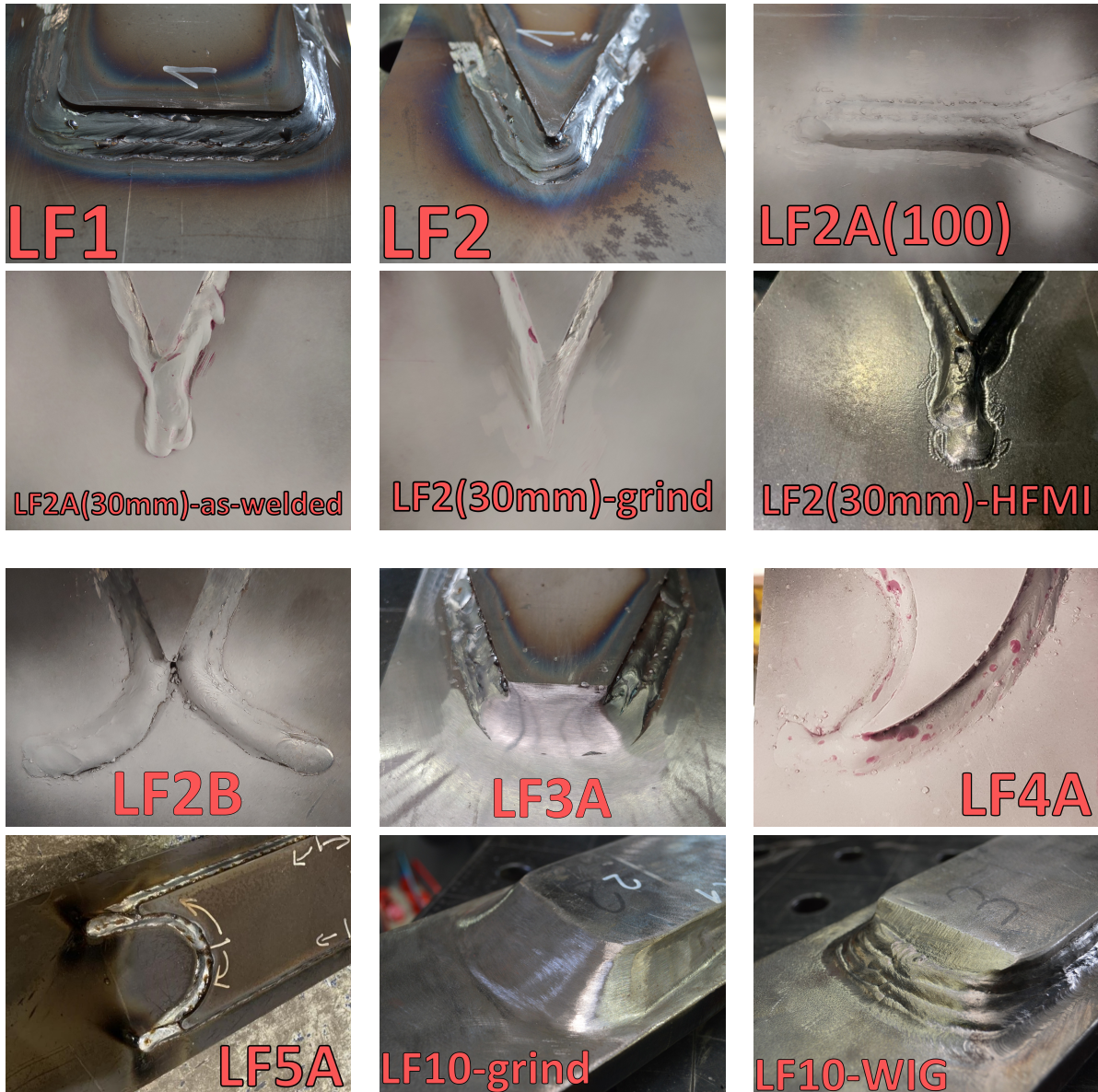


Abbildung 4: Ausführungsvarianten der Vorversuche, entnommen aus [1]

Eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse kann Abbildung 5 entnommen werden. Die jeweiligen Regressionswerte und der Zustand des Schweißnahtübergangs sind dort angegeben. Die Anordnung der Lamellenformen und -ausführungen erfolgte von links nach rechts absteigend jeweils getrennt für die beidseitigen und einseitigen Versuche. Wie zu sehen ist hat die Lagerungssituation einen deutlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten. Dies haben bereits die numerischen Versuchsergebnisse vermuten lassen. Auf Basis der Voruntersuchungen wurde die LF2A mit auslaufenden Schweißnähten mit einer Länge von 100 mm für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, da diese Ausführung bereits in ähnlicher Weise im Maschinenbau zu finden ist und für beide Lagerungsbedingungen die beste Ermüdungsfestigkeit auswies.

