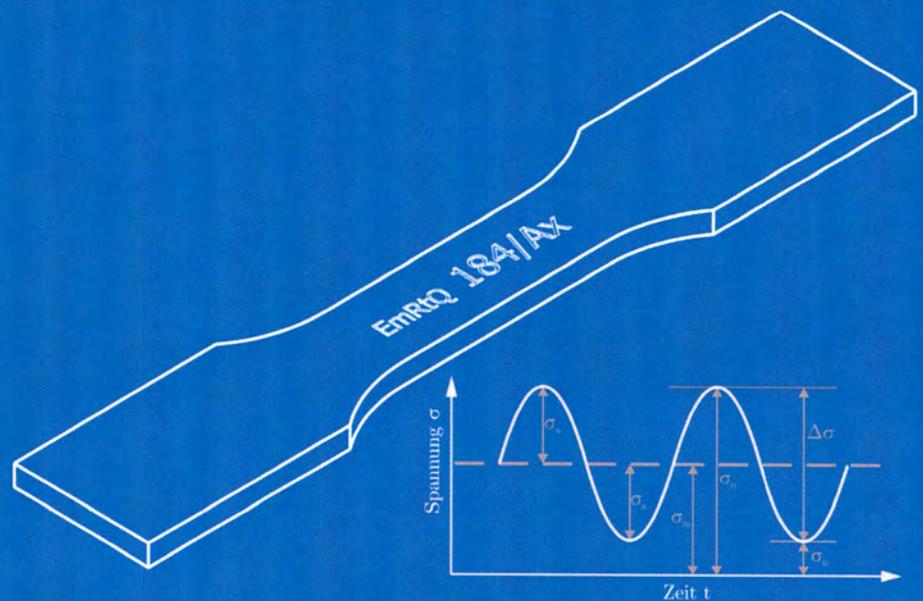


2/2015 **Forschungsbericht**

Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile



ISBN-Nr. 978-3-941687-21-9

Copyright-Klausel mit Haftungsbegrenzung

© Copyright - Klausel

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Verwertungsrechte liegen beim Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. DASt (Sohnstr. 65, D 40237 Düsseldorf). Dies gilt auch für die fotomechanische Wiedergabe und die Speicherung auf elektronischen Medien. Bei gewerblichen Zwecken dienender Vervielfältigung ist an den DASt gemäß § 54 UrhG eine Vergütung zu zahlen, deren Höhe im Einzelfall zu vereinbaren ist. Die dadurch begründeten Rechte, besonders die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Bildentnahme, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Nachspeicherung und Auswertung von Datenverarbeitungsunterlagen, bleiben auch bei Verwendung von Teilen des Werkes dem DASt vorbehalten.

Bei der Zusammenstellung aller Texte und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Autoren, der Verlag und der Herausgeber können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen keine Haftung übernehmen; dies gilt nicht für Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind insoweit ausgeschlossen.

Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge ist der Herausgeber stets dankbar.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt, Düsseldorf

Vertrieb:
Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf

2/2015

Forschungsbericht

**Ermüdungsfestigkeit markierter
Stahlbauteile**

**Universität Duisburg-Essen
Institut für Metall- und Leichtbau**

**Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner
Dominik Jungbluth, M.Sc.**

Stahlbau Verlags- und Service GmbH

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Allgemeines	4
2.2 Dauerhafte Kennzeichnungsmethoden	4
2.2.1 Allgemeines	4
2.2.2 Hartes Stempeln	7
2.2.3 Fräsen	10
2.2.4 Plasmamarkieren	11
2.2.5 Nadeln	13
2.3 Ermüdungsfestigkeit	15
2.3.1 Allgemeines	15
2.3.2 Rissentstehung und Risswachstum	15
2.3.3 Ermüdungsversuch	18
2.4 Normung	19
2.4.1 Klassifizierung von Hart- und Weichprägungen	21
2.5 Wissenschaftliche Untersuchungen	21
2.5.1 Untersuchungen zum Plasmamarkieren der SLV Halle	21
2.5.2 Voruntersuchungen am Institut für Metall- und Leichtbau	25
2.5.3 Zusammenfassung	35
2.6 Zusammenfassung	36
3 Experimentelle Untersuchungen	38
3.1 Allgemeines	38
3.2 Versuchsprogramm	38
3.3 Versuchskörper	39
3.3.1 Allgemeines	39
3.3.2 Verzögerungen / Probleme	40
3.3.3 Werkstoffe / Grundmaterialien	40
3.3.4 Fertigung	43
3.3.5 Kennzeichnungen	44
3.4 Versuchsdurchführung	54
3.5 Versuchsergebnisse	56
3.5.1 Allgemeines	56
3.5.2 Verzögerungen / Unplanmäßigkeiten	57
3.5.3 Hartes Stempeln	58

3.5.4	Fräsen	62
3.5.5	Plasmamarkieren	67
3.5.6	Nadeln	71
3.6	Zusammenfassung	72
4	Bewertung der Ergebnisse	74
4.1	Diskussion der Versuchsergebnisse	74
4.1.1	Nadelmarkierung	74
4.1.2	Blechdicke 15 mm	75
4.1.3	Blechdicke 25 mm	78
4.1.4	Blechdicke 40 mm	80
4.2	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	81
5	Zusammenfassung und Ausblick	82
6	Literaturverzeichnis	85
	Anhang A Datenblätter und Bruchbilder	88
	Anhang B Mikroskopie Datenblätter	130

Kurzfassung

Stahlbauteile müssen während aller Fertigungsabschnitte identifizierbar und rückverfolgbar sein. Die Wahl der Kennzeichnungsmethode ist in einschlägigen Normen nicht zwingend vorgeschrieben. In der für die Fertigung von Stahltragwerken anzuwendenden DIN EN 1090-2 [1] ist geregelt, dass die Aufbringung von dauerhaften Kennzeichnungen nicht zu Beschädigungen des Bauteils führen darf. Weiterhin sind harte Kennzeichnungsmethoden wie Hartprägungen, gebohrte oder gestanzte Markierungen nur zulässig für Stahlsorten des Festigkeitsbereiches bis einschließlich S355 und nur in festgelegten Bereichen, wo die Markierung keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat.

Eine Forderung nach dauerhaften Kennzeichnungsmethoden impliziert die Widerstandsfähigkeit der Markierungen gegenüber nachgeschalteter Fertigungsprozesse wie Strahlen, Beschichten oder Feuerverzinken sowie gegenüber Witterungseinflüssen. Für eine dauerhafte Kennzeichnung eignen sich insbesondere Methoden wie Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren oder Nadeln.

Hersteller von Maschinen haben in den letzten Jahren ihre Produktion derart weiterentwickelt, dass die genannten Markiermethoden in Fertigungsstraßen eingebunden werden können. Manuelle Bearbeitungs- oder Markierprozesse wie das Anreißen von Bauteilen oder das Aufbringen von Kennzeichnungen können somit durch vollautomatische Prozesse ersetzt werden. Nichtsdestotrotz bewirken dauerhafte Kennzeichnungsmethoden eine Oberflächenveränderung und hinterlassen eine Kerbe, welche einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben kann. Dieser Einfluss wurde bisher nicht im Detail untersucht, weshalb eine Einordnung der Markierkerben in den Europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [2] prinzipiell nicht möglich ist.

Aus diesen Gründen hat das Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen das Forschungsvorhaben „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ als IGF-Vorhaben 17218 N des Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. (DASt), gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der vier Kennzeichnungsmethoden hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf die Ermüdungsfestigkeit markierter Stahloberflächen zu quantifizieren und zu bewerten.

Als Werkstoffe wurden zum einen die im Brückenbau übliche Stahlsorte S355J2 und zum anderen die Stahlsorte S460N zur Abdeckung eines höheren Festigkeitsbereiches eingesetzt. Zur Überprüfung eines möglichen Blechdickeneffektes wurden drei verschiedene Blechdicken 15, 25 und 40 mm untersucht.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass das Ermüdungsverhalten durch aufgebrachte Kennzeichnungen negativ beeinflusst wird. Die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit lässt sich im Wesentlichen auf den geometrischen Kerbeffekt infolge der Kennzeichnungen zurückführen. Demzufolge nimmt der Einfluss der Kennzeichnung auf das Ermüdungsverhalten mit zunehmender Kerbtiefe und -schärfe zu. Dennoch lassen sich infolge der Kennzeichnungen vergleichbar

hohe Ermüdungsfestigkeiten erzielen, welche eine günstige Kerbfalleinordnung im oberen Bereich des Europäischen Kerbfalkatalogs zur Folge haben.

Abstract

Steel components have to be identifiable and traceable during the whole manufacturing chain. The choice of the identification method is not specified consistently in international rules and standards. In the European standard for the execution of steel structures EN 1090-2 [3] it is specified that the use of durable marks may not result in producing damages and that hard stamped marks are only permitted for steel grades up to S355 and only in areas where no effect on the fatigue life is expected.

In terms of durability, markings should be resistant against particular manufacturing processes such as sandblasting, hot dip galvanizing or coating. In detail these methods are scribing, hard stamping, plasma marking and needling.

Nowadays the industry has developed machines with integrated automatic marking processes. Consequently, manual layout scribing is not required anymore during manufacturing processes of steel components and components can be marked on the fly. However, the effect of the installed notch due to the marking process on the fatigue strength of the components is questionable. As no systematic investigations on this topic have been carried out up to now, marked notch detail are not covered within the detail categories of EN 1993-1-9 [4].

For these reasons the Research-Project „Fatigue strength of marked steel components“ was carried out by the Institute for Metal and Lightweight Structures of University Duisburg-Essen. The IGF-project (17218 N) is funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology (BMWi) via the German Federation of Industrial Research Associations (AiF) and the Research Association German Committee for Steel Construction (DAST) due to a resolution of the German Federal Parliament.

Within the investigations, the different surface conditions hard-stamped, scribed, plasma-marked and needled were investigated. Three different steel plate thicknesses 15, 25 and 40 mm and two different steel grades S355J2 and S460N were considered.

As expected, the fatigue behaviour is influenced by the markings with a decrease of fatigue life. The influence of the marking on the fatigue life depends mainly on the geometry and the surface conditions of the notch. The load cycles until failure decrease with an increase of notch depth and sharpness. Nevertheless, the classification of the test results into FAT classes according to EN 1993-1-9 leads to relatively high fatigue strengths.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im gegenwärtigen Stahlbau gewinnen effektive und effiziente Kennzeichnungsmethoden immer mehr an Bedeutung. Besonders bei komplexen Stahlkonstruktionen ist ein effektives Kennzeichnungssystem unabdingbar. In der Fertigung von Stahltragwerken ist eine lückenlose Rückverfolgbarkeit von Bauteilen nicht nur vorteilhaft, sondern auch normativ gefordert. Die für die Ausführung von Stahltragwerken gültige Norm DIN EN 1090-2 [1] fordert für Bauwerke der Ausführungsklasse EXC3 und EXC4 explizit die lückenlose Rückverfolgbarkeit von Bauteilen von der Lieferung bis zum Einbau. Darüber hinaus dient eine dauerhafte Kennzeichnung der Qualitätskontrolle, dem Schutz vor Fälschungen sowie der eindeutigen Identifizierbarkeit bei evtl. auftretenden Haftungsansprüchen.

Die auf dem Markt üblichen Markierungen reichen von Kennzeichnungen mittels Farb- oder Ätzstiften über angeklebte oder angehängte Schilder bis hin zu oberflächenverändernden Methoden wie Fräsen oder Plasmamarkieren.

Kennzeichnungen, welche eine eindeutige Identifizierbarkeit von Bauteilen gewährleisten, sollten resistent gegenüber dem Markieren nachgeschalteter Fertigungsprozesse wie Strahlen, Verzinken oder Lackieren sein. Hierbei stoßen Farb- und Schildmarkierungen schnell an ihre Grenzen. Für eine dauerhafte und widerstandsfähige Kennzeichnung sind daher oberflächenverändernde Markiermethoden zu empfehlen. Hierbei kommen im Wesentlichen die Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln zum Einsatz, siehe Bild 1.

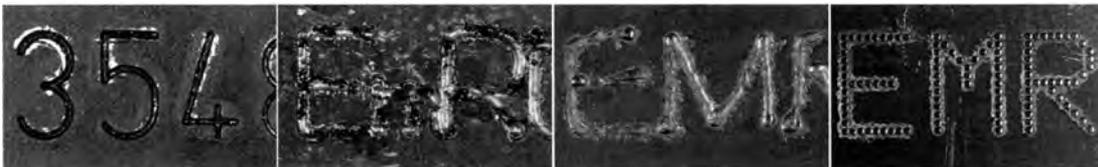


Bild 1 Kennzeichnungsverfahren Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln

Neben der Resistenz gegenüber nachgeschalteter Fertigungsprozesse bieten diese Methoden den Vorteil, dass sie sich teilweise vollautomatisch in Produktions- und Fertigungsstraßen einbinden lassen. Seitens der Maschinenhersteller wurden bereits diverse Kennzeichnungstools entwickelt und auf den Markt gebracht, die diese Anforderung erfüllen. So werden häufig Fräs- und Plasmamarkierungen vollautomatisch auf Basis von CNC-Daten auf Werkstücke aufgebracht. Des Weiteren existieren für Stempel- und Nadelmarkierungen neben stationären auch mobile Geräte, welche praktisch überall eingesetzt werden können.

Gemäß DIN EN 1090-2 sind allerdings dauerhafte Kennzeichnungsmethoden nur für Stahlsorten der Festigkeitsklassen bis S355 und nur in festgelegten Bereichen zugelassen, in denen kein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu erwarten ist. Inwieweit die infolge der Kennzeichnungsmethoden hervorgerufenen Kerben einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten von Stahlbauteilen haben, wurde bisher jedoch nicht hinreichend untersucht.

Aus diesem Grund hat das Institut für Metall- und Leichtbau (IML) der Universität Duisburg-Essen das Forschungsvorhaben „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ als IGF-Vorhaben 17218 N des Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. (DAST) gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, durchgeführt. Untersuchungsgegenstand waren die vier Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln, die mittels Ermüdungsversuchen an mit diesen Verfahren markierten Stahlbauteilen aus den zwei Stahlsorten S355J2 und S460N sowie unter Berücksichtigung der drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm experimentell untersucht wurden.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der Einfluss der vier verschiedenen Kennzeichnungsverfahren Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf die Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile quantitativ mithilfe der experimentellen Ermittlung entsprechender Wöhlerlinien erfasst. Abgrenzend zu den bisher durchgeführten Untersuchungen wurden Blechdicken größer 15 mm, wie sie im Stahlbau üblich sind, und die Stahlsorten S355J2 und S460N untersucht. Hierbei war insbesondere auch von Interesse, inwieweit die verwendete Blechdicke und/oder die erzielte Markiertiefe das Ermüdungsverhalten beeinflusst. Basierend auf den Ergebnissen von Wöhlerversuchen sollten Empfehlungen zur Handhabung der Markierungsmethoden Fräsen, Hartstempeln, Nadeln und Plasmamarkieren ausgearbeitet werden, die kurzfristig in die Kommentare zu den Ausführungsnormen eingebunden werden können und langfristig in die Überarbeitung der DIN EN 1090-2 einfließen sollen.

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

1.2.1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Wichtigstes Ergebnis des Forschungsvorhabens ist die Gewährleistung der Sicherheit von mittels verschiedener Methoden gekennzeichneten Stahlbauteilen. Hierbei werden die Ergebnisse der Ermüdungsversuche hinsichtlich der Gefährdung von gekennzeichneten Bauteilen bewertet, so dass eine Aussage getroffen werden kann, inwieweit der Einsatz von Markierungen, welche die Bauteiloberfläche dauerhaft verändern, bei der Bemessung, Auslegung und Ausführung von Stahlkonstruktionen berücksichtigt werden muss.

1.2.1.2 Wirtschaftliche Ergebnisse

Am Ende des Projekts soll den in der Stahlverarbeitung und Stahlbau tätigen Unternehmen eine Empfehlung hinsichtlich der zu verwendenden Methoden zur Kennzeichnung und Markierung von Stahlbauteilen zur Verfügung gestellt werden. Seitens der Unternehmen ist eine Prozessparallelität aus technischer, aber vor allem aus finanzieller Sicht wünschenswert. Durch die Erfassung der Auswirkung der verschiedenen Kennzeichnungsverfahren auf die Bauteilsicherheit sollen die Unsicherheiten geklärt werden, welche aktuell bei der praktischen Anwendung der unterschiedlichen Methoden hinsichtlich der aktuell gültigen Regelwerke vorliegen.

1.2.1.3 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Während der Fertigung von Stahlbauteilen werden momentan unterschiedliche Verfahren zur Kennzeichnung der Bauteile eingesetzt. Zum Teil werden bereits Verfahren wie das Fräsen oder Markieren mittels Plasma eingesetzt, die das Kennzeichnen der Bauteile parallel zu einzelnen Fertigungsprozessen wie beispielsweise dem Schneiden ermöglichen. Hinsichtlich des Einflusses dieser Verfahren auf das Ermüdungsverhalten der gekennzeichneten Bauteile liegen jedoch noch Unklarheiten vor, die mithilfe dieses Forschungsvorhabens geklärt werden sollen.

2 Stand der Technik

2.1 Allgemeines

Die im Stahlbau üblichen Kennzeichnungsmethoden werden im Folgenden im Allgemeinen sowie die vier dauerhaften Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln im Speziellen näher erläutert und beschrieben. Die dauerhaften Kennzeichnungsmethoden unterscheiden sich deutlich in Anwendung und Ergebnis, weshalb die Details und Parameter der Verfahren vorgestellt werden. Anschließend wird der Begriff der Ermüdungsfestigkeit im Hinblick auf die durchgeführten Untersuchungen näher erläutert. Eine Forderung oder ein Verbot von dauerhaften Kennzeichen findet sich in für den Stahlbau relevanten Normen an mehreren Stellen. Die derzeitige Normensituation wird daher explizit erläutert. Des Weiteren werden bisherige Untersuchungen an markierten Bauteilen beschrieben.

2.2 Dauerhafte Kennzeichnungsmethoden

2.2.1 Allgemeines

Derzeit existiert eine Vielzahl an Kennzeichnungsmethoden für Stahlbauteile. Diese reichen von Markierungen mittels Farb- oder Ätztiften über angehängte Schilder, siehe Bild 2, oberflächenverändernde Markierungen bis hin zu automatisierten RFID Chips direkt im Bauteil.

Jede Methode hat Ihre Vor- und Nachteile, welche bei der Auswahl berücksichtigt werden sollten. Gerade Markierungen mit Farb- oder Ätztiften sind besonders einfach und ohne großen Aufwand aufzutragen, haben aber den Nachteil, dass sie nicht resistent gegenüber nachgeschalteter Bearbeitungsschritte oder Witterungseinflüsse (Verunreinigungen, UV-Licht etc.) sind. Häufig werden sie zum Kennzeichnen von Bauteilen innerhalb der Produktion und Fertigung eingesetzt. Meist werden hier temporäre werkseigene Informationen aufgebracht, welche ausschließlich für die nächsten oder weiteren Bearbeitungsschritte erforderlich sind.