Die LF3A weist ebenfalls ein gutes Ermüdungsverhalten auf und wurde daher für den Bereich des Bauwesens als typischen Anwendungsbereich für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

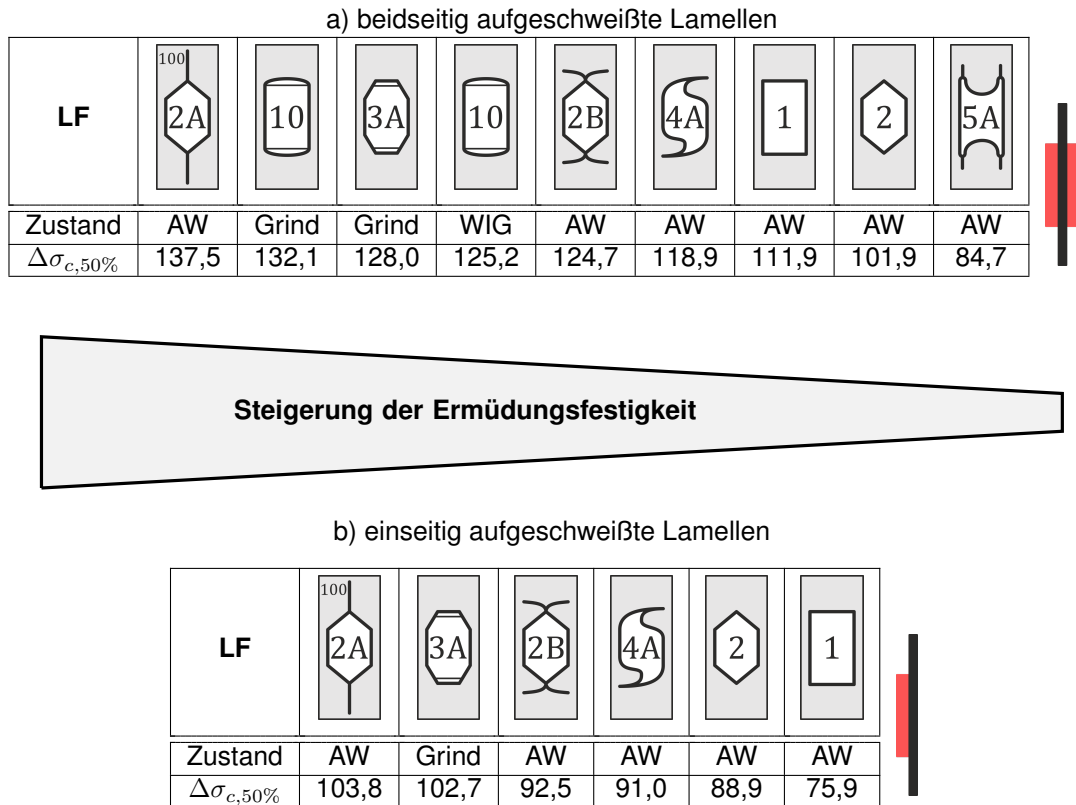


Abbildung 5: Versuchsergebnisse geordnet nach $\Delta\sigma_{c,50\%}$ -Werten in MPa für beidseitig und einseitig aufgeschweißte Lamellen

Zusammenfassend konnten die folgenden Erkenntnisse aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen gewonnen werden:

- In den experimentellen Untersuchungen zeigte sich kein Einfluss der Lamellenform auf die Ermüdungsfestigkeit.
- Auslaufende Schweißnähte führen im Vergleich zu einer umschweißten Variante zu einer deutlichen Steigerung der Ermüdungsfestigkeit. Dabei zeigte die Fertigungsreihenfolge einen deutlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten.
- Sowohl in den numerischen Berechnungen als auch in den experimentellen Versuchen an Proben mit einseitig und beidseitig aufgeschweißten Lamellen ist ein Einfluss der Lagerungssituation deutlich zu sehen.
- Für die weiteren Untersuchungen wurden die Lamellenform 2A mit auslaufenden Schweißnähten als typischer Anwendungsfall für den Maschinenbau und LF3A als typischer Anwendungsbereich im Bauwesen weiter untersucht. Zur Vereinfachung werden im weiteren Verlauf nur die Bezeichnungen LF2 und LF3 verwendet.

Untersuchungen an aufgeschweißten Lamellen mit auslaufenden Schweißnähten

Im Rahmen der Hauptuntersuchungen wurden die spitzzulaufende Lamellenform LF2 verwendet, die jeweils mit einer geraden auslaufenden Schweißnaht versehen wurde. Die untersuchten Parameter sind die Fertigungsreihenfolge (A bis E und F bis I), die Länge der auslaufenden Schweißnähte (30, 50 und 100 mm), die Werkstoffgüte (S355, S460 und S690) und die Wanddicken von Grundblech ($t = 10, 20$ und 40 mm) und Lamelle ($t_c = 10$ und 20 mm). Des Weiteren wurde das Ermüdungsverhalten bei Anwendung unterschiedlicher Nachbehandlungsmethoden am Lamellenende (Überschleifen/grind und HFMI) untersucht. Die unterschiedlichen Ausführungsvarianten können Abbildung 6 entnommen werden. Insgesamt wurden 77 Versuche an aufgeschweißten Lamellen mit auslaufenden Schweißnähten durchgeführt. Eine detaillierte Aufstellung der Versuchsdaten kann dem Abschlussbericht [1] entnommen werden.

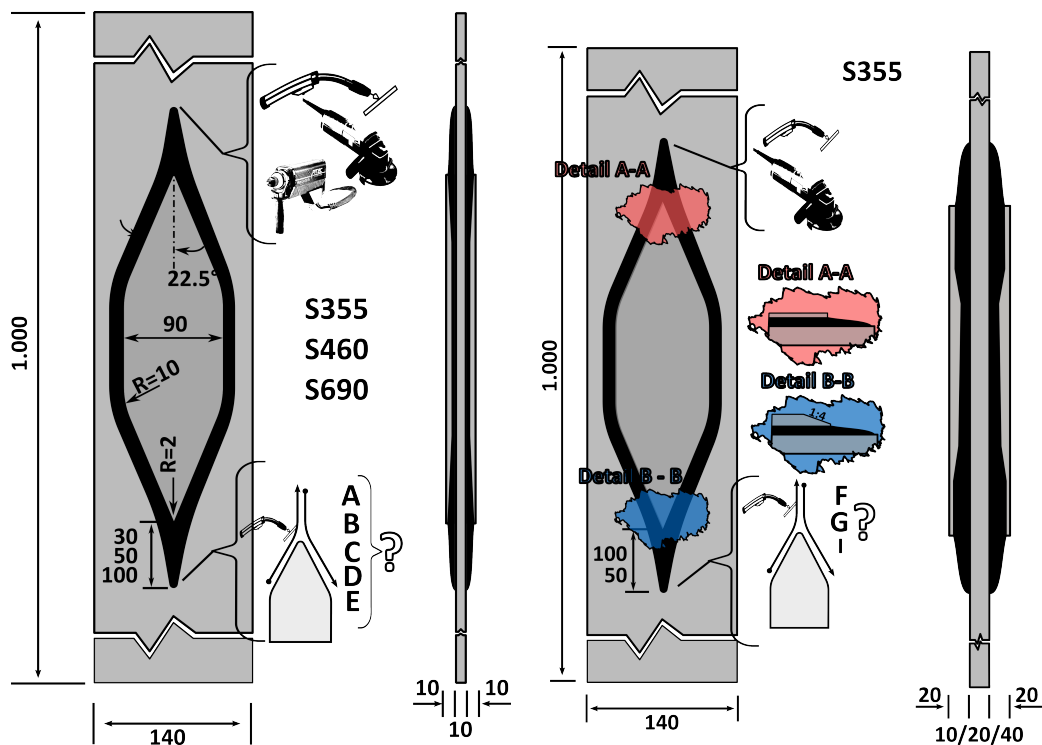


Abbildung 6: Variationen der Ausführungen im Rahmen der Hauptuntersuchungen mit auslaufenden Schweißnähten