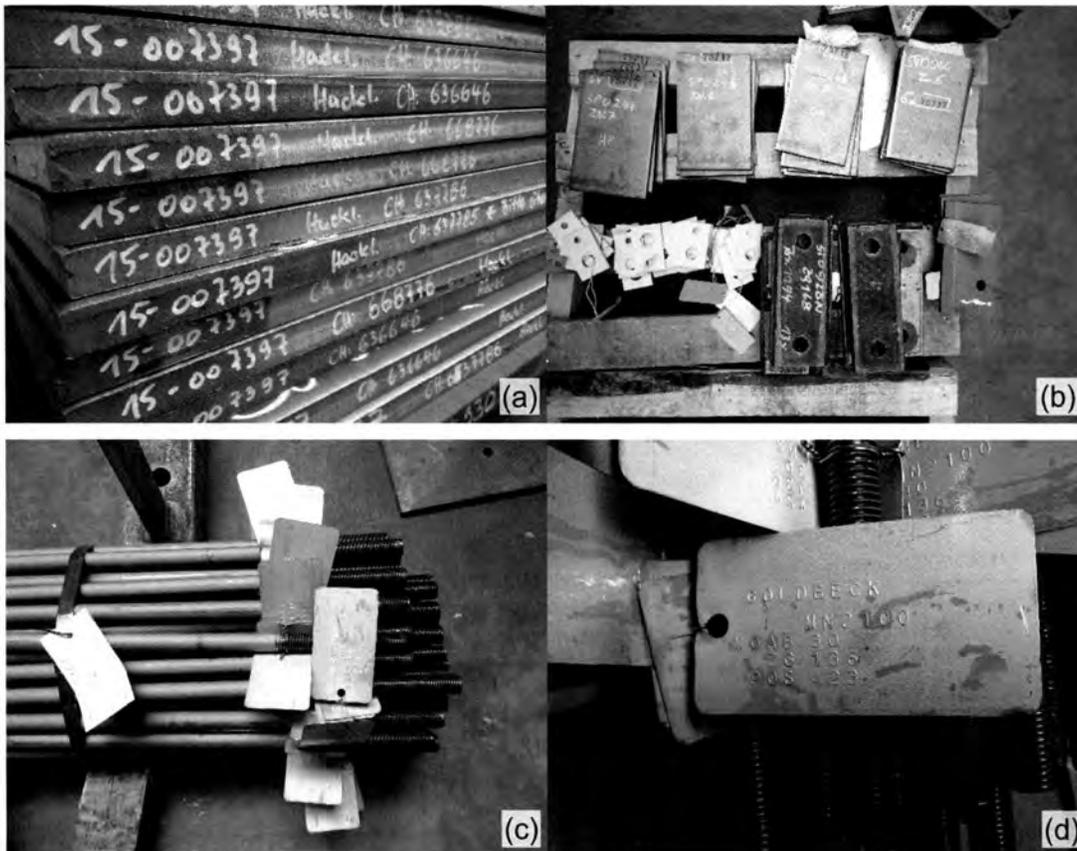


Bild 2 Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Kennzeichnungsmethoden in der Fertigung. Farbstiftkennzeichnung (oben), angehängter Etiketten (unten)

Angehängte Schilder, siehe Bild 3, sind in der Anbringung und den enthaltenen Informationen sehr flexibel. Die Etiketten, welche in der Regel aus Kunststoff- oder Blechschildern bestehen, können mit quasi jeglichen Informationen, wie Positionsnummer, Stahlsorte, Loskennzeichnung etc. versehen werden. Darüber hinaus kann mit Barcodes oder DataMatrix Codes der Informationsgehalt noch einmal deutlich vergrößert und Prozessabläufe durch halbautomatische Bearbeitung beschleunigt werden. Mithilfe dieser Barcodes können wesentlich mehr Informationen pro Fläche untergebracht werden. So ist es beispielsweise denkbar, zu Bauteilen gehörende Dokumente wie Abnahmeprüfzeugnisse und Auszüge von Ausführungsunterlagen (Bauteilzeichnungen, statische Berechnungen) indirekt in den Barcodes in Form von Hyperlinks zu Einträgen in entsprechenden Datenbanken zu hinterlegen. Mithilfe von geeigneten Lesegeräten können so alle notwendigen Informationen zu jedem Bauteil zu jedem Zeitpunkt abgerufen und weiterverarbeitet werden. Diese Methodik setzt allerdings ein entsprechendes IT-Netzwerk innerhalb des Betriebes voraus, welches sowohl Lese- und Schreibgeräte als auch Datenbanken miteinander verbindet. Zudem bieten codierte Informationen den Nachteil, dass sie ausschließlich mit entsprechenden Geräten ausgelesen werden können.

Mittlerweile sind am Markt auch Schilder erhältlich, welche resistent gegenüber den verschiedenen Fertigungsprozessen Feuerverzinken, Beschichten oder Strahlen sind. Diese in Bild 3 dargestellten Schilder besitzen spezielle Beschichtungen und/oder Materialeigenschaften, welche sie unempfindlich gegen die entsprechenden Bearbeitungsprozesse machen.

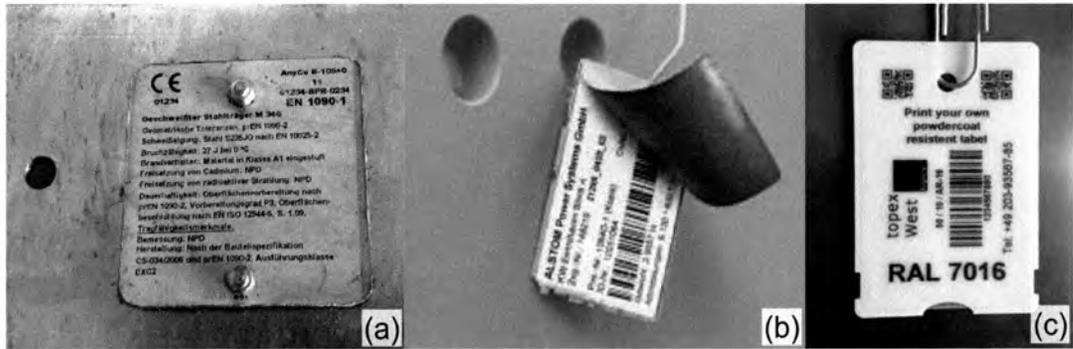


Bild 3 Exemplarische Darstellung gegen Feuerverzinken (a), Strahlen und Lackieren (b) sowie Pulverbeschichten (c) resistenter Anhängeschilder zur Kennzeichnung [5]

Entscheidender Nachteil der Schilder ist die fehlende Dauerhaftigkeit. Die Schilder sind im Gegensatz zu dauerhaften Kennzeichnungsmethoden zwar direkt, aber nicht dauerhaft mit dem Bauteil verbunden, wodurch sie lediglich als temporäre Methoden eingestuft werden können. Zusätzlich sind die Schilder jeweils nur gegen ein bis zwei Fertigungsprozesse gleichzeitig resistent, so dass sie vor jeder Bearbeitung erneuert werden müssen. Dies birgt vor allem beim Austausch der Schilder das Risiko für Verwechslungen.

Bei sogenannten RFID-Chips handelt es sich um Datenchips, welche in der Regel auf das Bauteil aufgeklebt oder angehängt werden, siehe Bild 4. Eine Einbindung der Chips direkt ins Material ist wünschenswert, allerdings mit Schwierigkeiten verbunden. So sind die bei der Stahlproduktion hohen Temperaturen oft ein Problem für die Elektronik der Speicherchips. Ein großer Vorteil der RFID-Chips ist neben der Fähigkeit Daten zu speichern, die Möglichkeit gespeicherte Informationen über Nahfunktechnik auslesen zu können, siehe Bild 4 und Bild 5.



Bild 4 RFID-Chip mit Scanner [SATO Germany GmbH]

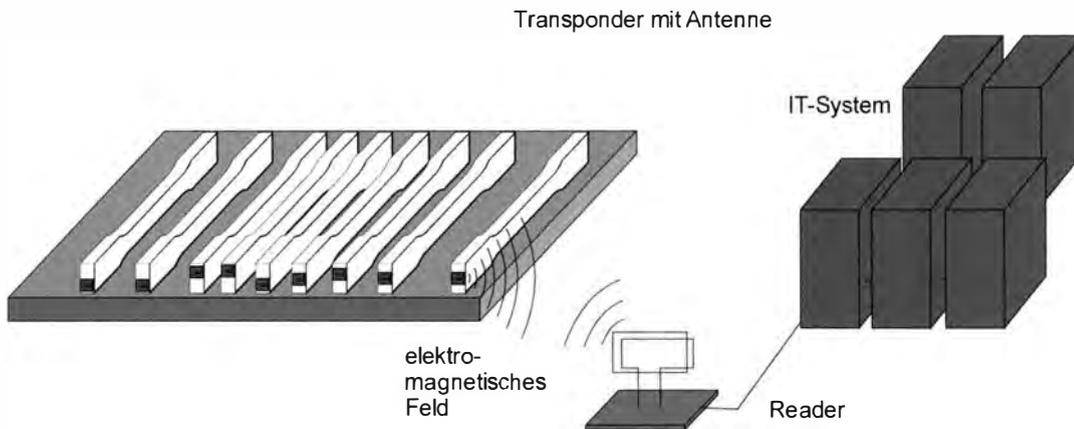


Bild 5 Schematischer Aufbau der RFID-Technik

Je nach Ausführung ergeben sich bei RFID-Chips spezifische Vor- bzw. Nachteile hinsichtlich der Verwendungsmöglichkeiten. Da die Informationen ausschließlich als Daten auf einem Speicherchip vorhanden sind, benötigt man zwingend ein entsprechendes Lesegerät, welches die Information anzeigen und/oder verarbeiten kann. Dies erhöht Kosten und Aufwand in Produktion, Fertigung und Montage. Sind sie in Bauteilen eingearbeitet, bieten RFID-Chips eine erhöhte Sicherheit gegen Fälschungen oder Manipulationen, da sie quasi nicht zu entfernen sind.

Der wesentliche Nachteil von RFID-Chips im Einsatz als Kennzeichnungs- und Rückverfolgbarkeitsmethode im Stahlbau ist die abschirmende Wirkung der metallischen Umgebung, welche eine sichere Datenübertragung verhindert. Eine zuverlässige und störungsfreie Kommunikation zwischen Sender und Empfänger ist besonders bei vielen gleichzeitig zu scannenden oder übereinanderliegenden Teilen, etwa auf einem LKW oder einer Palette, schwer umzusetzen.

Problematisch ist bei allen Methoden die insgesamt fehlende Dauerhaftigkeit zu sehen. Besonders bei Markierungen, die dauerhaft im Bauteil verbleiben sollen und äußeren Einflüssen ausgesetzt sind, kann bei den hier beschriebenen Methoden derzeit noch keine zufriedenstellende Lösung erreicht werden. In diesen Fällen sollten dauerhafte Kennzeichnungsmethoden eingesetzt werden, welche sich im Bauwesen auf vier Methoden einschränken lassen. Diese sind im Wesentlichen Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln.

2.2.2 Hartes Stempeln

Das Harte Stempeln bezeichnet einen Prozess, bei dem ein zuvor angefertigter Stempel mit hoher kinetischer Energie in das zu markierende Material gedrückt wird. Die Markierung entsteht hier durch plastische Verformung und Verdrängung des Grundmaterials. Der Stempel setzt sich häufig aus unterschiedlichen Buchstaben oder Zahlen zusammen, siehe Bild 6, weist im Grunde aber keine Beschränkungen hinsichtlich der Geometrie auf. Da jeder Stempel gesondert angefertigt werden muss, ist der Aufwand für einmalig zu verwendende Kennzeichnungsgeometrien sehr hoch, weshalb mit einer harten Stempelung in der Regel standardisierte Zeichen markiert werden. Darüber hinaus können mit harten Stempeln keine Linien zum Anreißen von Bauteilen oder Markieren erstellt werden.

Maschinen für Harte Stempelungen können sowohl mobil als auch stationär ausgeführt werden. Mobile Maschinen, Bild 6, bieten eine höhere Flexibilität, lassen sich aber nicht automatisch in Produktionsstraßen integrieren.



Bild 6 Beispiel einer mobilen Kennzeichnungsmaschine für hartes Stempeln der Firma HILTI

Bei stationären Maschinen lassen sich die Markierungen computergestützt und somit automatisiert vornehmen, siehe Bild 7. Die Markierung erfolgt hierbei auf Basis von CNC-Daten, welche zuvor für entsprechende Bauteile festgelegt wurden. Die Wahl der Markiergeometrie ist hier in der Regel auf Buchstaben- und Zahlenkombinationen begrenzt, was die Handhabung einschränkt.

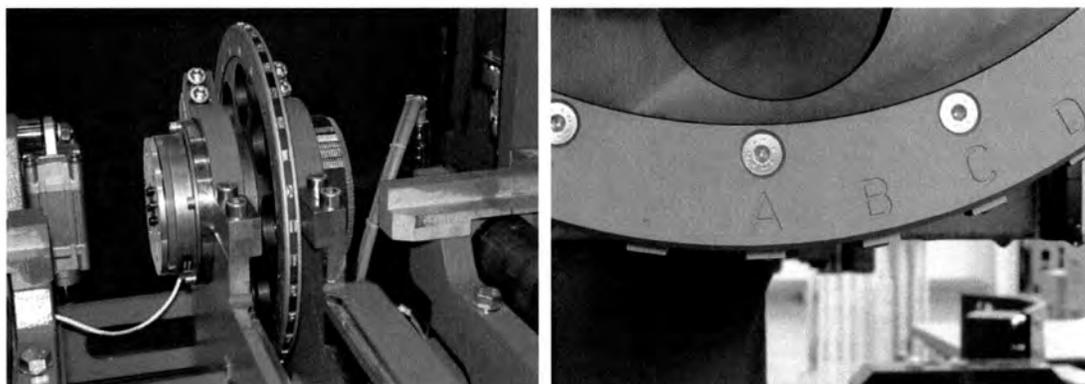


Bild 7 Vollautomatische Signiermaschine (links) mit Detailansicht des Prägerades (rechts) der Firma Kaltenbach [© Kaltenbach GmbH + Co. KG]

Das Markierergebnis hängt im Wesentlichen vom Arbeitsdruck, sprich der Energie, der Geometrie des Stempels und der Handhabbarkeit der entsprechenden Maschine ab. Während bei stationären Maschinen alle Parameter sehr konstant und reproduzierbar eingestellt werden können, kann das Markierergebnis bei mobilen Einheiten stärker variieren, siehe Bild 8. In der oberen Markierung durch eine stationäre Maschine ist gut zu erkennen, dass das Markierergebnis über alle Ziffern nahezu identisch ist. Die untere Markierung, welche mit einem mobilen Markiergerät händisch hergestellt wurde, zeigt dagegen eine ungleichmäßige Verteilung. Die Markierung zeigt auf dem Bild einen Markiertiefengradienten. Die Tiefe der Stempelmarkierung nimmt von der ersten Ziffer (links) bis zur letzten (rechts) stetig zu.

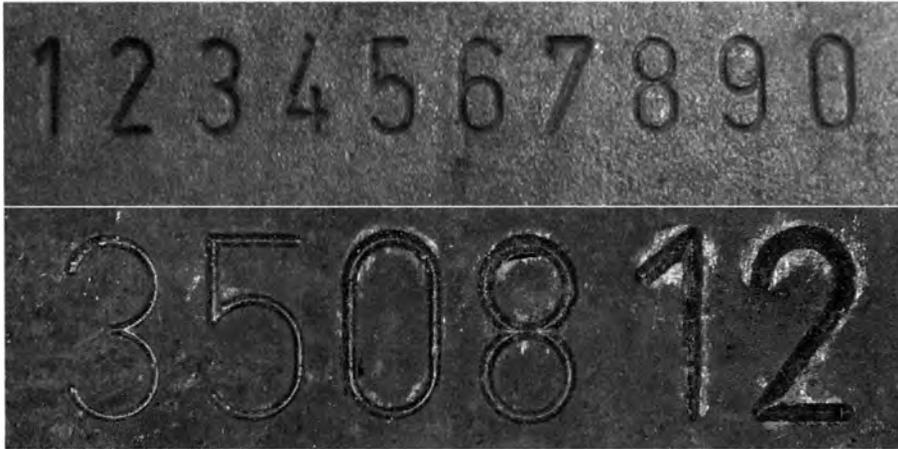


Bild 8 Vergleich der Stempelergebnisse einer stationären (oben) und mobilen (unten) Einheit

Die Unterschiede der in Bild 8 dargestellten Markierergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass die stationäre (obere) Markierung mit einzelnen Eindrücken für jedes Zeichen erstellt wurde, wohingegen die mobile (untere) Markierung mit einem zusammenhängenden Stempelsatz in einem Arbeitsgang erstellt wurde, vgl. Bild 8. Infolge der relativ langen Markierung in einem Schritt wirken sich leichte Auflagefehler bzw. eine nicht perfekt lotrechte Ausrichtung der Maschine stark auf das Markierergebnis aus. Hinzu kommt, dass bei einer stationären Maschine der Stempeldruck auf das Grundmaterial klar definiert ist, während die mobilen Maschinen oft mit Druckluft oder Treibladungen angetrieben werden. Dabei ist nicht nur der Arbeitsdruck deutlich variabler als bei stationären hydraulisch oder elektrisch betriebenen Maschinen, sondern auch die Gegenhalterkraft des Bedieners der Maschine. In Abhängigkeit des Auflagedrucks, erzeugt durch den Bediener, geht mehr oder weniger Energie im Rückstoß der Maschine verloren, wodurch die Markierungen ungleichmäßiger werden können. Zudem ist bei mobilen Markierungen die Auflagefläche des Werkstücks entscheidend. Liegt das Bauteil beispielsweise auf einem federnden Untergrund, geht entsprechend Energie verloren, welche nicht als Markierung ins Bauteil fließen kann.

In der Praxis ist daher davon auszugehen, dass bei mobilen Markiergeräten in der Regel weniger gleichmäßige Ergebnisse erzeugt werden können als mit stationären Maschinen.

Die Markierung selbst entspricht dem Negativ der Form des Stempels, da der Stempel direkt in das Grundmaterial eingedrückt wird. Mit der Form und Ausprägung des Stempels kann somit großer Einfluss auf die Geometrie der Kerbe genommen werden. In der Regel werden für Hartstempelungen relativ spitzzulaufende Formen benutzt, so dass diese die zur Markierung benötigte Energie beim Eindringen in das Grundmaterial reduzieren und damit mit den erwähnten mobilen Geräten mehrere Zeichen gleichzeitig geprägt werden können. Die infolge der Markierung hinterlassene Kerbe hat je nach Geometrie einen mehr oder weniger starken Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des gekennzeichneten Bauteils. Maschinenhersteller sind daher bestrebt, Stempel zu entwickeln, welche eine für die Ermüdungsfestigkeit günstigere Geometrie aufweisen, siehe Bild 9. Durch ausgerundeten Kanten soll der Kräftefluss optimiert werden, was den Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit herabsetzen soll. Die infolge der Ausrundung erhöhte benötigte Energie soll hierbei durch eine Auflösung der Stempel in einzelne Markierpunkte ausgeglichen werden.

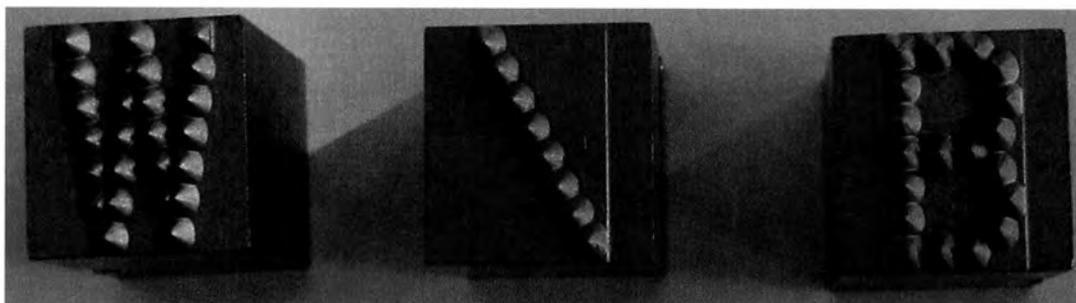


Bild 9 Geometrisch angepasste Markierstempel der Firma Kaltenbach [© Kaltenbach GmbH + Co. KG]

2.2.3 Fräsen

Beim Fräsen wird ein entsprechend entwickelter Fräskopf mit hoher Umdrehungsgeschwindigkeit in das Grundmaterial eingebracht und dann mit definierter Eindringtiefe entlang der geplanten Markierspur geführt. Die Markierung erfolgt somit durch Materialabtrag. Mithilfe der Fräsmarkierung können beliebige Zeichen und Formen hergestellt werden. Diese Markierungsart eignet sich somit sowohl zum Anreißen von Bauteilen als auch zum Markieren von Informationen in Form von Zeichen, Buchstaben oder Zahlen. Das Fräsverfahren lässt sich damit sehr flexibel einsetzen, zumal die entsprechenden Maschinen in der Regel in Produktionsstraßen integriert sind. Zusätzlich kann mithilfe der automatischen Kennzeichnung das sonst zeitaufwändige Anreißen von Bauteilen oder Positionen durch feine Fräslinien übernommen werden. Die Maschinenhersteller liefern hierfür mittlerweile Fräsmaschinen, die Bauteile simultan von einer bis zu vier Seiten bearbeiten können, siehe Bild 10. Die Flexibilität und Effizienz in der Produktion und Fertigung kann dadurch stark erhöht werden.

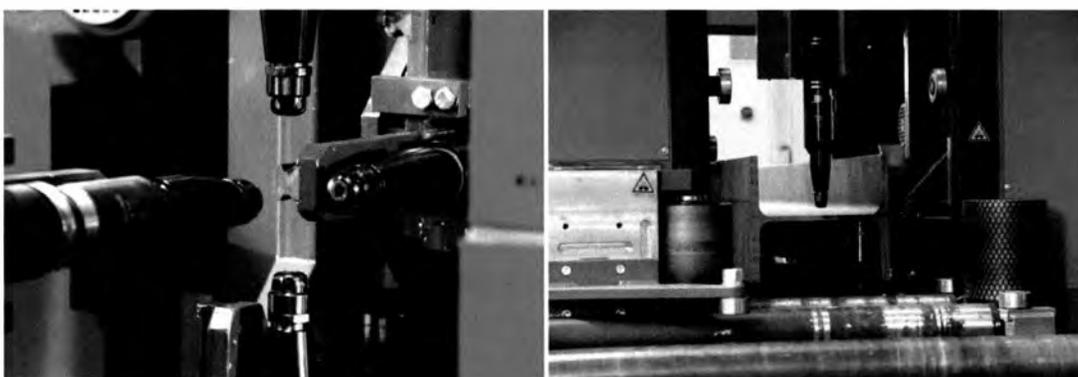


Bild 10 Beispielhafte Darstellung einer Fräsmaschine der Firma Voortmann zur Markierung von Bauteilen [6]

Die Geometrie der Fräsmarkierung ist zum einen von der Geometrie des Fräskopfes, zum anderen von der Umdrehungsgeschwindigkeit des Werkzeuges sowie der Schärfe der Schnittkanten abhängig. Die grundsätzliche Form der Markierung wird von der Form des Fräskopfes vorgegeben. Für die Geometrie von Fräsköpfen existiert eine Vielzahl an Ausführungsmöglichkeiten. Hierzu zählen neben verschiedenen Fräskopfgrößen auch unterschiedliche Formen, wie Rundkopffräser, Schafffräser oder speziell auf die Bedürfnisse der Markierung angepasste Fräsköpfe, welche sowohl tiefe als auch sehr feine Markierungen zulassen. Diese sind in der Regel mit einer konisch zulaufenden Schneidspitze versehen, welche der Markiertiefe entsprechend in das Grundmaterial eingebracht wird, siehe Bild 11.

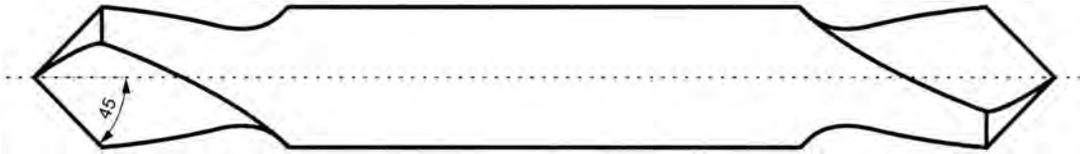


Bild 11 Exemplarische Darstellung eines Fräswerkzeugs

Einen weiteren Einfluss stellen die Schnittkanten des entsprechenden Werkzeugs dar. Je nach Einsatzdauer und Material kann sich die Qualität der Kennzeichnung verändern. Das Material wird dann nicht mehr sauber aus dem Grundwerkstoff geschnitten, wodurch unsaubere Kanten und Markierungen entstehen. Als problematisch kann sich bei Fräsmarkierung die Einstellung einer gleichbleibend tiefen Markierung herausstellen. Da die Fräsmaschinen in der Regel keinen automatischen Höhenausgleich bieten, wirken sich Walz- und Bauteiltoleranzen der zu markierenden Teile direkt auf die Markiertiefe aus. Die Programmierung der Maschine stellt sich in den meisten Fällen auf den ersten zu markierenden Punkt ein. Der Vorschub des Fräskopfes erfolgt dann ausschließlich in Markierrichtung.

2.2.4 Plasmamarkieren

Das Plasmamarkieren ist eine Form des Plasmaschneidens, welches häufig in Stahlbaubetrieben zum Trennen von Stahl eingesetzt wird. Beide Verfahren sind thermische Schneidprozesse, welche durch einen, mithilfe einer Düse gerichteten, Lichtbogen erfolgen. Der elektrisch erzeugte Lichtbogen hat eine Temperatur von bis zu 30.000°C und wird zwischen dem Werkstück und einer nichtabschmelzenden Elektrode erzeugt. Infolge der hohen Temperatur und dem schnellen gerichteten Lichtbogenstrahl kann der zu markierende oder trennende Werkstoff aufgeschmolzen werden. Dadurch entsteht eine saubere Markierung bzw. ein sauberer Schnitt durch das Material. Die hohe Geschwindigkeit des Lichtbogenstrahls wird durch eine verengte Düse an der Spitze des Werkzeugs erzeugt. Dadurch wird der Strahl sehr schmal und sorgt für einen schnellen und präzisen Schnitt. Während des Plasmaschneidvorgangs wird aufgeschmolzenes Material aus der Schnittfuge herausgetrieben, was wiederum eine saubere Schnittfuge fördert, siehe Bild 12.

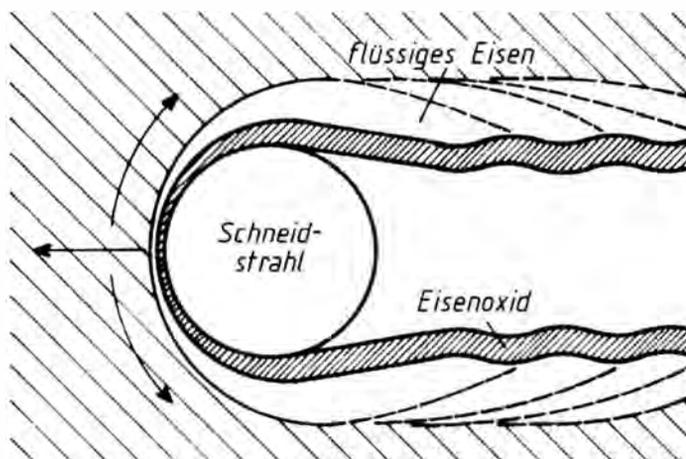


Bild 12 Vorgänge in der Metallschmelze beim Brennschneiden [7]

Beim Plasmamarkieren wird im Vergleich zum Plasmaschneiden mit einer deutlich geringeren Stromstärke gearbeitet, da nur ein oberflächennaher Schnitt als Markierung erzeugt werden soll. Während beim Plasmaschneiden Stromstärken bis

600 Ampere eingesetzt werden, liegt die Stromstärke beim Markieren bei ca. fünf bis 20 Ampere. Ein Vorteil der Ähnlichkeit der beiden Verfahren Plasmaschneiden und Plasmamarkieren ist, dass unter gewissen Voraussetzungen für beide Verfahren die gleichen Maschinen genutzt werden können. Dies reduziert die Kosten und den Aufwand in den bereits bestehenden Fertigungsstraßen. Die Markiertiefe lässt sich beim Plasmamarkieren vergleichsweise genau über die Markierparameter einstellen. Neben weiteren Maschinenparametern sind besonders zwei Faktoren für die Markierung entscheidend: die Markierstromstärke und die Markiergeschwindigkeit. Bei erhöhter Stromstärke wird die Markierung bei gleichbleibender Markiergeschwindigkeit tiefer. Erhöht man die Markiergeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der das Werkzeug in Markierrichtung bewegt wird, so wird bei gleicher Stromstärke die Markierung flacher. Grundsätzlich wird eine Markierung tiefer, je länger der Plasmastrahl an einer Stelle verweilt. Im Gegensatz zum Fräsen lässt sich so beim Plasmamarkieren eine, in Abhängigkeit von der Maschinengenauigkeit, relativ konstante Markierspur erreichen. In der Praxis unterliegen die Plasmamarkiermaschinen allerdings maschinenbedingten Streuungen, wodurch beispielsweise die Markiergeschwindigkeit nicht immer exakt gleichbleibend ist. Aus diesem Grund kann es besonders bei Kurven oder Richtungsänderungen in den Markierungen zu gewissen Unregelmäßigkeiten in der Markiergeschwindigkeit und somit auch in dem entsprechenden Ergebnis kommen, siehe Bild 13. Hinzu kommt bei Plasmamarkierungen die Tatsache, dass an allen Ansatz- sowie Umkehrpunkten der Markierspur tiefere Einbrände erfolgen. Dies liegt ebenfalls an der geringfügig größeren Verweildauer des Plasmaprenners beim Ansetzen.

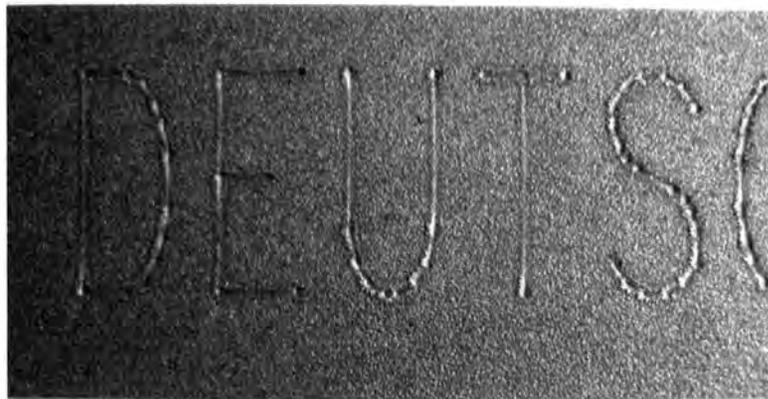


Bild 13 Exemplarische Darstellung einer Plasmamarkierspur mit 17 A

Des Weiteren kann es beim Plasmamarkieren von vergleichsweise filigranen Kennzeichnungen zu erhöhten Markiertiefen kommen, siehe Bild 14. Zum einen wird hier der Unterschied zwischen zwei Stromstärken ersichtlich, zum anderen ist die Markierung im Vergleich zu der Markierung in Bild 13 deutlich unsauberer. Dies liegt an den im Vergleich deutlich kleineren zu markierenden Schriftzeichen.

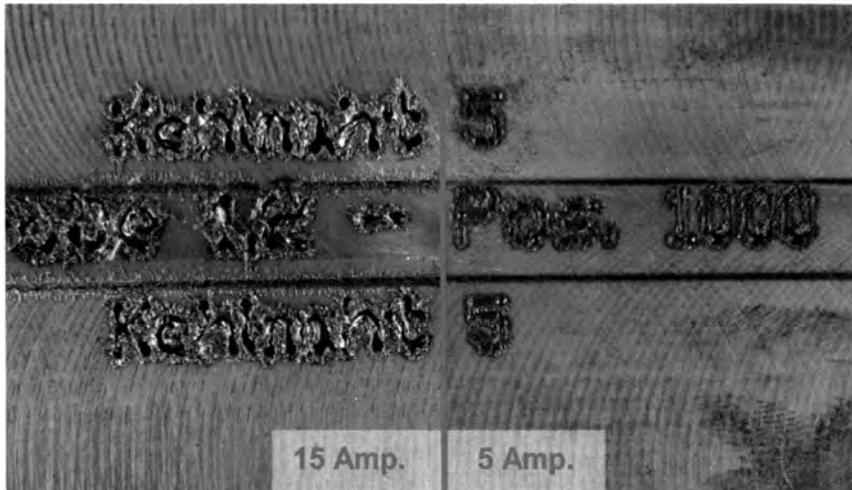


Bild 14 Direkter Vergleich der Plasmamarkierungsergebnisse infolge einer Markierstromstärke von 15 A (links) und 5 A (rechts)

Darüber hinaus ist in Bild 14 deutlich zu erkennen, dass sich das aufgeschmolzene Material am Rand der Markierspur ablagert. Je nach Menge des aufgeschmolzenen Materials und somit der Tiefe der Markierspur kann es sich hier um mehr (Bild 14) oder weniger (Bild 13) Material handeln.

2.2.5 Nadeln

Die Nadelmarkierung beschreibt einen Prozess, bei dem eine Markierung mithilfe einer pneumatisch, elektrisch oder magnetisch angetriebenen oszillierenden Nadel aus Hartmetall erzeugt wird. Die Nadel wird hierbei Punkt für Punkt in das Material gedrückt und erzeugt so ein entsprechendes Markiermuster, siehe Bild 15. In Abhängigkeit der Abstände der einzelnen Markierpunkte ergibt sich entweder ein klar abgegrenztes Punktmuster oder eine zusammenhängende Markierspur. Nadelmarkierungen werden häufig seitens der Stahlhersteller zur Kennzeichnung der Stahlbleche verwendet. Häufig wird nach der Produktion die Stahlgüte auf die Bleche markiert.



Bild 15 Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Nadelmarkiermethoden

Die Markierspur ist wie beim Harten Stempeln abhängig von der Geometrie der Nadelspitze und der Eindrückenergie. Die Nadelspitze hat in der Regel eine runde, konisch verlaufende Form mit einem mehr oder weniger großen Radius an der Nadelspitze, siehe Bild 16.

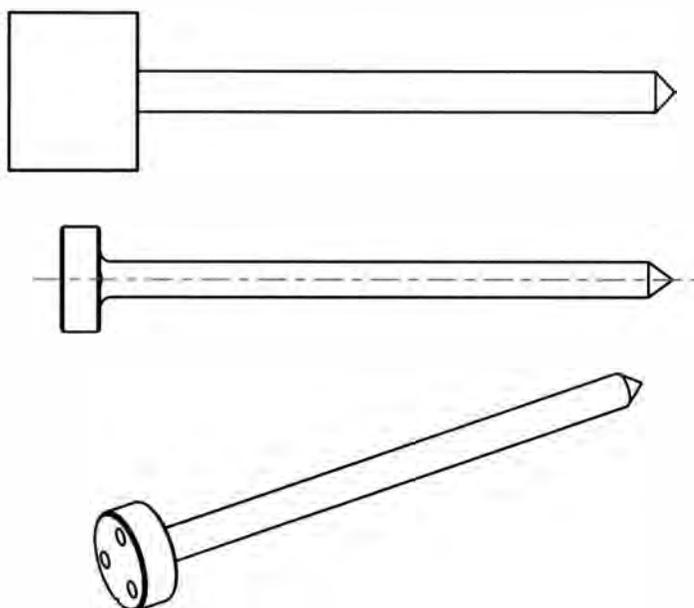


Bild 16 Exemplarische Darstellung zweier Markiernadeln

Bei der Verwendung besonders ausgerundeter Nadelspitzen spricht man beim Nadelprozess vom „low stress needling“, da sich der Effekt der Markierung auf den Spannungsfluss und die Ermüdungsfestigkeit verringern soll. Da bei Nadelmarkierungen immer nur einzelne Punkte markiert werden, ist der Kraftaufwand im Gegensatz zum harten Stempeln deutlich geringer.

Nadelmarkiermaschinen sind sowohl stationär als auch mobil verfügbar. Als stationäre Maschinen sind sie in der Regel in Produktionsstraßen integriert. Mobile Maschinen, siehe auch Bild 17, lassen sich flexibel auf nahezu allen Bauteilen einsetzen.

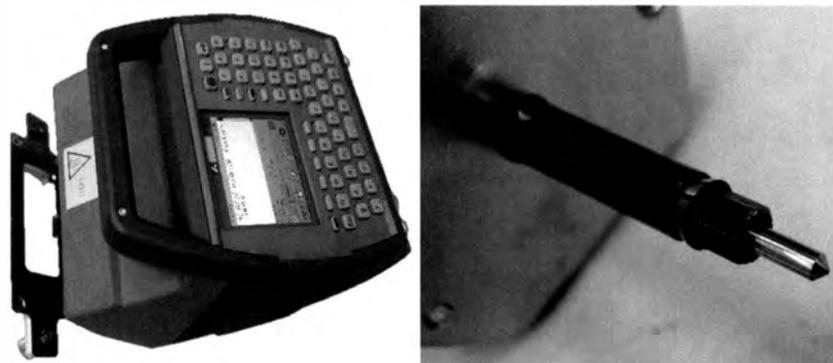


Bild 17 Beispielhafte Darstellung eines Nadelmarkiergerätes (links) mit Nadelspitze (rechts)

Aufgrund des geringeren benötigten Kraftaufwands lassen sich auch mobile Nadelmarkierungen mit reproduzierbar gleichen Eigenschaften erstellen. Der Rückstoß infolge der Nadelmarkierung ist in der Regel so gering, dass sich die Maschinen mit einfachen Magneten an Stahlbauteilen befestigen lassen.

2.3 Ermüdungsfestigkeit

2.3.1 Allgemeines

Unter dem Begriff der Ermüdung versteht man den Schädigungsprozess eines Bauteils oder Bauwerks unter zeitlicher veränderlicher und häufig wiederkehrender Beanspruchung. Das Ermüdungsversagen erfolgt durch Entstehung kleiner technischer Anrisse mit kontinuierlichem Risswachstum bis zu einer instabilen Risswachstumsphase, welche vergleichsweise schnell zum Restbruch führt.

Die zum Versagen führende Ermüdungsbeanspruchung kann sich in unterschiedlichen Formen ausprägen. Im Bauwesen tritt diese in der Regel durch wechselnde äußere Belastungen auf. Ein Ermüdungsversagen erfolgt bereits bei Belastungen deutlich unterhalb der statischen Beanspruchbarkeit nach einer unbestimmten Zahl an ertragbaren Lastwechseln. Für dynamisch beanspruchte Konstruktionen ist daher immer auch ein Ermüdungsnachweis erforderlich. Zusätzlich werden bei dynamisch beanspruchten Bauwerken, wie beispielsweise Brücken, Wartungsintervalle angeordnet, bei denen die relevanten Bauteile auf Risse und Schäden überprüft werden.

2.3.2 Rissentstehung und Risswachstum

Die Rissentstehung bzw. das Risswachstum haben entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer eines Bauwerks. Die verschiedenen Rissphasen während einer Ermüdungsbeanspruchung lassen sich in drei Phasen einteilen, siehe Bild 18. Phase I ist von der Rissinitiiierung gekennzeichnet. Die Rissinitiiierung erfolgt bei zyklischer Beanspruchung durch das Entstehen von Mikrorissen, die sich im Laufe der Beanspruchungszyklen zu einem sogenannten technischen Anriss zusammenschließen. Die Länge eines technischen Anrisses entspricht in der Regel der Fehlergröße, welche mit zerstörungsfreien Prüfverfahren detektierbar ist [8]. Der technische Anriss erfolgt in der Regel an Stellen eines Bauteils, an welchen Kerben, Querschnittsübergänge oder Materialfehler vorliegen. Besonders bei markierten Bauteilen ist somit die Art und Ausprägung der eingebrachten Kerbe von entscheidender Bedeutung. Die bis zu einem technischen Anriss erreichte Lastwechselzahl wird als N_1 („initiation“) bezeichnet und ist stark abhängig von der Größe und Art der Beanspruchung, des vorliegenden Materials sowie Art und Schwere der Fehlstellen. Sobald ein technischer Anriss vorliegt, wird der weitere stabile Rissfortschritt als Phase II bezeichnet.

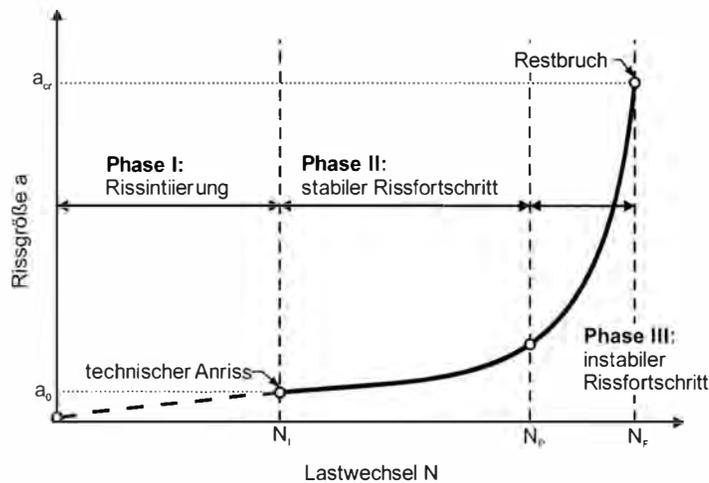


Bild 18 Phasen des Risswachstums

Infolge des bereits vorhandenen Anrisses bilden sich bei weiteren Beanspruchungen örtlich im Bereich des Risses Spannungskonzentrationen, siehe auch Bild 19, welche infolge der Ermüdungsbeanspruchung zu Wechsellastplastizierungen und somit zum weiteren Risswachstum führen. In Phase II ist der Rissfortschritt unabhängig von den Festigkeitseigenschaften des Grundmaterials. In Abhängigkeit von der Belastung geht das stabile in ein instabiles Risswachstum bis zum Versagen des Bauteils über. Das instabile Risswachstum erstreckt sich in der Regel über einen deutlich kürzeren Zeitraum als das stabile Risswachstum. Ein Versagen durch Gewaltbruch der restlichen Querschnittsfläche tritt bei einer kritischen Rissgröße a_{cr} ein. Die Lastwechselzahl, welche zum Übergang von einem stabilen zu einem instabilen Risswachstum führt, wird als N_p („propagation“) bezeichnet. Die Lastwechselzahl bis zum Restbruch wird als N_f („failure“) bezeichnet. Da die ertragbaren Lastwechsel in Phase III bis zum Bruch relativ klein sind, kann die Lebensdauer eines Bauteils über die Rissentstehung und das Risswachstum definiert werden.

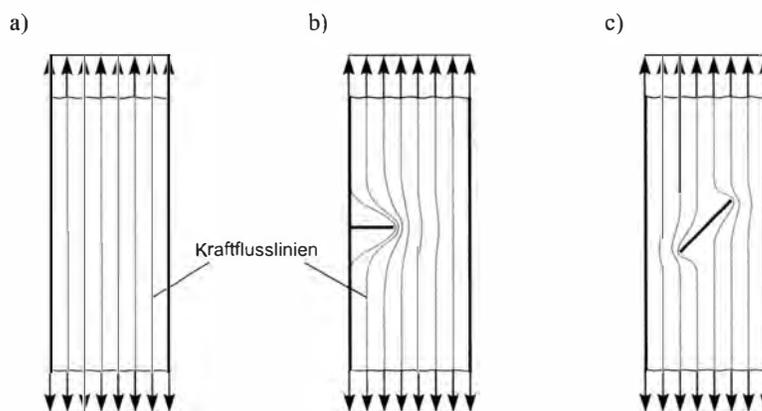


Bild 19 Störung des Kräftefluss durch Risse oder Fehlstellen [9]

Die Lebensdauer N_f kann somit definiert werden als Summe aus ertragbarer Lastwechselzahlen N_i und N_p . Größe und Verhältnis der beiden Lastwechselzahlen zueinander hängen dabei von unterschiedlichen Faktoren ab. Bei quasi kerbfreien Proben oder Bauteilen erstreckt sich die Rissinitiierungsphase über einen vergleichsweise großen Zeitraum. Bei bereits gekerbten Proben kann in Abhängigkeit von der Kerbgeometrie bereits von einem technischen Anriss ausgegangen werden, wodurch sich das Ermüdungsverhalten auf die Phase der stabilen Rissausbreitung beschränkt. Für ungekerbte Proben, welche als quasi eigenspannungslos betrachtet werden

können, kann mit zunehmender Streckgrenze aufgrund der ausgeprägten Rissinitiationsphase ein quasi linearer Anstieg der Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden, siehe Bild 20. Bei zunehmender Kerbwirkung im betrachteten Bauteil nimmt der Einfluss der Streckgrenze des Werkstoffs auf die Ermüdungsfestigkeit ab.