Bei der Auswertung der Versuchsdaten zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Schweißreihenfolge. So führten die Versuche bei einer Wandstärke von Grundblech und Lamelle von $t=t_c = 10$ mm mit der Schweißfolge B im Vergleich zu den anderen Schweißfolgen (A und C bis E) zu deutlich schlechteren Ergebnissen, vgl. Abbildung 7. Dabei wurde bei dieser Schweißfolge am Ende der auslaufenden Schweißnaht mit dem Schweißprozess begonnen, was zu einem deutlichen schrofferen Nahtübergang führte. Dieses Ergebnis bestätigt somit die Erkenntnis, die im Rahmen der Literaturrecherche sich an Längssteifen zeigten. Im Vergleich hierzu konnten kein Einfluss der Werkstoffgüte und kein deutlicher Einfluss der Wanddickenverhältnisse im unbehandelten Schweißzustand festgestellt werden. Auch der Einfluss der Länge der auslaufenden zeigte sich sowohl in den Experimenten als auch in den numerischen Untersuchungen als gering. Zwar sinkt der Kerbfaktor mit einer steigenden Länge der auslaufenden Naht, allerdings nähert dieser sich ab einer Länge von 100 mm einem konstanten Niveau. Bereits ab einer Länge von 50 mm ist kaum noch ein Unterschied in den Versuchsergebnissen zu erkennen.

Um die Versuchsergebnisse in den normativen Kontext zu setzen, wurde eine Gesamtauswertung aller im Schweißzustand-belassenen Probekörper durchgeführt. Hierfür wurden alle Schweißfolgen mit Ausnahme der deutliche abweichenden Schweißfolge B sowie alle Werkstoffgüten und Wanddickenverhältnisse