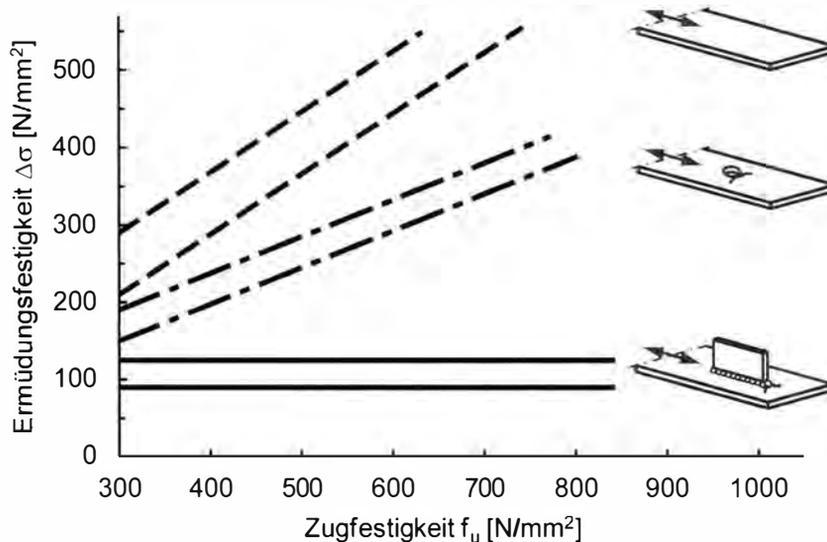


Bild 20 Einfluss der Kerbwirkung auf die Ermüdungsfestigkeit bei unterschiedlicher Kerbwirkung [10]

Im Fall der in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Markiermethoden kann in Abhängigkeit der Geometrie der infolge einer Kennzeichnung eingebrachten Kerbe bereits von einer Rissinitiation ausgegangen werden oder nicht. Bei harten Stempelungen oder Fräsmarkierungen kann von einem Anriss ausgegangen werden, bei Plasma- und Nadelmarkierungen ist eine Definition nicht ganz eindeutig zu treffen. Wie groß der Einfluss der Streckgrenze des Materials auf die Ermüdungsfestigkeit von dauerhaft markierten Stahlbauteilen ist, gilt es zu untersuchen.

Das Rissbild eines Ermüdungsbruchs ist gekennzeichnet durch eine vergleichsweise glatte und feinkörnige Ermüdungsbruchfläche sowie eine relativ grobkörnige Restbruch- oder Gewaltbruchfläche, siehe Bild 21. Ermüdungsriss beginnen mit einem Riskeim, dem technischen Anriss, von einer Fehlstelle und breiten sich von da annähernd halb elliptisch aus bis die verbliebene Querschnittsfläche so klein ist, dass es zum Versagen durch einen Restbruch kommt.

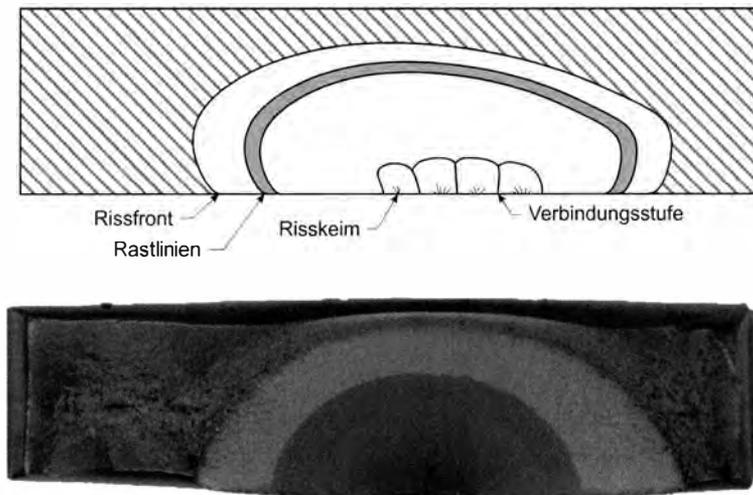


Bild 21 Darstellung einer typischen Ermüdungsbruchfläche als Schema (oben) und Bruchbildfoto (unten)

2.3.3 Ermüdungsversuch

Ermüdungsbeanspruchte Bauteile unterliegen meist sehr komplexen und nicht eindeutig bestimmbar Belastungsstufen. Um eine vergleichbare Aussage über die Ermüdungsfestigkeit bestimmter Bauteile treffen zu können, ist daher ein einheitlich abstrahiertes Modell notwendig, welches diese Aussagen liefert. Diese Abstraktion leistet der Ermüdungsversuch. Beim Ermüdungs- oder Dauerschwingversuch werden Prüfkörper mit einer schwingenden Belastung beaufschlagt. Die Belastung kann im Ermüdungsversuch zugschwellend, druckschwellend oder wechselnd erfolgen, siehe Bild 22. Das Verhältnis zwischen Ober- und Unterspannung wird in diesem Zusammenhang als R bezeichnet.

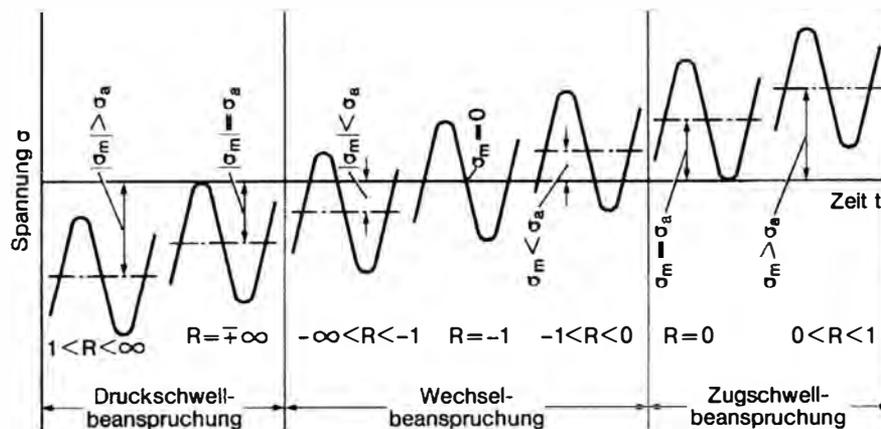


Bild 22 Beanspruchungsbereiche im Dauerschwingversuch [8]

Die Dauerfestigkeit wird in der Regel nach dem Wöhler-Verfahren ermittelt. Hierbei werden in der Regel 10 Versuchskörper, welche hinsichtlich Werkstoff, Bearbeitungs-zustand und Beschaffenheit identische Eigenschaften besitzen, Schwingbeanspruchungen mit je Versuchskörper wechselnden Beanspruchungsniveaus unterzogen. Die für die jeweilige Probe eingestellte Beanspruchung wird dabei während der Prüfung nicht verändert. Bei diesem Versuch handelt es sich somit um einen Einstufen-Dauerschwingversuch oder ein Einstufenkollektiv, siehe Bild 23.

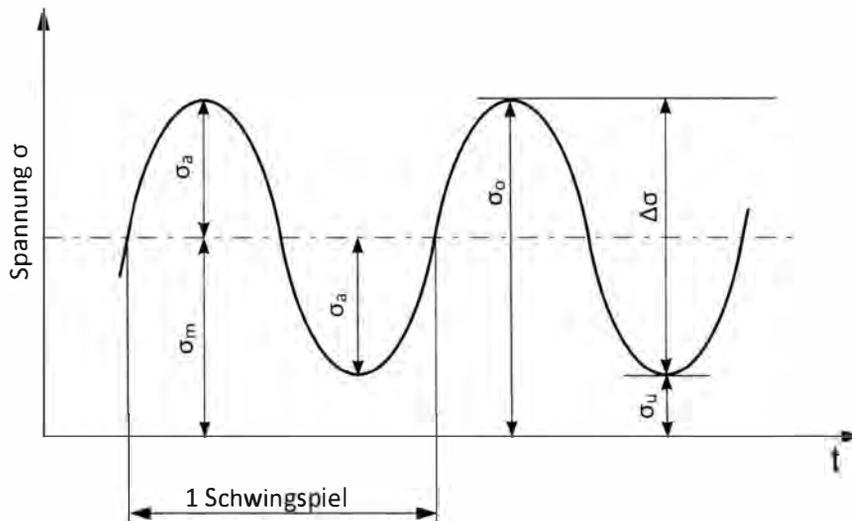


Bild 23 Schema der Belastung eines Dauerschwingversuches

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche können in einem Wöhlerdiagramm aufgetragen und bewertet werden. Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit wird bei einer Schwingenspielzahl von $2 \cdot 10^6$ ermittelt. Für ausgewählte stahlbautypische Kerbdetails sind die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit z. B. im Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9 [2] zusammengefasst, siehe Bild 24.

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160	<p>ANMERKUNG Der Kerbfall 160 ist der höchst mögliche, kein Kerbfall kann bei irgendeiner Anzahl an Spannungsschwingenspielen eine höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen</p>	<p>Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse. (K)</p> <p>1) (K) Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten; (K)</p> <p>2) (K) Walzprofile mit gewalzten Kanten; (K)</p> <p>3) Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile</p>	<p>Kerbfälle 1) bis 3), Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen</p>
140		<p>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche.</p> <p>4) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung</p> <p>5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seichten und regelmäßigen Brennefeln oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung</p> <p>Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090</p>	<p>4) Alle sichtbaren Ränderkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen</p> <p>Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen.</p> <p>Kerbfälle 4) und 5): Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq 1/4$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut</p>
125		<p>6) und 7)</p> <p>(K) Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3) (K)</p>	<p>Kerbfälle 6) und 7), Δr berechnet nach: $r = \frac{F \cdot S(t)}{I \cdot t}$</p>
100 $m = 5$		<p>6) und 7)</p> <p>(K) Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3) (K)</p>	<p>Kerbfälle 6) und 7), Δr berechnet nach: $r = \frac{F \cdot S(t)}{I \cdot t}$</p>

Für Kerbfall 1–5 ist bei Einsatz von weiterfestem Stahl der nächsttiefere Kerbfall zu verwenden

Bild 24 Auszug aus dem Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9:2010-12

2.4 Normung

Die Ausführung von Stahltragwerken ist in DIN EN 1090-2 [1] geregelt. Diese gibt für die Identifizierbarkeit und Kennzeichnung von Bauteilen strengere Regeln vor als die bisherige DIN 18800-7 [11], welche lediglich eine eindeutige Identifizierbarkeit aller Teile von Stahlkonstruktionen während sämtlicher Fertigungsabschnitte forderte. Wie diese Identifizierbarkeit gewährleistet werden sollte oder musste, schrieb DIN 18800-7 nicht vor. DIN EN 1090-2 fordert dahingegen explizit neben einer eindeutigen

Identifizierbarkeit und Rückverfolgbarkeit während aller Produktions- und Fertigungsprozesse, wie in DIN 18800-7, zusätzlich für Bauwerke der Ausführungsklassen EXC3 und EXC4 die eindeutige Zuordnung von Prüfbescheinigungen zu den ausgeführten Bauteilen und deren Komponenten. Eine Identifizierung der Bauteile kann laut DIN EN 1090-2 neben weiteren Maßnahmen auch durch dauerhafte Kennzeichnung erfolgen, insbesondere dann, wenn die Identifizierung nicht durch die Form des Bauteils selbst oder durch eine Loskennzeichnung sichergestellt werden kann. Die Aufbringung dauerhafter Kennzeichen ist allerdings nur erlaubt, wenn durch die Markierung keine Schäden verursacht werden. Die in DIN EN 1090-2 beschriebenen dauerhaften Kennzeichnungsmethoden können im Wesentlichen den vier Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln zugeordnet werden.

Diese dauerhaften Markiermethoden sind nach DIN EN 1090-2 allerdings nur bedingt erlaubt. So ist der Einsatz nur zulässig für Stahlsorten bis einschließlich S355 und nur in vorher festgelegten Bereichen, in denen kein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu erwarten ist, nicht zulässig ist der Einsatz bei nichtrostenden Stählen. Ist der Einsatz dieser Markiermethoden nicht zulässig, muss geprüft werden, ob Weichprägungen eingesetzt werden dürfen. Meißelkerben sind nicht zugelassen.

In den Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe, DIN EN 1011-1:2009-03 [12], wird zudem gefordert, dass harte Stempelungen generell, aber insbesondere in hochbeanspruchten oder korrosionsgefährdeten Bereichen vermieden werden sollten.

Ein weiterer Vermerk zu dauerhaften Kennzeichnungen findet sich indirekt in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 4, Stahlbau, Stahlverbundbau (ZTV-ING Teil 4) [13], in welcher für die Wahl der Werkstoffe für tragende Bauteile von Brücken die technischen Lieferbedingungen der Deutschen Bahn, Deutsche Bahn Standard (DBS) 918 002-02 [14] vorgeschrieben werden. DBS 918 002-02 fordert wiederum für Flacherzeugnisse und Form- und Stabstahl mit einem Gewicht von mehr als 15 kg/m eine Kennzeichnung mittels Schlagstempelung oder Hartstempelung. Weiterhin ist eine alternative Markierung nur nach Zustimmung des Bestellers zulässig. Darüber hinaus verbietet die ZTV-ING Teil 4 konkret oberflächenverändernde Markierung wie z.B. Schlagmarkierungen, Fräsungen, Nadelungen oder Plasmamarkierungen in ermüdungsgefährdeten Bereichen.

Hinsichtlich des Einsatzes von harten Markierverfahren widersprechen sich DIN EN 1090-2 und DBS 918 002-02 faktisch, was somit die Frage nach der Ausführbarkeit aufwirft.

Eine Einordnung markierter Bauteile in den europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [2] ist für gekennzeichnete Bauteile generell nicht möglich. Die höchste Kerbfallklasse nach DIN EN 1993-1-9 ist 160 und gilt für Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten. Für eine Einordnung in Kerbfallklasse 160 sind scharfe Kanten sowie Oberflächen- und Walzfehler durch Schleifen zu beseitigen. Zusätzlich ist an diesen Stellen ein nahtloser Übergang herzustellen. Die Kerbfallklassen 140 und 125 gelten für maschinell bzw. von Hand brenngeschnittene Bauteile mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Als Anforderungen für diese beiden Kerbfallklassen sind alle sichtbaren Randkerben zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen, siehe Bild 24. Weiterhin sind einspringende Ecken durch

Schleifen zu entfernen oder durch einen Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen. Für durch Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren oder Nadeln gekennzeichnete Versuchskörper existieren keine eigenen Kerbfallklassen. Die Frage nach der Größe des Einflusses dieser Markiermethoden auf die Ermüdungsfestigkeit stellt daher eine dringend zu klärende Frage dar.

2.4.1 Klassifizierung von Hart- und Weichprägungen

In den einschlägigen Normen wie DIN EN 1090-2 [1] wird wiederholt auf Hart- bzw. Weichprägungen verwiesen, wenn beispielsweise der Einsatz von harten Kennzeichnungsmethoden ausgeschlossen wird und der Einsatz von Weichprägungen geprüft werden soll. Eine Definition, welche eine exakte Einteilung in harte oder weiche Kennzeichnungsmethoden liefert, erfolgt allerdings nicht. Die englische Ausgabe der EN 1090-2 [3] liefert hier mit den Begriffen „hard stamps“ und „soft or low stress stamps“ eine genauere Differenzierung. Demnach sind alle Kennzeichnungen welche geringe Spannungen innerhalb des Werkstoffes oder Bauteils hervorrufen als „low stress stamps“, also Weichprägungen, einzustufen [15]. Geringe Spannungen werden vor allem durch weiche, fließende Übergänge zwischen der Markierung und dem Grundmaterial erreicht. Darüber hinaus fördert eine insgesamt runde Markiergeometrie einen günstigeren Kräftefluss, wodurch wiederum lokale Spannungsspitzen minimiert werden. Nach dieser Einordnung sollten die Markiermethoden Hartes Stempeln und Fräsen sicher als harte Markiermethoden eingestuft werden. Die Klassifizierung von Plasma- und Nadelmarkierungen ist weiterhin schwierig. Plasmamarkierungen erzeugen in der Regel weiche und ausgerundete Markierkerben, wonach sie als weiche Markiermethoden einzustufen wären. Während des Plasmamarkiervorgangs wird allerdings Hitze in den Werkstoff eingebracht, welche die Eigenschaften verändern und Eigenspannungen hervorrufen kann. Hierdurch werden die Spannungen innerhalb einer Markierspur wiederum erhöht, wodurch das Plasmamarkieren als Hartprägung einzustufen wäre. Bei Nadelmarkierungen ist die Einstufung als harte oder weiche Markiermethode abhängig von der Geometrie der Nadelspitze. Bei einer speziell abgerundeten Nadelspitze ergeben sich dementsprechende ausgerundete Markierkerben, wodurch die Markiermethode am ehesten als Weichprägung eingestuft werden kann. Selbst bei nicht im Speziellen abgerundeten Nadelspitzen ergeben sich in der Regel sehr „sanfte“ Markierungen, welche einen weichen Übergang zum Grundmaterial bieten.

2.5 Wissenschaftliche Untersuchungen

Im Rahmen einer intensiven Literaturrecherche konnten mit einer Ausnahme keine Publikationen zum Einfluss von Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen gefunden werden. Während der Recherche konnte ein Beitrag der SLV Halle zu Untersuchungen zum Plasmamarkieren von dünnen Blechen bis 10 mm Dicke eruiert werden [16].

2.5.1 Untersuchungen zum Plasmamarkieren der SLV Halle

Die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle hat sich im Rahmen eines Forschungsvorhabens [16] gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie mit dem Einfluss des Plasmamarkierens auf die Ermüdungsfestigkeit dünner Stahlbleche beschäftigt. Der Schwerpunkt der Untersuchung wurde auf die Auswirkungen unterschiedlicher Stromstärken beim

Plasmamarkieren auf die Ermüdungsfestigkeit gelegt. Untersucht wurden im Rahmen des Projekts Markierstromstärken von 6 A, 10 A und 14 A. Die zugehörige Markiergeschwindigkeit betrug für alle Stromstärken 3 m/min. Die Markierungen wurden auf Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2+N mit Blechdicken von $t = 3$ mm und $t = 10$ mm sowie auf Prüfkörpern aus S355J2H mit Blechdicken von 5 mm aufgebracht. Die Ermüdungsversuche wurden mit unterschiedlichen Grenzspannungsverhältnissen $R = 0,1$, $R = 0,5$ und $R = -1$ durchgeführt. Neben den Hauptuntersuchungen mit plasmamarkierten Versuchskörpern wurde zusätzlich eine Versuchsreihe mit durch Schlagstempelung markierten Proben gefahren und ausgewertet. Eine Übersicht der Versuchsparameter ist in Bild 26 dargestellt. Die entsprechenden Kennzeichnungen der Prüfkörper sind in Bild 27 dargestellt.

	t = 3 mm	t = 5 mm		t = 10 mm
		HiFocus 80i	HiFocus 160i	
I = 6 A (3 m / min)	R = 0,1	R = 0,1 R = 0,5 *DL R = -1,0	R = 0,1 R = 0,5 R = -1,0	
I = 10 A (3 m / min)	R = 0,1 R = 0,5 *DL	R = 0,1 R = 0,5 R = -1,0	R = 0,1 R = 0,5	R = 0,1 R = 0,5
I = 14 A (3 m / min)		R = 0,1 R = 0,5		
Schlagstempel		R = 0,1		

*DL = nur Durchläufer

Bild 25 Versuchsmatrix zur Durchführung von Ermüdungsversuchen plasmamarkierter Stahlbleche der SLV-Halle [16]

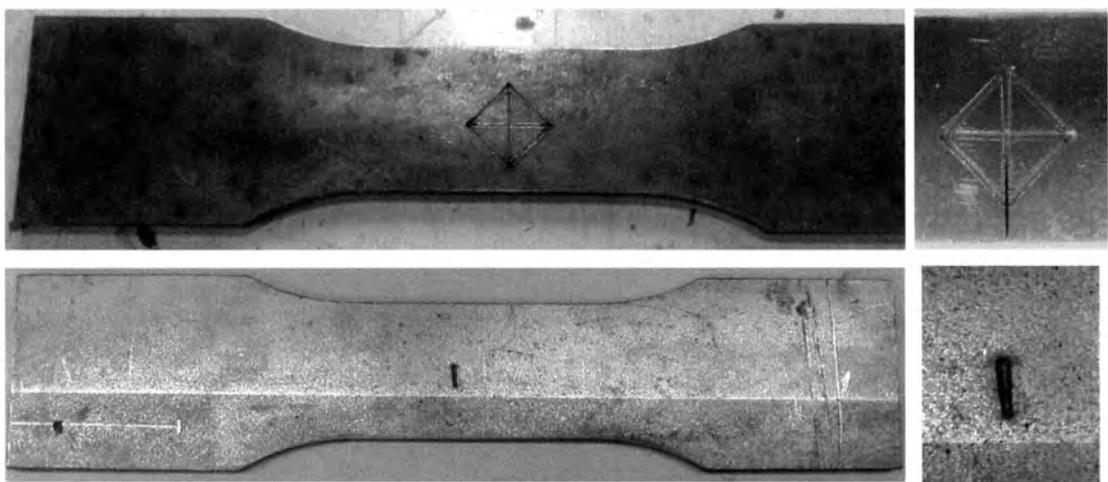


Bild 26 Beispielfotos von Prüfkörpern mit Plasmamarkierung (oben) und Schlagstempelung (unten) [16]

Die jeweiligen Oberspannungen der Ermüdungsversuche wurden im Laufe der Versuche iterativ festgelegt. Zunächst wurde für den jeweils ersten Versuch eine Oberspannung von $\sigma_o \geq 0,9 f_{y,meas}$ gewählt und dann je Versuch verringert bis ein Durchläufer erzeugt wurde.

Die Ergebnisse zeigten einen Einfluss der Plasmamarkierung auf die Ermüdungsfestigkeit. Diese ist im Wesentlichen abhängig von den beiden Markierparametern Stromstärke (A) und Markiergeschwindigkeit (m/min). Mit zunehmender Stromstärke bei gleichbleibender Markiergeschwindigkeit sinkt der Wert der Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechseln, siehe auch Bild 28.

Der nachteilige Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Stromstärke lässt sich durch die unterschiedlichen Einbrandtiefen infolge der Plasmamarkierung erklären, siehe Bild 27.

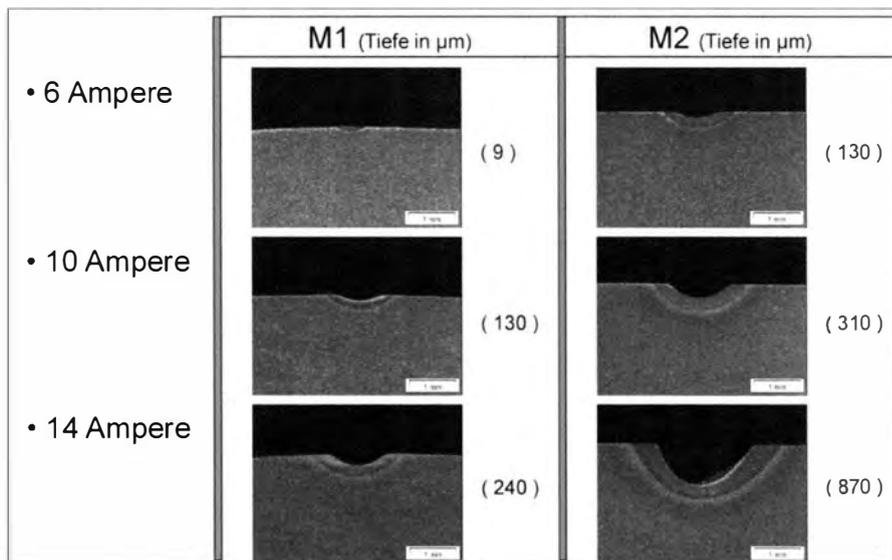


Bild 27 Markiertiefen infolge unterschiedlicher Plasmamarkierungen [16]

Den einzelnen Schliffbildern in Bild 27 ist deutlich zu entnehmen, dass sich die Markiertiefe mit unterschiedlich starker Stromstärke verändert. Gemessen wurden die Markiertiefen jeweils an zwei Punkten M1 und M2 der Kennzeichnungen. Punkt M1 stellt die Markiertiefe inmitten einer Markierlinie dar, die Punkte M2 liegen immer an Umkehr- bzw. Wendepunkten einer Markierung. Aufgrund der minimalen Verweildauer des Plasmamarkers stellte sich an diesen Punkten eine trotz gleicher Markierparameter größere Markiertiefe ein. Als Ergebnis der Untersuchungen wurden Markiertiefen zwischen 9 µm (6 Ampere, M1) und 870 µm (14 Ampere, M2) gemessen. Im Vergleich lagen die Eindringtiefen der Schlagstempelung zwischen 320 µm und 640 µm.

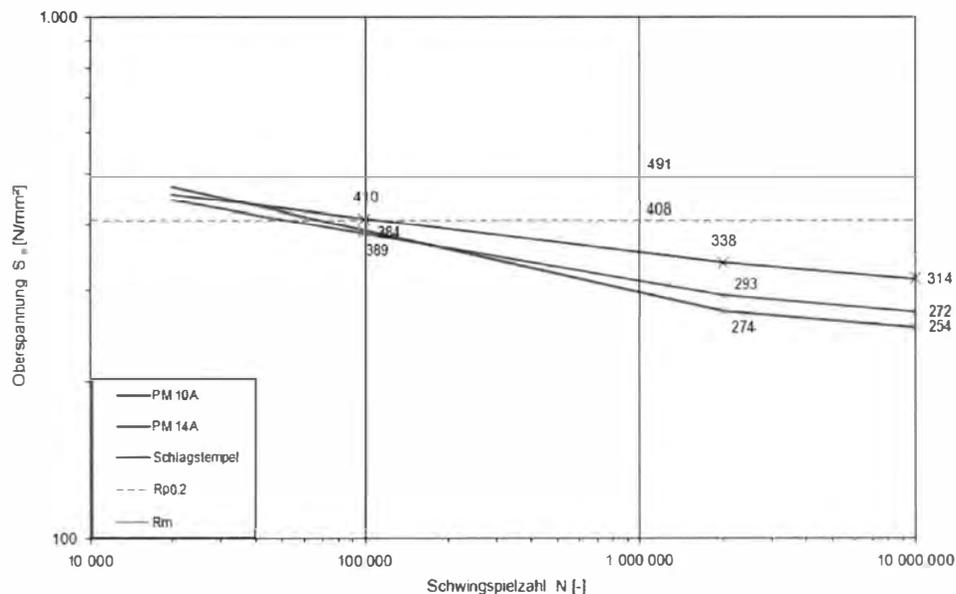


Bild 28 Wöhlerlinien, ermittelt an der SLV Halle mit unterschiedlichen Markierparametern [16]

Die Ergebnisse der SLV Halle zeigen, dass die Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Stromstärke der Plasmamarkierung abnimmt. Weiterhin zeigt die Stempelmarkierung trotz geringerer Eindringtiefe einen größeren negativen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit als die Versuchsserien mit der Plasmamarkierung. Auf der Basis der von der SLV Halle durchgeführten Untersuchungen wurde eine Kerbfallzuordnung von plasmamarkierten Bauteilen in die Ermüdungsfestigkeitsklasse FAT 125 nach IIW-Empfehlungen [17] empfohlen.

Neben den Ermüdungsversuchen wurden an der SLV Halle auch Untersuchungen zur Lesbarkeit von Plasmamarkierungen durchgeführt. Dabei wurden Plasmamarkierungen mit den zuvor untersuchten Stromstärken 6 A, 10 A und 14 A auf Bleche und Hohlprofile aufgebracht und anschließend durch verschiedene Bearbeitungsprozesse wie Beschichten oder Verzinken nachbehandelt. Nach einer Behandlung der Proben durch Strahlen und Beschichten waren die Zeichen der Plasmamarkierung nicht mehr lesbar. Bei einer Markierstromstärke von 10 Ampere war die Kennzeichnung nach dieser Behandlung nur noch in den Ansatz- und Umkehrpunkten der Markierung lesbar, vgl. Bild 29.

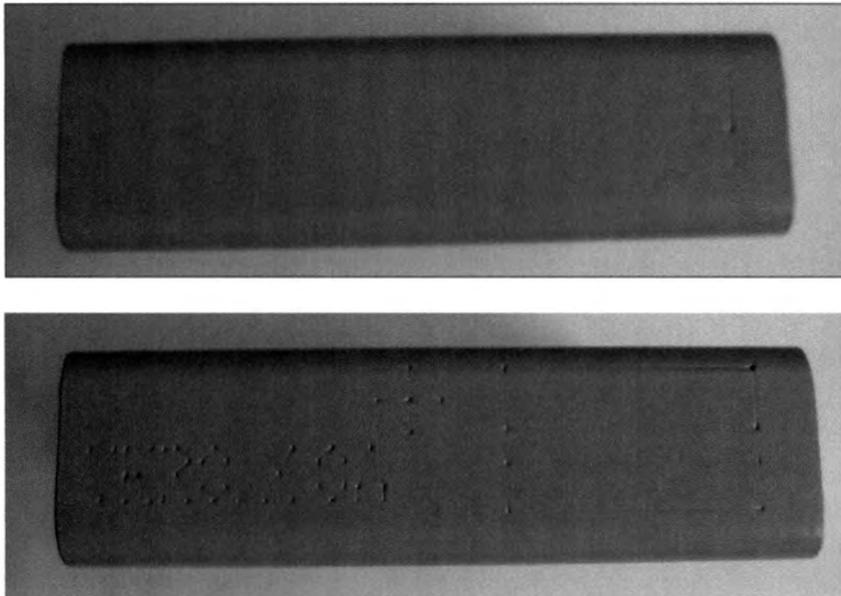


Bild 29 Sichtbarkeit von Plasmamarkierungen mit einer Markierstromstärke von 6 Ampere (oben) und 10 Ampere (unten) nach einer Behandlung durch Strahlen und Beschichten [16]

Nach einer Behandlung durch Feuerverzinken mit gemessenen Zinkschichtdicken von 100 bis 140 μm ließen sich die Kennzeichnungen bei einer Markierstromstärke von 6 Ampere nicht mehr entziffern, vgl. Bild 30. Bei einer Stromstärke von 10 Ampere war die Kennzeichnung hingegen noch lesbar.

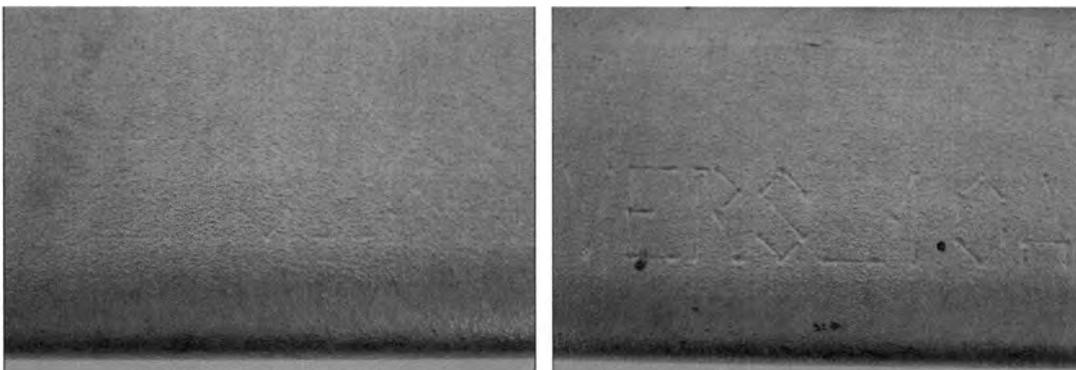


Bild 30 Sichtbarkeit von Plasmamarkierungen mit einer Markierstromstärke von 6 Ampere (links) und 10 Ampere (rechts) nach einer Behandlung durch Strahlen und Feuerverzinken [16]

Bei den vorgenannten Untersuchungen der SLV Halle wurden Blechdicken bis maximal 10 mm und Stahlsorten S355J2+N sowie S355J2H untersucht. Aufgrund der Ergebnisse stellt sich die Frage, inwieweit der Einfluss der Plasmamarkierung bei größeren, im Stahlbau üblichen, Blechdicken oder anderen Stahlsorten / Festigkeitsklassen zum Tragen kommt. Darüber hinaus stellt sich die Frage, wie sich andere dauerhafte Markiermethoden verhalten.

2.5.2 Voruntersuchungen am Institut für Metall- und Leichtbau

Das Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen hat im Rahmen von Voruntersuchungen zu diesem Forschungsvorhaben bereits Ermüdungsversuche an markierten (Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln) und unmarkierten Versuchskörpern durchgeführt.

2.5.2.1 Versuchsprogramm

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden die vier dauerhaften Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln untersucht. Hierzu wurden Ermüdungsversuche an Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2+N, Blechdicke $t = 15$ mm (unmarkiert, Fräsen und Hartstempelung) sowie S235JR+N, S235J2+N, S235J2C+N und S460N, Blechdicken $t = 10, 12, 15$ und 30 mm (Nadeln) durchgeführt. Darüber hinaus wurden Prüfkörper der Stahlsorte S235JR+AR und S355J2G3+N, Blechdicke $t = 15$ mm (Plasmamarkieren) untersucht, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1 Versuchsprogramm im Rahmen von Voruntersuchungen am IML

Markierung	Stahlsorte	Anzahl der Prüfkörper	Blechdicke t [mm]
Unmarkiert	S355J2+N	2	15
Fräsen		12	
Hartstempelung		10	
Nadeln	S235JR+N	1	16
	S235J2+N	1	12
	S235J2C+N	2	10
	S235J2C+N	1	12
	S355J2+N	1	30
	S460N	2	15
Plasmamarkierung Eiffel	S355J2G3+N	10	15
Plasmamarkierung RSB	S235JR+AR	7	15

2.5.2.2 Versuchskörper

Die Prüfkörper wurden in Anlehnung an Flachzugproben in der mechanischen Werkstatt der Universität Duisburg-Essen mittels Wasserstrahlschnitt hergestellt, siehe Bild 31. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass Aufhärtungen im Bereich der Schnittkanten infolge thermischer Schneidprozesse vermieden wurden und somit kein zusätzlicher Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit gegeben war.

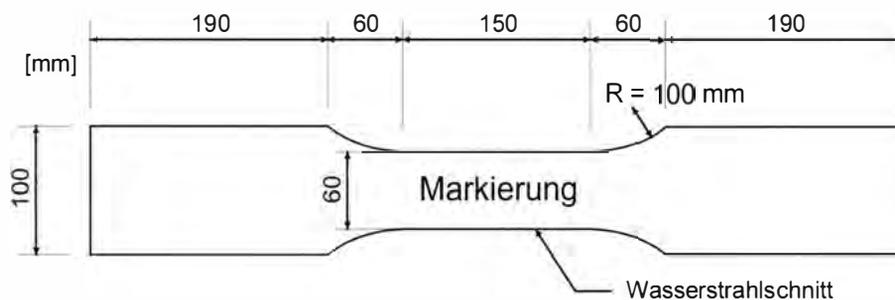


Bild 31 Prüfkörpergeometrie der Voruntersuchungen

Die für die Voruntersuchungen erforderlichen Stahlbleche wurden von der Firma Goldbeck Bauelemente Treuen GmbH, Treuen sowie der Firma Eiffel Deutschland Stahltechnologie, Hannover, zur Verfügung gestellt. Hierbei hat Eiffel Deutschland das Material mit bereits vorhandenen Nadelmarkierungen aus der laufenden Produktion zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund ergaben sich die

unterschiedlichen Blechdicken im Rahmen dieser Voruntersuchungen. Die Firma Goldbeck hat das Material für die weiteren Markiermethoden zur Verfügung gestellt und zugleich die Fräsmarkierung auf den Blechen installiert. Die Hartstempelung der Prüfkörper erfolgte durch die Firma Voortmann Automatisierung BV, Rijssen, Niederlande. Die beiden plasmamarkierten Serien wurden von den Firmen Eiffel Deutschland und Rudolstädter Systembau zur Verfügung gestellt. Abnahmeprüfzeugnisse 3.1 nach DIN EN 10204 [18] lagen für alle verwendeten Materialien vor.

Im Rahmen der Voruntersuchungen sollte für die plasmamarkierten Serien der Unterschied verschiedener Stromstärken auf die ertragbaren Lastwechselzahlen ermittelt werden. Da alle plasmamarkierten Versuchskörper auf dem gleichen Lastniveau getestet wurden, konnten keine Wöhlerlinien ermittelt werden. Vielmehr sollte im Rahmen der Voruntersuchungen für plasmamarkierte Versuchskörper der Einfluss unterschiedlicher Markierparameter verdeutlicht werden. Für die restlichen Markiermethoden wurden Wöhlerlinien und Ermüdungsfestigkeiten ermittelt. Die Markierungen für die Methoden Stempeln, Fräsen und Nadeln sollten in Größe und Form möglichst identisch sein, so dass gleiche Ausgangsvoraussetzungen vorlagen und der Einfluss der Markiermethoden auch untereinander bewertbar war. Hierzu wurde eine entsprechende Buchstaben- und Zahlenkombination gewählt, siehe Bild 32. Diese konnte allerdings nur bei den hartgestempelten Versuchskörpern umgesetzt werden, da die nadelmarkierten Bleche direkt aus der laufenden Produktion entnommen wurden und der Einrichtungsaufwand für eine mehrreihige Fräsmarkierung bei einer geringen Stückzahl von zehn Prüfkörpern für die ausführende Firma zu groß gewesen wäre. Für die Fräsmarkierung wurde daher der Schriftzug „Universitaet Duisburg-Essen“ mit den in der Fertigung bereits vorhandenen Parametern eingebracht.

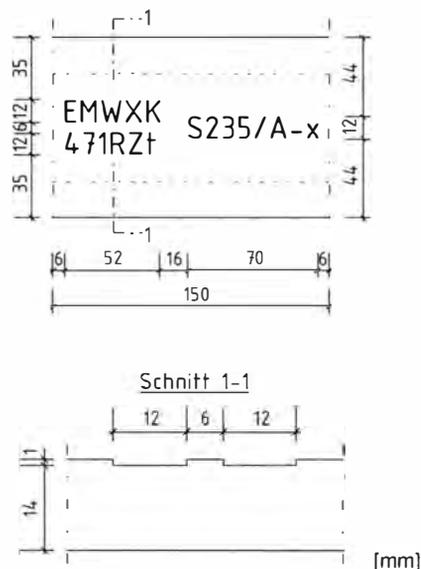
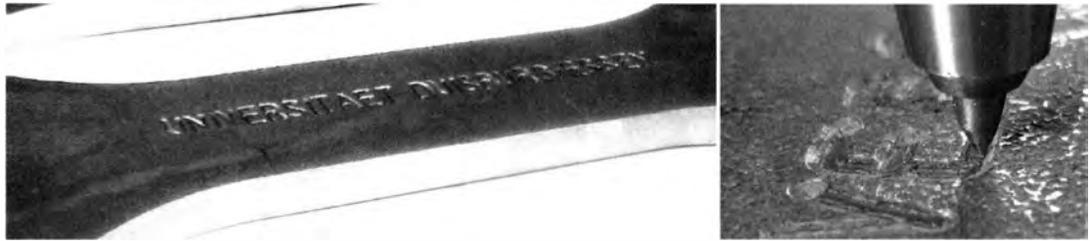


Bild 32 Beispiel einer einheitlichen Kennzeichnungssystematik

Die entsprechenden Prüfkörper sind beispielhaft in Bild 33 und Bild 34 dargestellt. Für eine bessere Einordnung der Ergebnisse untereinander wurden die Markiertiefen am Institut für Metall- und Leichtbau gesondert vermessen. Die gemessenen Markiertiefen sind ebenfalls Bild 33 und Bild 34 zu entnehmen.

Fräsen – Kennzeichnungstiefe: ~ 0,2 – 0,3 mm



Hartstempelung – Kennzeichnungstiefe: ~ 0,5 – 1,2 mm



Nadeln – Kennzeichnungstiefe: ~ 0,15 – 0,3mm



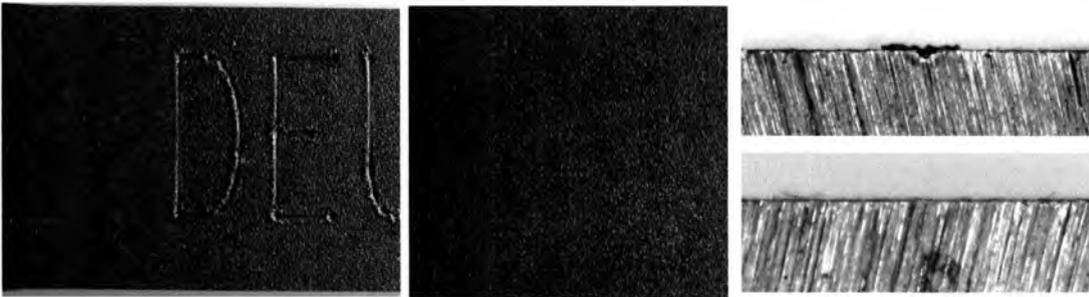
Bild 33 Prüfkörper mit Oberflächenkennzeichnungen Fräsen, Hartstempeln und Nadeln und Angabe der Kennzeichnungstiefe

Sowohl die gefrästen als auch die genadelten Markierungen zeigten insgesamt sehr geringe Markiertiefen zwischen 0,15 mm und 0,3 mm. Die durch hartes Stempeln markierten Versuchskörper zeigten im Rahmen dieser Untersuchungen die größten Markiertiefen von bis zu 1,2 mm. Darüber hinaus waren die Streuungen innerhalb der Schlagstempelkennzeichnungen mitunter am größten. Dies lässt sich vor allem auf die am wenigsten definierten Markierparameter zurückführen. Während sich sowohl bei stationären und mobilen Nadelmarkiergeräten als auch bei entsprechenden Frässtationen die Markierparameter sehr genau einstellen lassen, kann es bei einer herkömmlichen Schlagstempelung eher zu Streuungen kommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass, im Gegensatz zu Nadelmarkierungen, oft mehrere Zeichen gleichzeitig markiert werden. Dies erschwert eine optimale Ausrichtung der entsprechenden Stempelpistole, siehe Kapitel 2.2.2.