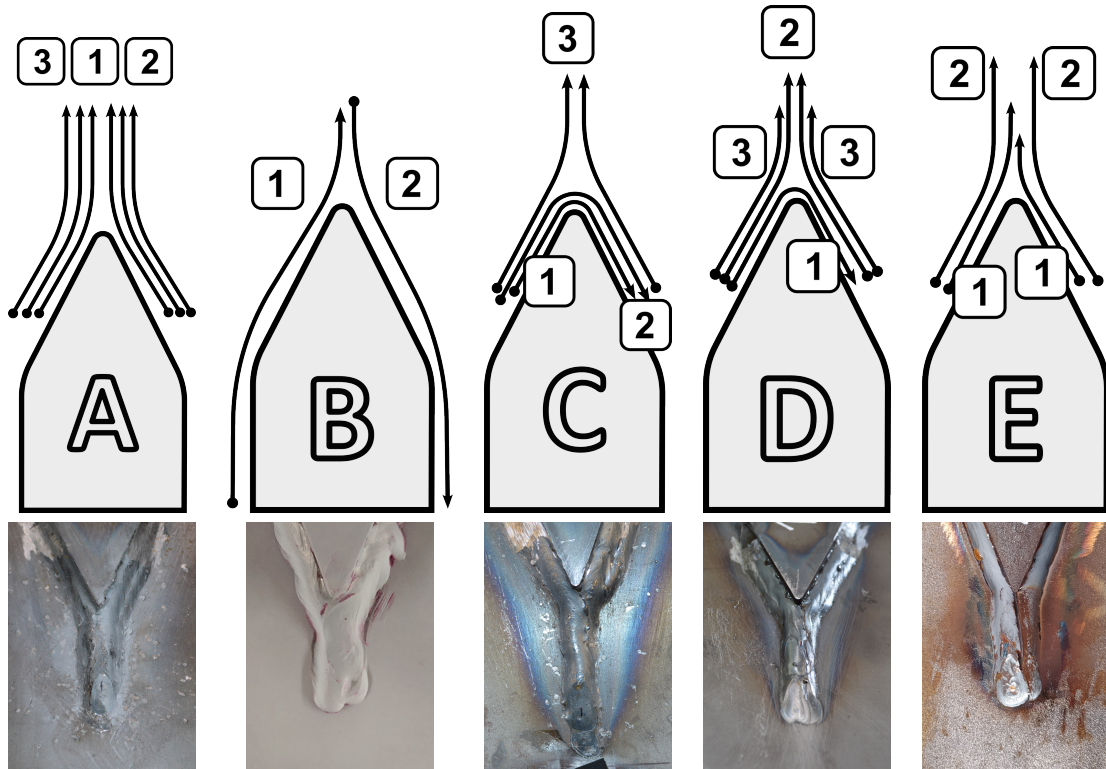


Abbildung 7: Unterschiedliche Schweißfolgen und deren Ausführung

zusammen ausgewertet, vgl. Abbildung 8 - (a). Im Vergleich zu den normativen Vorgaben [13, 14] konnte dabei eine deutliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Auch die Anwendung der Nachbehandlungsmethoden Überchleifen und HFMI Nachbehandlung zeigte ein deutlich besseres Ermüdungsverhalten, vgl. Abbildung 8 - (b). Dabei wurde aufbauend auf den Erkenntnissen der Vorversuche die Nachbearbeitung angepasst. Diese Anpassungen zeigten sich als sehr wirksam. So konnte das Versagen an der Schweißnahtwurzel wieder größtenteils an den Nahtübergang verschoben werden. Die Durchführung der Nachbearbeitungen wurden im Rahmen der erarbeiteten Fertigungsempfehlungen für eine Anwendung in der Praxis aufbereitet und können dem Abschlussbericht [1] entnommen werden.

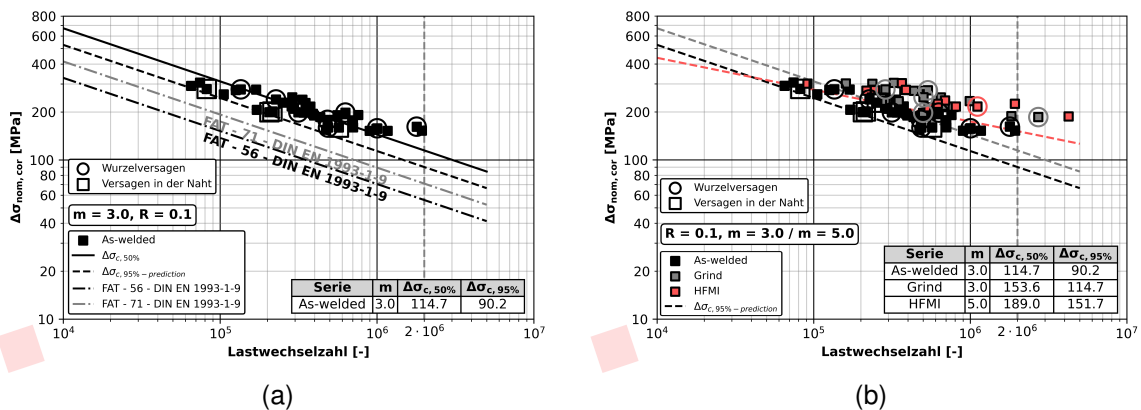


Abbildung 8: Versuchsergebnisse mit auslaufenden Schweißnähten: (a) Gesamtauswertung as-welded Zustand und (b) Vergleich as-welded und nachbehandelte Ausführung

Untersuchungen an Lamellen der LF3

Die Lamellenform 3 (LF3) entspricht eher den bisherigen Ausführungen im Stahlbau und führt durch die Verjüngung am Ende der Lamelle zu einer geringen Gewichtseinsparung sowie zu einer deutlichen Reduzierung der nachzubehandelnden Fläche an der Stirnnaht des Lamellenendes. Es wurden im Rahmen der experimentellen Versuche verschiedene Einflussfaktoren auf das Ermüdungsverhalten untersucht. Dabei wurde neben dem Wanddickenverhältnis von Grundblech ($t = 10, 20$ und 40 mm) und Lamelle ($t_c = 10, 20$ und 30 mm) auch unterschiedliche Werkstoffgüten (S355 und S460) sowie verschiedene Nachbehandlungsverfahren (Überschleifen und WIG-Aufschmelzen) verwendet. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Vorversuche wurden die Schweißnahtvorbereitung und die Nachbehandlung mittels Überschleifen angepasst. Um ein Wurzelversagen zu vermeiden, wurde eine Anfasung der Lamelle auch im Wurzelbereich durchgeführt. Außerdem erfolgte die weitere Nachbearbeitung mittels Satinierschleifer, der durch einen flächigen Abtrag den Schweißnahtübergang besser erfassen lässt. Die unterschiedlichen Ausführungsvarianten können Abbildung 9 entnommen werden.