Die in Bild 34 exemplarisch dargestellten Plasmamarkierungen zeigten ebenfalls starke Unterschiede zwischen den beiden Serien. Während die Markiertiefe der Serie Plasma Eiffel bei einer Markierstromstärke von 20 A lediglich bei 0,3 mm lag, lieferte die Serie Plasma RSB bei einer Markierstromstärke von 15 A eine Markiertiefe von 0,8 mm. Die Unterschiede lassen sich hier vor allem auf die Kennzeichnungsgeometrie zurückführen. Während in der Serie Plasma Eiffel die Markierzeichen relativ große Buchstaben darstellten, wurden die Prüfkörper der Serie Plasma RSB mit relativ kleinen und filigranen Zeichen markiert. Aufgrund der maschinenbedingten Trägheit des Plasmamarkiergerätes ergaben sich bei diesen kleinen Zeichen bei theoretisch gleicher Markiergeschwindigkeit mehr Haltezeiten als es bei langgezogenen Markierbuchstaben der Fall ist. Es entstehen dadurch systembedingt deutlich mehr Umkehrpunkte und somit auch insgesamt tiefere Markierungen. Schaut

man sich dagegen die durchgezogenen Linien der mit 15 A markierten Versuchskörper der Serie Plasma RSB an, fällt auf, dass die Tiefe des Einbrands deutlich geringer ausfällt und die Markiertiefe an diesen Linien insgesamt kleiner ist als bei den Proben der Serie Plasma Eiffel, welche mit 20 A markiert wurden. Dies zeigt, dass beim Plasmamarkieren neben den Markierparametern Stromstärke und Markiergeschwindigkeit auch die Angabe und Wahl der Kennzeichnungsgeometrie entscheidenden Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben kann.

Plasma Eiffel – Kennzeichnungstiefe: 20 A ~ 0,3 mm | 15 A ~ 0,0 mm



Plasma RSB – Kennzeichnungstiefe: 15 A ~ 0,8 mm | 5 A ~ 0,3 mm



Bild 34 Plasmamarkierte Prüfkörper (links) und Darstellung von Makroschliffen (rechts) mit Angabe der Kennzeichnungstiefe

Die Prüfkörper wurden in den institutseigenen servohydraulischen Pulsatoren der Firma Schenck mit statischen Nennkapazitäten von 1,0 MN bzw. 1,6 MN ermüdungsbelastet. Die Versuche wurden mit konstanter Ober- und Unterspannung und einem Grenzspannungsverhältnis von $R = 0,1$ durchgeführt. Dabei wurden die gestempelten, gefrästen und genadelten Versuchskörper auf unterschiedlichen Lastniveaus getestet, um Wöhlerlinien ermitteln zu können. Die plasmamarkierten Versuchskörper wurden je Serie auf den gleichen Lastniveaus getestet, um den Einfluss der verschiedenen Markierstromstärken ohne zusätzlicher Einflussparameter zu ermitteln.

2.5.2.3 Versuchsergebnisse

In den Tabellen 2 bis 5 sind die Versuchsparameter und Ergebnisse der Ermüdungsversuche im Rahmen der Voruntersuchungen dargestellt. Die unmarkierten Versuchskörper zeigten bei einer vergleichsweise hohen Oberspannung von 90 % der nominellen Streckgrenze bzw. einer Oberspannung von 60 % der nominellen Streckgrenze bis zu einer Lastwechselzahl von fünf Millionen kein Versagen.

Hartes Stempeln und Fräsen

Die Ermüdungsversuche resultierten bei den gefrästen und gestempelten Versuchskörpern erst bei sehr geringen Lastniveaus von 40 % respektive 30 % der nominellen Streckgrenze in Durchläufern. Alle weiteren Versuchskörper dieser beiden Serien zeigten Rissausgänge an der Markierung, welche schließlich zum Bruch führten. Die Bruchbilder exemplarischer Versuchskörper sind in Bild 35 dargestellt.

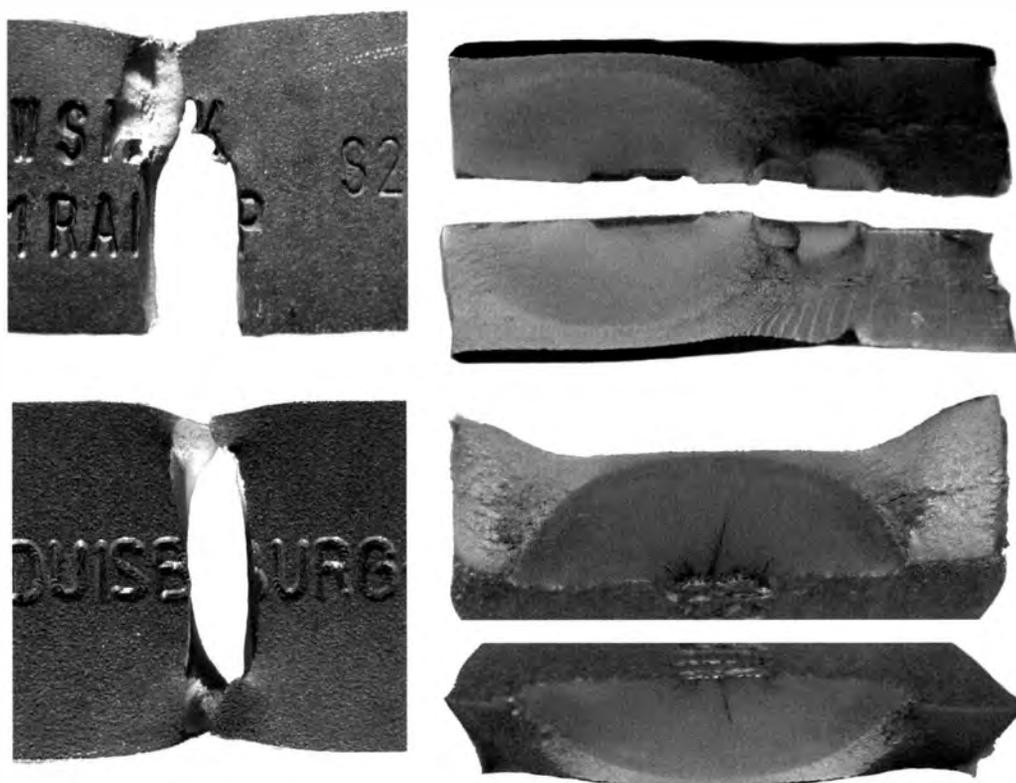


Bild 35 Bruchbild (links) und Bruchflächen (rechts) von mittels Schlagstempelung (oben) und Fräsen (unten) markierten Stahlproben

Der Rissausgang von der Markierung und die resultierende Ermüdungsbruchfläche sind klar zu erkennen. Darüber hinaus wird aus Tabelle 2 klar ersichtlich, dass mit zunehmender Belastung die Lastwechselzahlen erwartungsgemäß sinken.

Tabelle 2 Versuchsergebnisse der gefrästen und gestempelten Versuchskörper

Versuch-Nr.	$\sigma_o / f_{y,nom}$	σ_o [N/mm ²]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	LW [-]
Unmarkiert – Anzahl der Prüfkörper: 2				
A1	0,90	320	288	(DL) 5.000.000
A2	0,60	213	192	(DL) 5.000.000
Fräsen – Anzahl der Prüfkörper: 12				
B1	0,90	320	288	206.422
B7	0,90	320	288	278.641
B6	0,83	293	264	320.631
B11	0,83	293	264	365.550
B3	0,75	266	240	569.842
B10	0,75	266	240	492.449
B5	0,68	240	216	708.400
B9	0,68	240	216	527.644
B2	0,60	213	192	915.440
B8	0,60	213	192	914.122
B12	0,50	178	160	1.604.257
B4	0,40	142	128	(DL) 5.000.000
Hartes Stempeln – Anzahl der Prüfkörper: 10				
C1	0,90	320	288	107.144
C9	0,90	320	288	105.163
C4	0,83	293	264	148.666
C3	0,75	266	240	219.354
C8	0,68	240	216	353.426
C5	0,60	213	192	557.230
C6	0,50	178	160	929.627
C10	0,50	178	160	913.098
C7	0,40	142	128	2.329.023
C2	0,30	107	96	(DL) 5.000.000
<ul style="list-style-type: none"> ▪ $t = 15 \text{ mm}$ ▪ $R = 0,1$, Belastungsfrequenz: 7 – 12 Hz ▪ $f_{y,nom} = 355 \text{ N/mm}^2$, $R_{eH} = 395 \text{ N/mm}^2$, $R_m = 535 \text{ N/mm}^2$ gemäß Abnahmeprüfzeugnis 3.1 				

Nadelmarkierung

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der nadelmarkierten Versuchskörper zusammengefasst. Trotz relativ hoher Ermüdungsbeanspruchung konnte lediglich bei zwei der acht Versuchskörper ein Bruch erzeugt werden. Alle restlichen Versuchskörper erreichten eine Lastwechselzahl von fünf Millionen ohne Bruch. Daraufhin wurden die Versuche beendet und die Prüfkörper als Durchläufer gewertet. Die beiden gerissenen Versuchskörper zeigten bei einer hohen Oberspannung (σ_o) von 119 % bzw. 90 % der nominellen Streckgrenze ein Versagen nach 557.602 bzw. 300.620 Schwingspielen. Bei beiden Versuchskörpern ging hier der Riss von der genadelten Markierung aus, siehe auch Bild 36. Die Ergebnisse zeigen, dass im Rahmen dieser

Voruntersuchung ein Einfluss einer Nadelmarkierung auf die Ermüdungsfestigkeit als sehr gering einzustufen ist. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sollte aber aufgrund der verschiedenen Materialien, Blechdicken und unterschiedlicher Markierparameter als eingeschränkt betrachtet werden. Nichtsdestotrotz spiegeln die vorhandenen Versuchskörper die Realität einer Nadelmarkierung in der Stahlbaupraxis sehr gut wider.

Tabelle 3 Versuchsergebnisse der genadelten Versuchskörper

Versuch-Nr.	Stahlsorte	t [mm]	Beschriftung	$\sigma_o / f_{y,nom}$	σ_o / R_{eH} [%]	σ_o [N/mm ²]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	LW [-]
D1	S235J2C+N	10	quer	0,90	0,67	212	190	DL
D2	S235J2C+N	10	quer	1,21	0,90	284	256	DL
D5	S235J2C+N	12	längs	0,90	0,67	212	190	DL
D13	S235J2+N	12	quer	0,90	0,75	212	190	DL
D12	S235JR+N	16	quer	1,19	0,90	279	251	557.602
D9	S355J2+N	30	quer	0,60	0,50	212	190	DL
D14	S460N	15	längs	0,90	0,85	414	373	300.620
D15	S460N	15	längs	0,80	0,76	368	331	DL

- R = 0,1
- Belastungsfrequenz: 9 – 12 Hz
- DL = Durchläufer (5.000.000 LW)

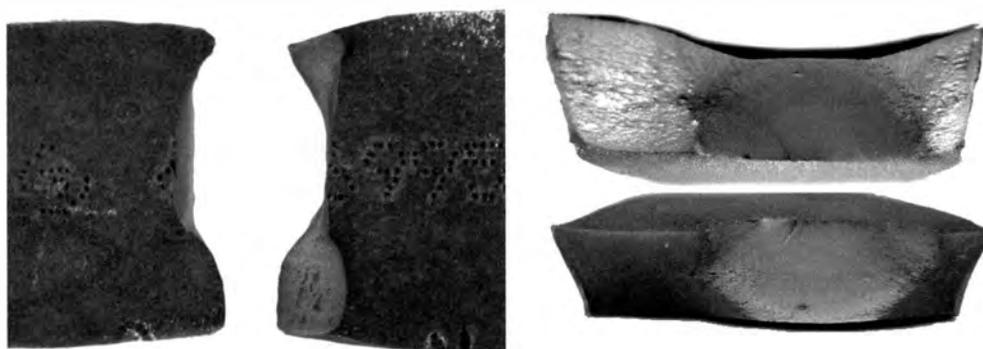


Bild 36 Bruchbild (links) und Bruchflächen (rechts) einer mittels Nadelmarkierung markierten Stahlprobe

Plasmamarkierung Eiffel

Die Ergebnisse der Versuchskörper der Serie Plasma Eiffel sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Versuchskörper der Serie Plasma Eiffel wurden einerseits mit unterschiedlichen Stromstärken markiert, andererseits wurde die Hälfte der Versuchskörper längs zur Walzrichtung markiert, die andere Hälfte quer zur Walzrichtung. Die längs zur Walzrichtung markierten Versuchskörper zeigten, dass sich mit abnehmender Stromstärke deutlich größere Lastwechselzahlen ergeben. Während die Markierung des Versuchskörpers E1-L (15 A) deutlich zu erkennen ist, lässt sich die Markierung des Versuchskörpers E5-L (4 A) mit bloßem Auge nur erahnen, siehe auch Bild 34. Einige Unregelmäßigkeiten innerhalb der Versuchsergebnisse zeigten sich bei den quer zur Walzrichtung markierten Versuchskörpern. Bei den Versuchskörpern E9-Q (7 A) und E10-Q (4 A), beide mit relativ schwacher Stromstärke markiert, versagten die Proben im Bereich der Ausrundung zwischen Einspannbereich und verjüngter Markierzone, wie in Bild 37 zu erkennen ist. In

diesem Bereich sind die Spannungen generell höher als im verjüngten Markierbereich. Hinzu kommt, dass die Geometrie fertigungsbedingt in diesem Bereich den größten Streuungen unterliegt und die Plasmamarkierung dieser Serie bis in den Übergangsbereich reichte. Dies erklärt, warum im Laufe der Ermüdungsversuche dieser Prüfkörper im Vergleich zu den längs zur Walzrichtung markierten Versuchskörpern keine Durchläufer erzeugt werden konnten. In Bild 34 ist des Weiteren zu erkennen, dass der Rissausgang des Prüfkörpers E9-Q nicht von der Plasmamarkierung sondern von einer Fehlstelle im Material ausgegangen ist. Der Riss des Versuchskörpers E10-Q ist ebenfalls vom Grundmaterial ausgegangen. Für diese beiden Versuche lässt sich somit keine konkrete Aussage über den Einfluss der Ermüdungsfestigkeit infolge der Plasmamarkierung treffen, außer, dass mit der Markierung mindestens die angegebenen Lastwechsel erreicht wurden. Da bereits der Versuchskörper E8-Q (10 A) als Durchläufer eingestuft werden konnte, kann die Annahme getroffen werden, dass auch die Prüfkörper E9-Q und E10-Q fünf Millionen Schwingspiele infolge der Plasmamarkierung hätten erreichen können.

Tabelle 4 Versuchsergebnisse der Versuchsserie Plasma Eiffel

Probennr.	Zustand	min. Amp.	max. Amp.	Ø Amp.	σ_{max} / f_y	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	LW [-]	Bruch
Längs zur Walzrichtung markiert								
E1-L	Plasma	15	25	20	0,75	239,6	249.213	Markierung
E2-L		12	22	17			697.084	Markierung
E3-L		10	20	15			1.311.997	Markierung
E4-L		7	17	12			5.065.775	Durchläufer
E5-L		4	15	9,5			5.000.000	Durchläufer
Quer zur Walzrichtung markiert								
E6-Q	Plasma	15	25	20	0,75	239,6	302.870	Markierung
E7-Q		12	22	17			468.273	Markierung
E8-Q		10	20	15			*6.011.567	Durchläufer
E9-Q		7	17	12			988.419	Grundmaterial
E10-Q		4	15	9,5			2.017.500	Grundmaterial
<ul style="list-style-type: none"> ▪ t = 15 mm ▪ $f_{y,nom} = 355 \text{ N/mm}^2$; $R_{eH} = 385 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 537 \text{ N/mm}^2$ (Prüfzeugnis) ▪ *fehlerhaft eingestellte Grenze. Daher 6.011.567 statt 5.000.000 LW 								

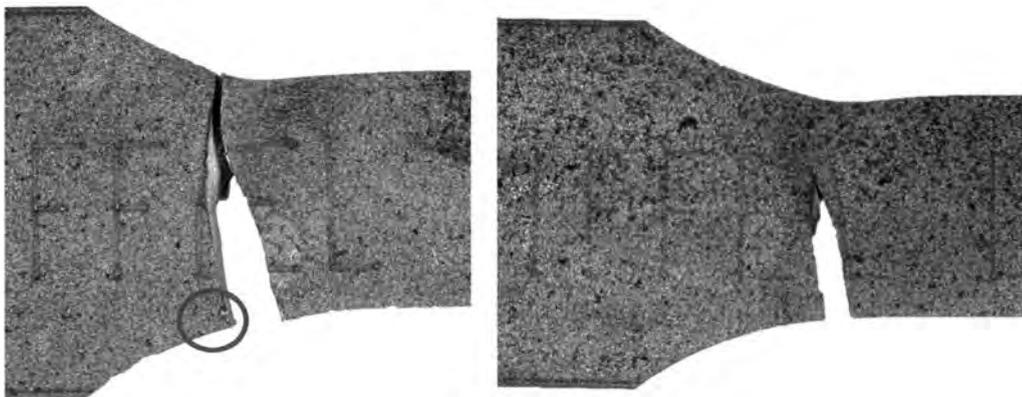


Bild 37 Bruchbilder der Versuchskörper E9-Q (links) und E10-Q (rechts) der Serie Plasma Eiffel

Plasmamarkierung RSB

Die Ergebnisse der Versuchsserien Plasma RSB sind in Tabelle 5 dargestellt. Alle Versuchskörper versagten während der Versuche mit einem Rissausgang in der Markierung. Mit einer Ausnahme steigen die Lastwechselzahlen mit abnehmender Stromstärke. Eine Erklärung für die geringen Lastwechselzahlen des Prüfkörpers P-04-10A könnte ein Rissfortschritt mit mehreren Risskeimen innerhalb eines Querschnitts sein, siehe Bild 38.



Bild 38 Bruchbilder (links) und Bruchfläche (rechts) des Versuchsbauteils P-04-10A

Neben einem Effekt der veränderten Stromstärke lässt sich auch ein Einfluss der Markiergeschwindigkeit in den Ergebnissen erkennen. Die Prüfkörper P-05-08A und P-06-08A wurden beide mit einer Markierstromstärke von 8 A jedoch mit unterschiedlicher Markiergeschwindigkeit gekennzeichnet. Infolge der höheren Markiergeschwindigkeit, die zu geringeren Einbrandtiefen geführt hatte, hat Prüfkörper P-06-08A mehr Lastwechsel durchlaufen.

Tabelle 5 Versuchsergebnisse der Versuchsserie Plasma RSB

Probennr.	Zustand	Amp.	s [m/min]	$\sigma_{\max} /$ f_y	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	LW [-]	Bruch
P-01-15A	Plasma	15	6,35	0,90	190,4	607.203	Markierung
P-02-13A		13	3,81			788.707	Markierung
P-03-11A		11	6,35			1.067.457	Markierung
P-04-10A		10	6,35			622.472	Markierung
P-05-08A		8	3,81			1.375.604	Markierung
P-06-08A		8	6,35			1.570.360	Markierung
P-07-05A		5	3,81			1.614.782	Markierung

- t = 15 mm
- $f_{y,nom} = 235 \text{ N/mm}^2$; $R_{eH} = 271 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 426 \text{ N/mm}^2$ (Prüfzeugnis)
- Versuchsbauteil P-04-10A Ausreißer

Versuchsauswertung

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen sind in Form eines Wöhlerdiagramms in Bild 39 aufgetragen. Eine sinnvolle Auswertung in Form von Wöhlerlinien lässt sich allerdings lediglich für die gefrästen und gestempelten Versuchsserien ermitteln. Die Wöhlerlinien wurden gemäß DIN EN 1993-1-9 statistisch als 95 %-Fraktile für Überleben mit 75 % Vertrauenswahrscheinlichkeit ermittelt. Die Berechnung erfolgte auf Basis des Hintergrundberichts zum Eurocode 3 [19].

Die Ermüdungsfestigkeit der gefrästen Versuchskörper ergibt sich aufgrund der durchgeführten Ergebnisse zu $\Delta\sigma_c = 137 \text{ N/mm}^2$. Die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit der gestempelten Versuchskörper stellt sich bei einer Auswertung der Ergebnisse mit einer festen Wöhlerlinienneigung von $m = 3,0$ als größer dar als bei den gefrästen Versuchskörpern. Der Wert der Ermüdungsfestigkeit liegt dann bei $\Delta\sigma_c = 103 \text{ N/mm}^2$.

Aufgrund der geringen Anzahl, des gutmütigen Verhaltens und der großen Anzahl an Durchläufern der genadelten Versuchskörper konnte für diese Serie keine Wöhlerlinie ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass sich aufgrund der vorliegenden Ergebnisse eine relativ hohe Kerbfallklasse ermitteln ließe.

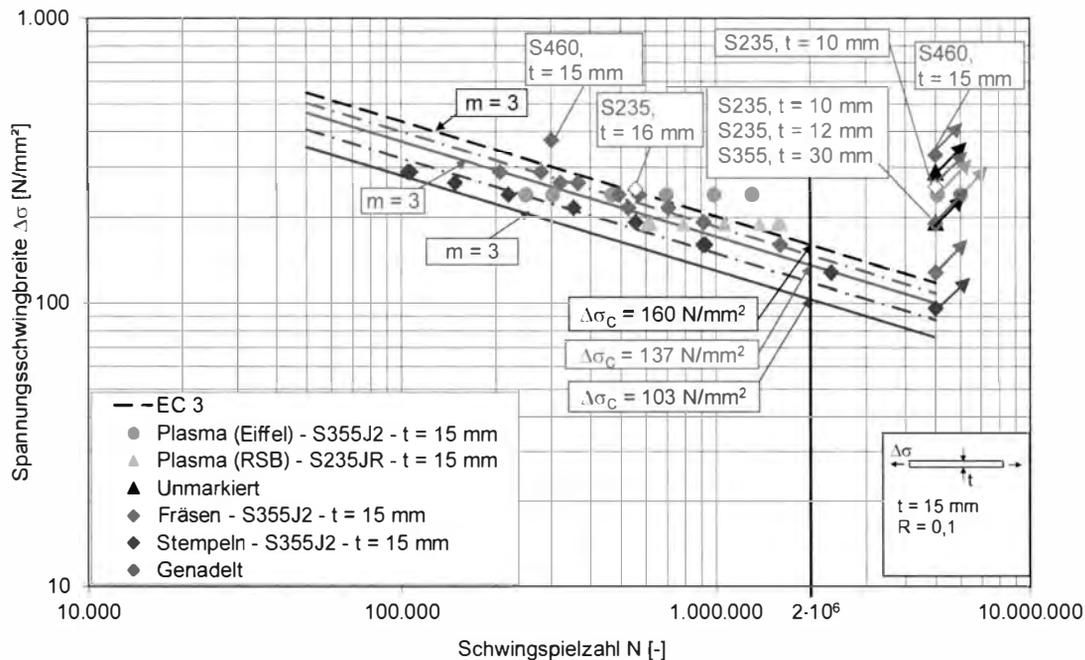


Bild 39 Ergebnisse der Ermüdungsversuche aus Voruntersuchungen

Für die beiden plasmamarkierten Versuchsserien lassen sich ebenfalls keine Wöhlerlinien ermitteln, da alle Versuchskörper mit unterschiedlichen Parametern hergestellt wurden und je Serie auf einem Lastniveau getestet wurden.

Dennoch liefern die im Wöhlerdiagramm aufgetragenen Ergebnisse der plasmamarkierten Serien wertvolle Erkenntnisse. Die Ergebnisse zeigen, dass jeweils die plasmamarkierten Versuchskörper mit den geringsten Lastwechselzahlen geringfügig mehr Lastwechsel erreichen als vergleichbar belastete gestempelte Versuchskörper. Somit lässt sich die Tendenz erkennen, dass die plasmamarkierten Versuchskörper, markiert mit den in den Voruntersuchungen höchsten Stromstärken, auf einem ähnlichen Niveau liegen wie die gestempelten Versuchskörper.

2.5.3 Zusammenfassung

Die im Rahmen einer Voruntersuchung zu diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Untersuchungen am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen zeigen wie erwartet, dass infolge der verschiedenen Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln die Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit von der Geometrie der installierten Kerben abnimmt. Die Rissausgänge und somit auch die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit sind eindeutig auf die materialverändernden Kerben der Markiermethoden zurückzuführen. Die Höhe der Abnahme der Ermüdungsfestigkeit ist dabei auch von der gewählten Markiermethode abhängig.

Während sich die genadelten Versuchskörper als sehr gutmütig erweisen und fast ausschließlich Durchläufer erzeugt werden konnten, können bei den gefrästen und gestempelten Versuchsserien erst bei sehr geringen Spannungsschwingbreiten

Durchläufer festgestellt werden. Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit beläuft sich hier für die gestempelten aus S355J2+N hergestellten Versuchskörper als 95%-Fraktilwert auf $\Delta\sigma_{c,95\%} = 103 \text{ N/mm}^2$.

Sowohl die Ergebnisse der SLV Halle als auch die des Instituts für Metall- und Leichtbau dokumentieren zudem, dass ebenfalls plasmamarkierte Bauteile einem Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit unterliegen. Mit zunehmender Stromstärke und somit auch zunehmender Markiertiefe sinkt die Zahl der ertragbaren Lastwechsel teilweise deutlich.

Effekte aus einem möglichen Blechdickeneinfluss bewirken unter Umständen eine weitere Reduzierung der Ermüdungsfestigkeit. Diese konnten allerdings mit den Voruntersuchungen nicht erfasst werden. Daher stellt sich die Frage, wie sich markierte Bauteile gleicher und größerer Blechdicken verhalten und inwieweit ein Einfluss der Stahlsorte auf die Ermüdungsfestigkeit markierter Bauteile vorhanden ist.

2.6 Zusammenfassung

Für die dauerhafte Kennzeichnung von Stahlbauteilen werden, neben weiteren Methoden, insbesondere Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren sowie Nadeln eingesetzt, welche sich in Produktions- und Fertigungsstraßen einbinden lassen. Neben den Vorteilen im Hinblick auf eindeutige und vor allem dauerhafte Identifizierbarkeit von Bauteilen sowie der Sicherheit gegen Fälschungen oder Verwechslungen resultieren aus dem Markierprozess jedoch Oberflächenkerben, welche einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der markierten Bauteile haben können. Aus diesem Grund ist der Einsatz von dauerhaften Kennzeichnungen in ermüdungsbeanspruchten Bereichen oder Bauteilen gemäß einschlägiger Normen für den Stahlbau verboten, wohingegen teilweise explizit harte Kennzeichnungsmethoden gefordert werden, was einen Widerspruch darstellt und die Frage nach der Ausführbarkeit aufwirft.

Der Einfluss von aus dem Markierprozess resultierenden Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen wurde bisher nicht hinreichend untersucht. In [16] wurde der Einfluss des Plasmamarkierens mit unterschiedlichen Stromstärken auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen ermittelt. Das Versuchsprogramm umfasste Blechdicken bis zu 10 mm. Auf Basis der Auswertung der Ergebnisse wurde eine Kerbfallklasse für plasmamarkierte Versuchskörper von 125 empfohlen.

Der Einfluss der vier dauerhaften Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln wurde zudem am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen an unterschiedlichen Blechdicken zwischen 10 mm und 15 mm und Stahlsorten S235 und S355 untersucht. Weiterhin wurde je ein genadelter Versuchskörper der Blechdicke 30 mm sowie der Stahlsorte S460 Ermüdungsversuchen unterzogen. Die Ergebnisse zeigten einen deutlichen Einfluss der Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren auf die Ermüdungsfestigkeit der gekennzeichneten Bauteile. Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit lagen bei $\Delta\sigma_{c,95\%} = 103 \text{ N/mm}^2$ (Hartes Stempeln) und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 137 \text{ N/mm}^2$ (Fräsen). Die Versuche mit nadelmarkierten Versuchskörpern produzierten trotz hoher Ermüdungsbeanspruchung größtenteils Durchläufer. Für die plasmamarkierten Versuchskörper wurde der Einfluss unterschiedlicher Stromstärken auf das Ermüdungsverhalten untersucht. Die

erzielten Lastwechselzahlen nahmen mit zunehmender Markierstromstärke und somit tieferen Markierkerben stetig ab.

Der Einfluss von Blechdicken größer als 15 mm sowie von Stahlsorten mit Festigkeiten über 355 N/mm^2 wurde bisher nicht umfassend untersucht.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Das Ermüdungsverhalten von mittels Hartem Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren oder Nadeln markierten Versuchskörpern soll mithilfe von Ermüdungsversuchen ermittelt werden. Ziel der Untersuchungen ist die Ermittlung des Einflusses der vier Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit markierter Prüfkörper unter Berücksichtigung der beiden Stahlsorten S355J2 und S460N sowie der drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm.

Das Versuchsprogramm, welches am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen durchgeführt wurde, wird im Folgenden näher erläutert. Weiterhin werden die Materialbeschaffenheit, die Geometrie sowie die Fertigung der untersuchten Versuchskörper erörtert. Hierbei werden im Speziellen die durchgeführten Zugversuche mit entsprechenden Materialkennwerten aus den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 verglichen. Darüber hinaus werden die auf die Versuchskörper eingebrachten Markierkerben näher charakterisiert. Mithilfe von 3-D Modellen, erstellt mit einem Mikroskop, wurden die unterschiedlichen Geometrien der durch den Markierprozess verursachten Kerben vermessen. Im Weiteren werden die durch Ermüdungsversuche ermittelten Ergebnisse für die vier Kennzeichnungsmethoden erörtert.

3.2 Versuchsprogramm

Das im Rahmen des Forschungsvorhabens angestrebte Versuchsprogramm ist in Tabelle 6 dargestellt. Das Versuchsprogramm ist unterteilt in die vier Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln, drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm sowie zwei Stahlsorten S355J2 und S460N. Je Versuchsserie war ein Prüfumfang von zehn Versuchskörpern geplant.

Tabelle 6 Versuchsprogramm

Anzahl	Stahlgüte	Markiermethode	Blechdicke [mm]	R [-]
10	S355J2/ S460N	Stempeln	15	0,1
10			25	
10			40	
10		Fräsen	15	
10			25	
10			40	
10		Plasma	15	
10			25	
10			40	
10		Nadeln	15	
10			25	
10			40	

In Abhängigkeit der Stahlorte, Markiermethode und Blechdicke des Grundmaterials ergibt sich die in Tabelle 7 dargestellte Systematik zur Kennzeichnung der Versuchsserien und -körper.

Tabelle 7 System zur Kennzeichnung der Versuchsserien und -körper

"355-15-St-01"			
(1)	(2)	(3)	(4)
Stahlsorte	Blechdicke	Markiermethode	laufende Nr.
S355J2: 355 S460N : 460	15 mm: 15 25 mm: 25 40 mm: 40	Hartes Stempeln: St Fräsen: Fr Plasmamarkieren: Pl Nadeln: Na	1 bis 10

3.3 Versuchskörper

3.3.1 Allgemeines

Die Geometrie der Versuchskörper ist in Bild 40 dargestellt. Die Versuchskörper haben jeweils eine Länge von 650 mm und eine Breite von 100 mm. Im Bereich der Markierung wurden die Versuchskörper auf eine Breite von 60 mm verjüngt. Aufgrund der großen Belastung im Bereich der Einspannung der Maschine durch den aufgetragenen Querdruck war das Risiko eines Bruchs in diesem Bereich relativ hoch. Mit der Verjüngung der Versuchskörper sollte ein Bruch im Bereich der Einspannung vermieden werden. Die Markierung sollte möglichst zentriert in dem verjüngten Bereich des Versuchskörpers angeordnet werden.

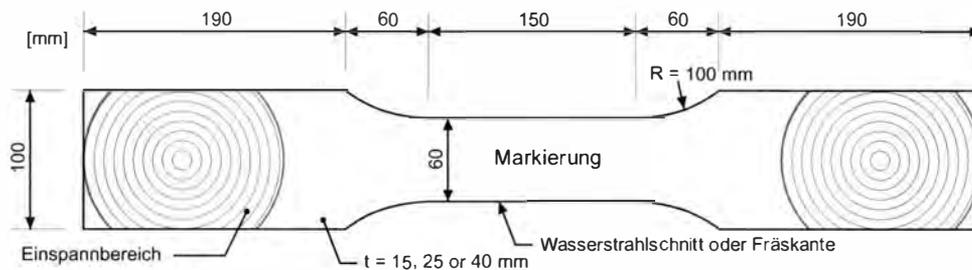


Bild 40 Geometrie der Versuchskörper

Die für die Versuchskörper benötigten Stahlbleche wurden teilweise bereits zugeschnitten, teilweise als Blech geliefert, welches in der Zentralen Mechanikwerkstatt der Universität Duisburg-Essen weiter bearbeitet wurde. Eine Übersicht der Liefer- und Bearbeitungszustände des Grundmaterials ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Versuchskörper aus S355J2 wurden für alle Blechdicken plasmageschnitten mit einem Übermaß von 3 mm geliefert. Um Aufhärtungen im Bereich der Schnittkanten durch das Plasmabrennen zu vermeiden, wurden die Schnittkanten anschließend auf Maß gefräst. Die Probekörper aus S460N der Blechdicken 15 mm und 25 mm wurden als plasmageschnittene Rohlinge der Abmessungen 100x650 mm geliefert. Die eigentlich verjüngte Form wurde durch Fräsen hergestellt. Die Versuchskörper aus S460N mit einer Blechdicke von 40 mm wurden in der Zentralen Mechanikwerkstatt der Universität Duisburg-Essen aus einem Stahlblech mittels Wasserstrahl geschnitten.

3.3.2 Verzögerungen / Probleme

Während der Beschaffung des Grundmaterials und der Herstellung der Versuchskörper kam es zu einigen unvorhergesehenen Verzögerungen, welche den Ablauf des Forschungsvorhabens verzögerten.

- (1) Das für die Herstellung der Versuchskörper benötigte Material sollte seitens der im projektbegleitenden Ausschuss (pbA) beteiligten Stahlhersteller/Stahlhändler kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Die Bereitstellung des Materials S355J2 erfolgte aufgrund von Lieferschwierigkeiten und Kapazitätsengpässen beim Zuschnitt der Bleche in einzelne Versuchskörper seitens des Stahlherstellers mit einigen Monaten Verzögerung. Die weiteren Versuchsvorbereitungen wurden dementsprechend nachfolgend auch verschoben.
- (2) Das seitens der im pbA beteiligten Stahlhersteller/Stahlhändler zugesicherte Material konnte zudem nicht im vollen Umfang zur Verfügung gestellt werden. Das S460N-Material wurde zum Teil erst noch vom im pbA beteiligten Stahlhersteller produziert, was eine Verzögerung in der Bereitstellung zur Folge hatte, zum Teil musste es zugekauft werden, nachdem geklärt werden konnte, dass bei dem im pbA beteiligten Stahlhersteller dieses Material im Projektzeitraum nicht gewalzt werden würde. Aus diesem Grund hat sich der nachfolgende Zuschnitt der S460N Bleche in einzelne Versuchskörper dementsprechend verzögert.
- (3) Der Zuschnitt des vorhandenen Materials der Stahlsorte S460N und der Blechdicke 40 mm seitens der Zentralen Mechanikwerkstatt der Universität Duisburg-Essen dauerte länger als geplant. Aufgrund der relativ großen Blechdicke des Probenmaterials von 40 mm musste die Geschwindigkeit der Wasserstrahlschneidanlage stark reduziert werden, was neben der deutlich erhöhten Bearbeitungszeit auch zu Überschneidungen mit anderen Aufträgen der Werkstatt führte.
- (4) Zudem musste zusätzlich jeder wasserstrahlgeschnittene Versuchskörper nachgefräst werden, da die Schnittkanten aufgrund der großen Materialstärke nicht direkt in einem Arbeitsschritt planparallel hergestellt werden konnten. Es hat sich herausgestellt, dass der Wasserstrahl bei den großen Blechdicken teilweise seitlich ausweicht, so dass eine weitere Bearbeitung nötig wurde.

3.3.3 Werkstoffe / Grundmaterialien

Als Werkstoffe für die Versuche im Rahmen des Forschungsvorhabens kamen die Stahlsorten S355J2 sowie S460N in den drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm zum Einsatz. Durch die Verwendung der beiden verschiedenen Stahlsorten sollte eine Vergleichbarkeit nicht nur der unterschiedlichen Markiermethoden, sondern auch der Einflüsse aus unterschiedlichen Blechdicken und Materialeigenschaften ermöglicht werden. Für alle in den Ermüdungsversuchen verwendeten Materialien wurden Abnahmeprüfzeugnisse 3.1 nach DIN EN 10204 angefordert, so dass die relevanten Parameter wie Streckgrenze und Zugfestigkeit exakt zugeordnet werden konnten.

Eine Übersicht der Materialparameter ist in Tabelle 8 dargestellt. Ursprünglich sollten alle Versuchskörper gleicher Stahlsorten und gleicher Blechdicken aus einer Stahlschmelze hergestellt werden, um eventuelle Effekte unterschiedlicher Materialien auszuschließen. Bei der Herstellung der gefrästen Versuchskörper aus

Stahl S355J2 musste jedoch auf neues Material ausgewichen werden, da die für die Markierung verantwortliche Firma die bereits aus Stahlblechen zugeschnittenen Versuchskörper nicht ohne hohen zeitlichen Aufwand verarbeiten konnte. Die Versuchsserien 355-15-Fr, 355-25-Fr und 355-40-Fr sind daher aus separaten Stahlblechen gefertigt und markiert worden. Aufgrund sehr ähnlicher Materialeigenschaften zu den jeweils anderen Stahlblechen gleicher Blechdicke und Stahlsorte kann im Rahmen der Ermüdungsversuche jedoch von einer Vergleichbarkeit ausgegangen werden. Die aus den Abnahmeprüfzeugnissen ermittelten Streckgrenzen wurden zur Ermittlung der Ermüdungsbeanspruchung herangezogen.

Tabelle 8 Materialeigenschaften

Stahlsorte	Markiermethode	Blechdicke [mm]	Schmelzen nr.	Streckgrenze ReH [N/mm ²]	Zugfestigkeit Rm [N/mm ²]
S355J2+N	Stempeln	15	20363	398	540
S355J2+N	Plasmamarkieren	25	12169	371	545
S355J2+N	Nadeln	40	54336	397	570
S355J2+N	Fräsen	15	57154	458	578
S355J2+N		25	14K10526	393	537
S355J2+N		40	928109	415	576
S460N	Stempeln	15	46270	502	598
S460N	Fräsen	25	686092	488	588
S460N	Plasmamarkieren				
S460N	Nadeln	40	382370	530	659

Zugversuche

Des Weiteren wurden am Institut für Metall- und Leichtbau an den seitens der Industriepartner zur Verfügung gestellten Versuchsmaterialien Zugversuche an Zugproben zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens durchgeführt. Für das Grundmaterial S355J2+N der gefrästen Versuchskörper, welches zusätzlich zur Verfügung gestellt wurde, konnten keine Zugversuche durchgeführt werden, da neben den Prüfkörpern kein zusätzliches Grundmaterial zur Verfügung gestellt werden konnte.

Für die Durchführung der Zugversuche wurden Zugproben der Form E nach DIN 50125 [20] aus dem Grundmaterial entnommen. Die Breite der Zugproben entspricht hier der Dicke des Grundmaterials, siehe Bild 41. Für die Zugversuche wurden drei Probekörper je Blechdicke und Stahlsorte getestet.

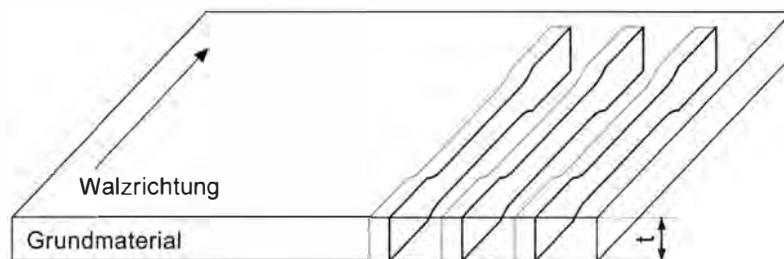


Bild 41 Probenentnahme für Zugversuche

Die Ergebnisse der durchgeführten Zugversuche sind in Tabelle 9 im Vergleich zu den aus den Abnahmeprüfzeugnissen entnommenen Werten angegeben. Die ermittelten mechanischen Kennwerte aus den Zugversuchen erfüllen die

Anforderungen in Bezug auf Mindeststreckgrenze, -zugfestigkeit sowie Bruchdehnung. Die ermittelten Kennwerte Streckgrenze und Zugfestigkeit stimmen zudem gut mit den Kennwerten aus den zur Verfügung gestellten Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 überein.

Die Spannungs-Dehnungs-Linien sind in Bild 42 bis zu einer Grenzdehnung von 4,5 % dargestellt, da bis zu dieser Dehnung diese mit Feindehnungsmessern direkt am Probekörper gemessen wurden. Danach mussten die Feindehnungsmesser demontiert werden und die Verformung wurde über den Kolbenweg aufgenommen. Die vollständigen Spannungs-Dehnungs-Linien ergeben sich aus der Kombination der beiden Messeinrichtungen.