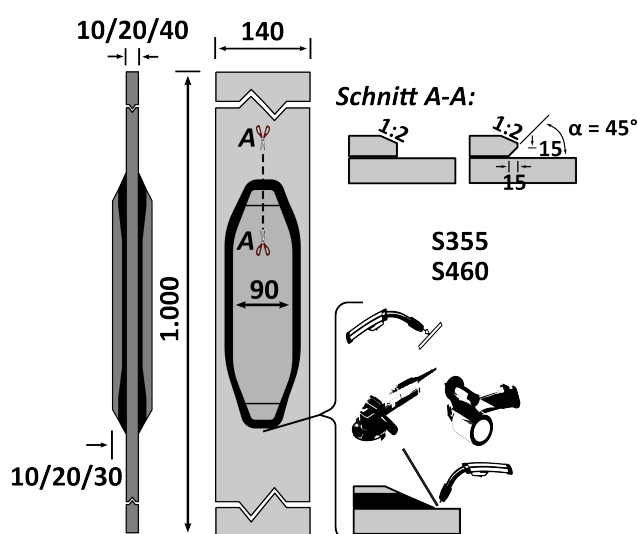


Abbildung 9: Ausführungsvarianten der Lamellenform 3, entnommen aus [1]

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der as-welded, der überschleiften und der WIG-nachbehandelten Proben gegenübergestellt. Bei den WIG-nachbehandelten Proben stellte sich bei drei Versuchskörpern drei unterschiedliche Versagensstellen ein. So trat ein Versagen am Schweißnahtübergang im nachbehandelten Bereich und ein Wurzelversagen auf. Außerdem kam es bei einer Probe zur Rissinitiierung an den Markierungsstempeln auf der Kante des Grundblechs. Diese Probe wurde als Ausreißer markiert. Auch durch die Überarbeitung der Stirnnaht mittels Satinierschleifer konnte zuverlässig der Nahtübergang kerbfrei nachbehandelt werden, was im Vergleich zu den as-welded Proben zu einer deutlichen Steigerung der Ermüdungsfestigkeit führte. Allerdings kam es dadurch auch zu einer Verschiebung der Rissinitiierung in die Schweißnahtwurzel.

Bemessungsempfehlungen

Auf Basis der experimentellen und numerischen Untersuchungen konnten Bemessungsempfehlungen auf Nennspannungsniveau erarbeitet werden. Diese sind in Abhängigkeit der Lagerungssituation und der Wandstärken von Grundblech und Lamelle in unterschiedliche Kerbfallklassen unterteilt. Zusätzlich sind Anforderungen an die Ausführung angegeben. Die Bemessungsempfehlungen für aufgeschweißte Lamellen mit auslaufenden Schweißnähten im Schweißzustand können Tabelle 1 und die Empfehlungen für die Nachbehandlung mittels Überschleifen können Tabelle 2 entnommen werden. Die Empfehlungen für LF3 sind in Tabelle 3 zu finden. Außerdem sollten die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Fertigungsemp-

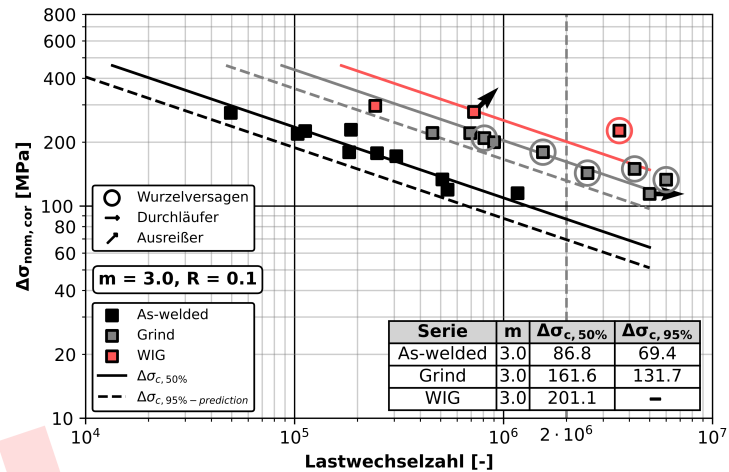


Abbildung 10: Vergleich der Ergebnisse im as-welded Zustand und im überschliffenen Zustand

fehlungen bei der Ausführung der Schweißarbeiten berücksichtigt werden. Diese können dem Abschlussbericht [1] entnommen werden.

Tabelle 1: Bemessungsempfehlung auf Nennspannungsniveau für aufgeschweißte Lamellen mit auslaufenden Schweißnähten im unbehandelten Zustand

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Anforderung
90		<ul style="list-style-type: none"> • $L \geq 50$ mm • Schweißlagen sind auslaufend zu schweißen • Anfasung kann unter 1:4 bis zu $t_c/2$ erfolgen für $t_c > 10$ mm • Das auslaufende Schweißnahtende ist kerbfrei auszuführen.
80		
71		

Tabelle 2: Bemessungsempfehlung auf Nennspannungsniveau für aufgeschweißte Lamellen mit auslaufenden Schweißnähten bei Anwendung der Nachbehandlung Überschleifen

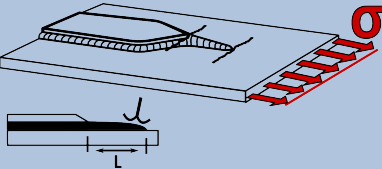
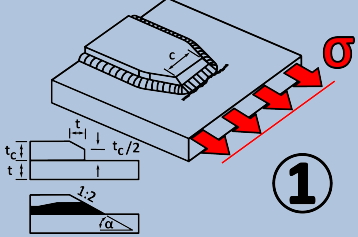
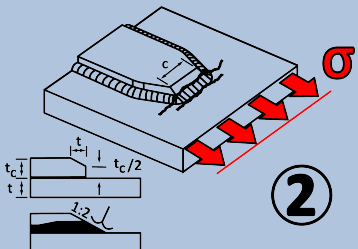
Kerbfall	Konstruktionsdetail	Anforderung
+2 FAT	$t \leq 20 \text{ mm}$ $t_c \leq 20 \text{ mm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> zusätzliche Schweißlage mit Erfassung der Lamellenspitze vollständiges Überschleifen der auslaufenden Schweißnaht

Tabelle 3: Bemessungsempfehlungen auf Nennspannungsniveau für aufgeschweißte Lamellen mit LF3

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Anforderung
63	$t \leq 40 \text{ mm}$ $t_c \leq 30 \text{ mm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> $c \geq 30 \text{ mm}$ Nahtanstiegswinkel $\leq 35^\circ$ keine Schweißnahtansatzstellen in der Stirnseite
120	$t \leq 10 \text{ mm}$ $t_c \leq 10 \text{ mm}$ 	<ul style="list-style-type: none"> $c \geq 30 \text{ mm}$ keine Schweißnahtansatzstellen in der Stirnseite vollständiges, kerbfreies Überschleifen des Nahtübergangs Restkerben sind nicht zulässig Nachbehandlung mittels Satinierschleifers wird empfohlen

Zusammenfassung

Wie sowohl die numerischen als auch die experimentellen Untersuchungen zeigen konnten, bewirkt die Entkoppelung der geometrischen Kerbe und der Schweißnaht Kerbe durch die Verwendung auslaufender Schweißnähte eine deutliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit. Dabei ist jedoch die Lagerungssituation zu berücksichtigen, da diese auf den Kerbfaktor und somit auf das Ermüdungsverhalten einen Einfluss hat. Durch die Anwendung von Nachbearbeitungsmethoden wie dem Überschleifen oder dem höherfrequenten Hämmern kann die Ermüdungsfestigkeit von auslaufenden Schweißnähten bei aufgeschweißten Lamellen zudem weiter verbessert werden. Die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Fertigungsempfehlungen, die dem Abschlussbericht entnommen werden können, sollten bei der Fertigung berücksichtigt werden.

Auch für die Lamellenform 3 konnte durch das Überschleifen eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Dabei ist insbesondere am Schweißnahtübergang auf ein vollständiges Überschleifen zu achten. Ein Satinierschleifer ist hierfür zu empfehlen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnten Bemessungsempfehlungen auf Nenn- und Kerbspannungsniveau erarbeitet werden. Zudem wurden aufbauend auf den Erkenntnissen der experimentellen Versuche, Fertigungsempfehlungen erarbeitet, die eine ermüdungssichere Ausführung in der Praxis ermöglichen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für die anregenden Diskussionen und konstruktiven Ergänzungen. Außerdem bedanken sich die Autoren für das entgegengebrachte Interesse, die Materialspenden und die zur Verfügung gestellten Probekörper sowie die hilfreichen Beratungsleistungen.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20800 N / FOSTA P 1413 „Formoptimierung von aufgeschweißten Lamellen unter Ermüdungsbeanspruchung“ der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde am Institut für Material- und Bauforschung der Hochschule für angewandte Wissenschaften München sowie dem Lehrstuhl für Metallbau der Technischen Universität München (TUM) durchgeführt. Die in dem Projekt erarbeiteten Forschungsergebnisse sind umfassend im zugehörigen Abschlussbericht dargestellt. Dieser ist über die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) erhältlich.



**Forschungsnetzwerk
Mittelstand**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] DÜRR, A. ; MENSINGER, M. ; ROTH, J. ; RAUSCH, N. ; WILNHAMMER, M. ; FORSCHUNGSVEREINIGUNG STAHLANWENDUNG E.V. (Hrsg.): *Formoptimierung von aufgeschweißten Lamellen unter Ermüdungsbeanspruchung*. Düsseldorf, (Forschung für die Praxis P 1413)
- [2] WILSON, W. M. ; BRUCKNER, W. H. ; DUBERG, J. E. ; BEEDE, H. C.: *Fatigue strength of fillet-weld and plug-weld connenctions in steel structural members* (Bulletin)
- [3] WILSON, W. M.: *Flexural fatigue strength of steel beams* (Bulletin)
- [4] GRAF, O.: *Versuche über den Einfluß der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Laschen in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern*. Vienna : Springer Vienna, 1937. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-5689-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-5689-6>. – ISBN 978–3–7091–5653–7
- [5] GRAF, O.: *Berichte des Deutschen Ausschusses für Stahlbau*. Bd. 14: *Versuche über das Verhalten von geschweißten Trägern unter oftmals wiederholter Belastung*. Vienna : Springer, 1942. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-5380-2>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7091-5380-2>. – ISBN 978–3–7091–5232–4
- [6] MUNSE, W. H. ; STALLMEYER, J. E.: *Fatigue in welded beams and girders*. Highway Research Board Bulletin, 1962

- [7] FISHER, J. W. ; FRANK, K. H. ; HIRT, M. A. ; MCNAMEE, B. M. ; LEHIGH UNIVERSITY OF RESEARCH (Hrsg.): *Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams*
- [8] KUHLMANN, U. ; DREBENSTEDT, K.: Ermüdungsfestigkeit von Gurtlamellenenden. In: *Stahlbau* 89 (2020), Nr. 3, S. 229–239. <http://dx.doi.org/10.1002/stab.201900100>. – DOI 10.1002/stab.201900100. – ISSN 0038–9145
- [9] RASMUSSEN, L. V.: *Levetidsbestemmelse og analyse af typisk svejst krandedetalje i højstyrkestål*. Aalborg, Aalborg University, Master Thesis, 2008
- [10] YILDIRIM, H. C. ; LEITNER, M. ; MARQUIS, G. B. ; STOSCHKA, M. ; BARSOU, Z.: Application studies for fatigue strength improvement of welded structures by high-frequency mechanical impact (HFMI) treatment. In: *Engineering Structures* 106 (2016), S. 422–435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.044>. – DOI 10.1016/j.engstruct.2015.10.044. – ISSN 01410296
- [11] MANG, F.: *Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.* Bd. FOSTA P 293: *Bemessungsregeln zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Kranstrukturen: Klassifizierung von kranbauspezifischen Kerbdetails*. Düsseldorf : Verl. u. Vertriebsges. mbH, 2000. – ISBN 3–934238–15–7
- [12] PUTHIL, R.: *Forschung für die Praxis / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. im Stahl-Zentrum*. Bd. FOSTA P 512: *Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Kranstrukturen bei Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle: Evaluation of the fatigue behaviour of crane structures made of high-strength and ultra high-strength steels*. Düsseldorf : Verl.- und Vertriebsges, 2006. – ISBN 3–937567–43–7
- [13] DIN EN 1993-1-9: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung*. Berlin, Dezember 2010
- [14] DIN EN 1993-2/NA: *Nationaler Anhang zu Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken*. 2010