Tabelle 9 Ergebnisse der Zugversuche

Stahlsorte				S355J2+N			S460N		
Blechdicke	t	[mm]		15	25	40	15	25	40
Probenform				Flach					
Probenrichtung zur Walzrichtung				Längs					
Streckgrenze	R _{eH}	[N/mm ²]	APZ 3.1 ¹⁾	398	378	397	502	488	530
			IML ²⁾	421	364	414	474	462	520
Abweichung		[%]		5,5	3,8	4,1	5,9	5,6	1,9
Zugfestigkeit	R _m	[N/mm ²]	APZ 3.1 ¹⁾	540	545	570	598	588	659
			IML ²⁾	562	551	566	613	607	670
Abweichung		[%]		3,9	1,1	0,7	2,4	3,1	1,6
Duktilität	R _m / R _{eH}	[%]	APZ 3.1 ¹⁾	1,36	1,44	1,44	1,19	1,20	1,24
			IML ²⁾	1,33	1,51	1,37	1,29	1,31	1,29
¹⁾ Werte entsprechend den Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 ²⁾ Ergebnisse der am Institut für Metall- und Leichtbau durchgeführten Zugversuche									

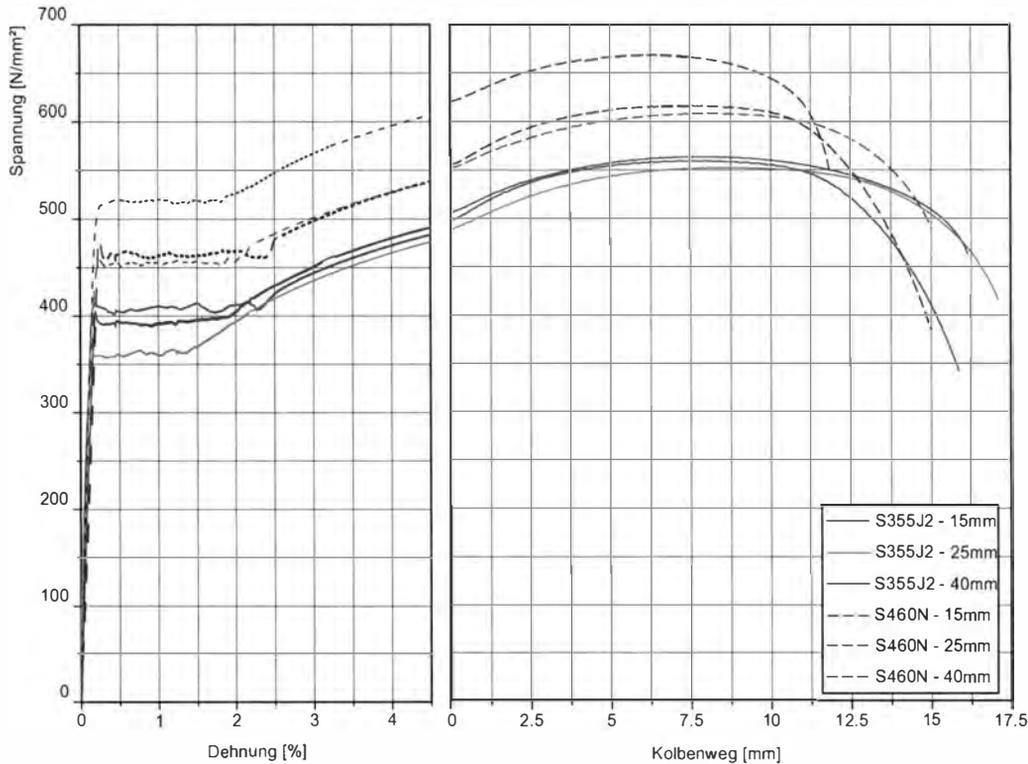


Bild 42 Spannungs-Dehnungs-Linien der eingesetzten Grundwerkstoffe (Darstellung bis Grenzdehnung von 4,5 %, danach Spannung über Kolbenweg)

3.3.4 Fertigung

Die Fertigung und Kennzeichnung der Versuchskörper erfolgte sowohl am Institut für Metall- und Leichtbau als auch bei den Industriepartnern des projektbegleitenden Ausschusses (pbA). Eine Übersicht der Lieferzustände der Probekörper und deren weiteren Bearbeitung sind in Tabelle 10 gegeben.

Die Versuchskörper aus S355J2+N aller Blechdicken wurden bereits als plasmageschnittene Prüfkörper mit einem Übermaß von 3 mm geliefert und dann in der Zentralen Mechanikwerkstatt der Universität Duisburg-Essen auf Maß gefräst. Hierdurch konnten Aufhärtungen der Schnittkanten infolge des Plasmaschnittes vermieden werden.

Die zugekauften Versuchskörper aus S460N der Blechdicken 15 mm und 25 mm wurden als plasmageschnittene Rohlinge geliefert. Die Abmessungen der Rohlinge betragen 100x650xt mm. Die Verjüngung der Prüfkörper im Bereich der Versuchskörpermitte wurde ebenfalls mittels Fräsungen hergestellt.

Die Versuchskörper aus S460N der Blechdicke 40 mm wurden aus einem Stahlblech mittels Wasserstrahlschnitt ausgearbeitet. Aufgrund eines über die Prüfkörperdicke nicht geraden Verlaufs des Wasserstrahlschnitts mussten die Prüfkörper zusätzlich nachbearbeitet werden, um planparallele Schnittkanten zu erzeugen.

Tabelle 10 Lieferzustände und Bearbeitungszustände des Grundmaterials

Stahlsorte	Blechdicke [mm]	Lieferzustand	Bearbeitung
S355J2+N	15, 25, 40	Plasmageschnittene Versuchskörper mit Übermaß von 3mm	Fräsen der Schnittkanten auf Versuchskörpermaß
S460N	15, 25	Plasmageschnittene rechteckige Rohlinge (100x650 mm)	Fräsen der Verjüngung der Versuchskörper
S460N	40	Stahlblech	Wasserstrahlschnitt der Versuchskörper. Nachbearbeitung der Schnittkanten durch Fräsen

3.3.5 Kennzeichnungen

3.3.5.1 Allgemeines

Die zu installierenden Kennzeichnungen sollten mit allen vier zu untersuchenden Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln herzustellen sein, damit ein eventuell vorhandener Einfluss verschiedener Schriftgrößen auf die Rissausbreitung und somit auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht werden konnte. Besonders bei den Kennzeichnungsmethoden Fräsen und Plasmamarkieren existieren quasi keine Beschränkungen in der Markiergeometrie. Nadelmarkierungen sind in der Wahl der Markiergeometrie auch sehr flexibel, können allerdings keine freien Linien erzeugen. Harte Stempelungen sind dahingegen in der Geometrie durch die zur Verfügung stehenden Stempelsätze beschränkt. Aus diesem Grund wurde als Markierlayout für alle Markiermethoden zunächst eine definierte Buchstaben- und Zahlenkombination mit zwei unterschiedlichen Schrifthöhen gewählt, siehe Bild 43.

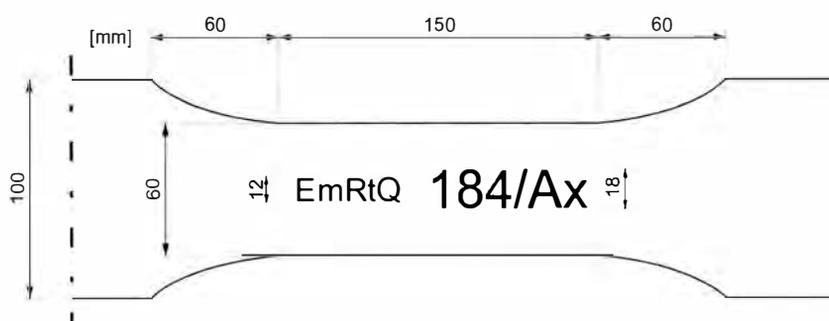


Bild 43 Im Rahmen des Forschungsvorhabens geplante Kennzeichnungsgeometrie

Nach ersten Ermüdungsversuchen mit den plasmamarkierten Versuchskörpern zeigte sich jedoch, dass die Schrifthöhe keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat. Die Prüfkörper versagten ohne erkennbares Muster teilweise im Bereich der kleineren, teilweise im Bereich der größeren Schrifthöhe. Entscheidend für den Rissausgang ist vielmehr die jeweilige Ausprägung der Ansatz- und Umkehrpunkte, in denen die Risse in der Regel ausgehen. Aus diesem Grund wurde daraufhin für die gestempelten und genadelten Versuchskörper die Markiergeometrie angepasst, siehe Bild 44 und Bild 45. Dies hatte zugleich den Vorteil, dass mit der Harten Stempelung eine annähernd gleiche Markiertiefe wie beim Plasmamarkieren erreicht

werden konnte. Zudem konnten mit dem verwendeten Nadelmarkiergerät keine Schriftgrößen von 12 mm und 18 mm in einem Markierdurchgang realisiert werden, weshalb bei der Nadelmarkierung ausschließlich mit einer Markierschriftgröße von 12 mm gearbeitet wurde. Bei einer Nadelmarkierung ist die Geometrie aufgrund der punktierten Schriftzeichen ohnehin wenig relevant, solange die einzelnen Nadelpunkte äquidistant angeordnet sind, weshalb die Änderung des Markierlayouts keine Auswirkungen auf die Ermüdungsversuche haben sollte. Für die gefrästen Versuchskörper wurden dennoch die gleiche Markiergeometrie wie für die plasmamarkierten Proben gewählt. Obwohl sich bei den plasmamarkierten Versuchskörpern kein Einfluss der Geometrie zeigte, wurde für die gefrästen Versuchskörper die ursprünglich gewählte Markiergeometrie entsprechend Bild 43 beibehalten, da mit dem Markierwerkzeug problemlos alle Geometrie herzustellen waren.

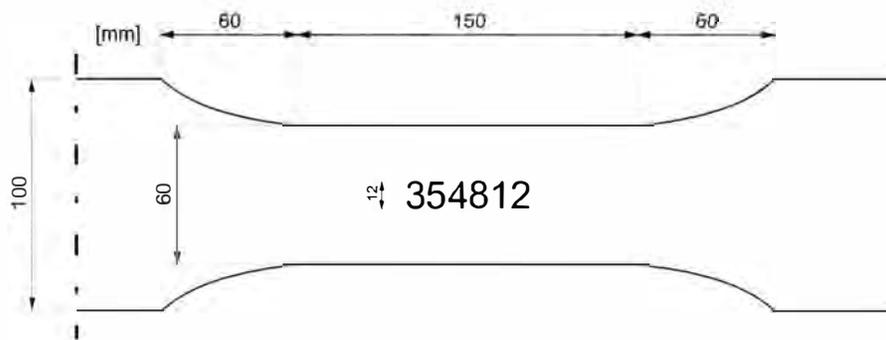


Bild 44 Markiergeometrie für gestempelte Versuchskörper

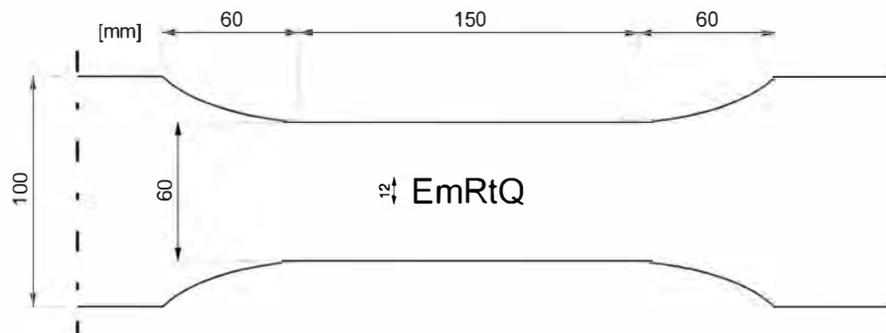


Bild 45 Markiergeometrie für genadelte Versuchskörper

Um die Geometrie der Markierkerben exakt ermitteln und vergleichen zu können, wurden am Institut für Metall- und Leichtbau neben Makroaufnahmen aus Querschnitten der Versuchskörper, siehe Bild 34, 3-D Modelle mithilfe eines Mikroskops, Keyence VHX 100 K (20fache bis 5000fache Vergrößerung) erstellt. Bei dieser Technik werden mit dem geeigneten Mikroskop bis zu 50 Aufnahmen in verschiedenen, über die Höhe des Probekörpers äquidistant angeordneten Schichten aufgenommen und dann zu einem Modell zusammengesetzt, siehe schematische Darstellung in Bild 46. Die Vorteile dieser Methode für die vorliegenden Untersuchungen liegen in der Exaktheit der Messungen, der Visualisierung der Kerben bei gleichzeitiger zerstörungsfreier Erstellung räumlicher Modelle. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden letztendlich die Geometrien ausgewählter Probekörper aller vier Kennzeichnungsmethoden mithilfe der 3D-Mikroskopie ausgemessen, siehe auch Anhang B. Als wesentliche geometrische Parameter können die Markiertiefe, also die Tiefe der eingebrachten Markierung in

das Grundmaterial, der Öffnungswinkel der Kerbe sowie der Ausrundungsradius im Kerbgrund angegeben werden. Weiterhin ist der Übergang zwischen der Kerbe und dem Grundmaterial von Bedeutung für den Kräftefluss. Im Rahmen dieses Berichts sind als Grundmaterial alle Bereiche des Prüfkörpers zu verstehen, welche nicht direkt infolge der eingebrachten Kerben durch Materialabtrag oder plastische Verformungen verändert wurden. Unter dem Begriff der Kerbe ist im Allgemeinen der vollständige oder ein bestimmter Teil der Markierspur gemeint.

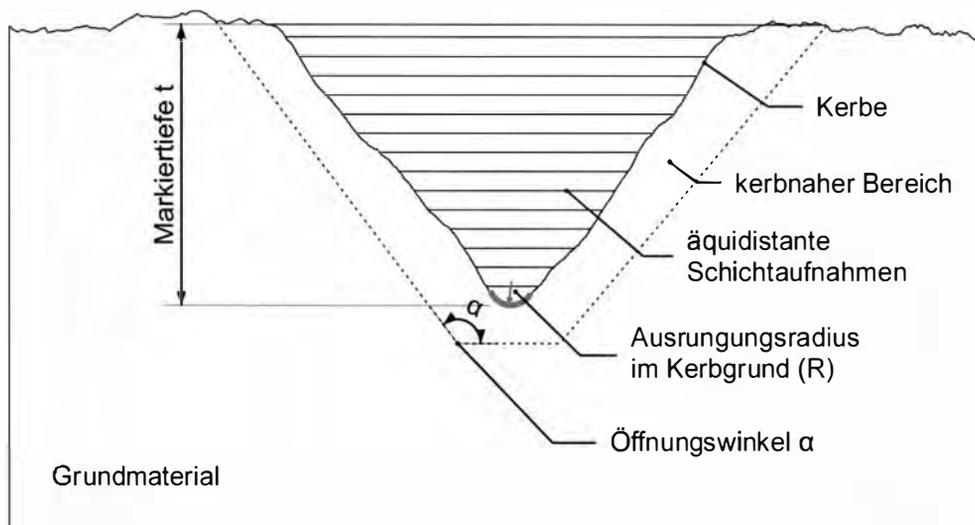


Bild 46 Schematische Darstellung des Prinzips der Erstellung eines 3-D Modells aus zusammengesetzten Schichtaufnahmen mit Hilfe der 3-D-Mikroskopie sowie maßgebende Kerbparameter

3.3.5.2 Hartes Stempeln

Für die gestempelten Versuchskörper wurde ein mobiles Markiergerät der Firma Hilti verwendet, siehe Bild 6. Das mit Explosivpulver angetriebene Gerät mit der Bezeichnung DX 462 wurde für die Markierungen auf die höchstmögliche Markierstufe gestellt und mit den stärksten Explosivkapseln geladen. Das Markierergebnis ist hier in gewissem Maß ohne große Streuungen reproduzierbar, allerdings auch abhängig vom Bediener. Wie bereits in Kapitel 2.2.2 beschrieben, entstehen bei einer Markierung mit mehreren gleichzeitig eingesetzten Zeichen unter Umständen unregelmäßige Ergebnisse, welche auf eine nicht perfekte Ausrichtung des Markiergeräts zur Werkstoffoberfläche zurückzuführen sind. Im Rahmen der Herstellung der Markierungen für dieses Forschungsvorhaben wurde bewusst große Sorgfalt auf eine genaue Ausrichtung der Maschine sowie reproduzierbare Ergebnisse gelegt. Dennoch ließen sich ungleiche Markierungen, siehe Bild 47, nicht immer vermeiden. Unter Baustellen- oder Fertigungsbedingungen ist davon auszugehen, dass in der Regel ungleichmäßigere Markierungen erzeugt werden.

Für die gestempelten Versuchskörper ergeben sich Kerben entsprechend Bild 48 und Bild 49 für die in Bild 47 angegebenen Positionen.



Bild 47 Übersicht der Stellen der Mikroskopbilder des Prüfkörpers S460-15-St-7

In Bild 48 ist deutlich die Form der Kerbe zu erkennen. Die Markiertiefe liegt bei ca. $600\ \mu\text{m}$ und ist damit vergleichsweise groß. Die installierte Kerbe ist relativ scharf, die Wangenflächen der Kerben sind relativ glatt und gleichmäßig. Im Kerbgrund ist eine minimale Ausrundung vorhanden. Aufgrund des definierten Eindrucks des Stempels folgt die Form der Kerbe der Form des Stempels und kann hierüber direkt beeinflusst werden. Ferner kann hier aufgrund der relativ tiefen und scharfkantigen Eindrückung von einer größeren Beeinflussung des Kraftflusses und somit der Ermüdungsfestigkeit ausgegangen werden.

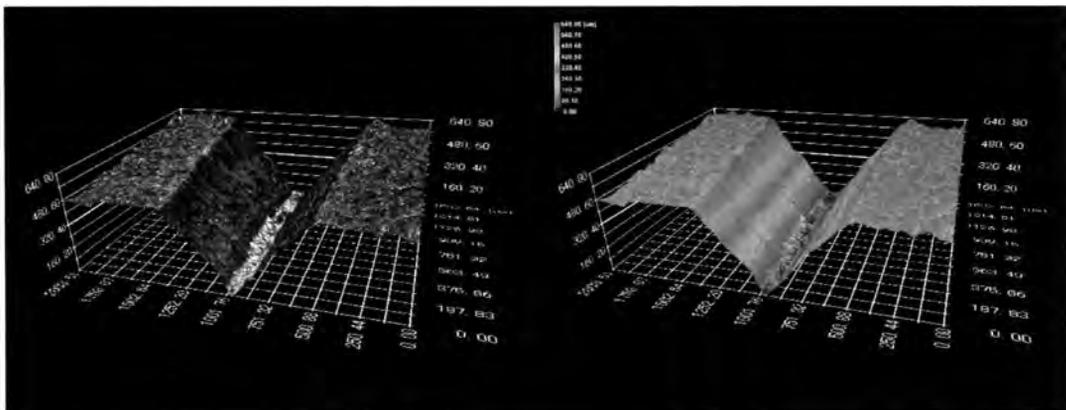


Bild 48 3-D Modell einer gestempelten Kerbe aus Prüfkörper 460-15-St-7 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. 1 aus Bild 47)

Die Markierung in Bild 49 besitzt im Vergleich eine ähnliche Geometrie, ist jedoch deutlich weniger tief, obwohl sie aus derselben Stempelung stammt wie die in Bild 48 visualisierte Kerbe. Die Markiertiefe beträgt in diesem Bereich nur ca. $260\ \mu\text{m}$ – im Vergleich zu $600\ \mu\text{m}$ an der anderen Position. Wie bereits erläutert, liegt hierfür die Ursache in der ungleichmäßigen Markierung infolge des mobilen Markiergerätes. Die Form der Kerbe ist ähnlich scharfkantig, weist aber einen geringfügig größeren Radius im Kerbgrund auf. Der Auslauf der Markierung ist ebenfalls gut zu erkennen.

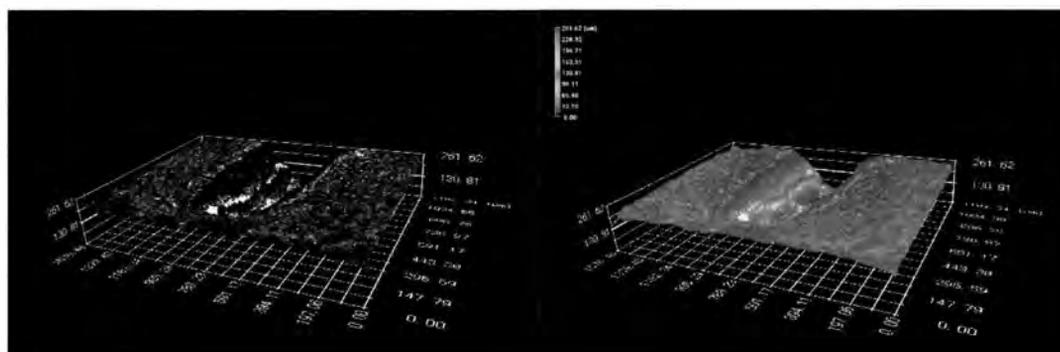


Bild 49 3-D Modell einer gestempelten Kerbe aus Prüfkörper 460-15-St-7 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. 2 aus Bild 47)

Ein Querschnitt der beiden Kerben ist zusätzlich in Bild 50 gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass beide Markierungen aufgrund des identischen Markierstempels den nahezu gleichen Öffnungswinkel aufweisen. Zudem ist der etwas größere Radius der randnahen Markierung im Kerbgrund zu erkennen.

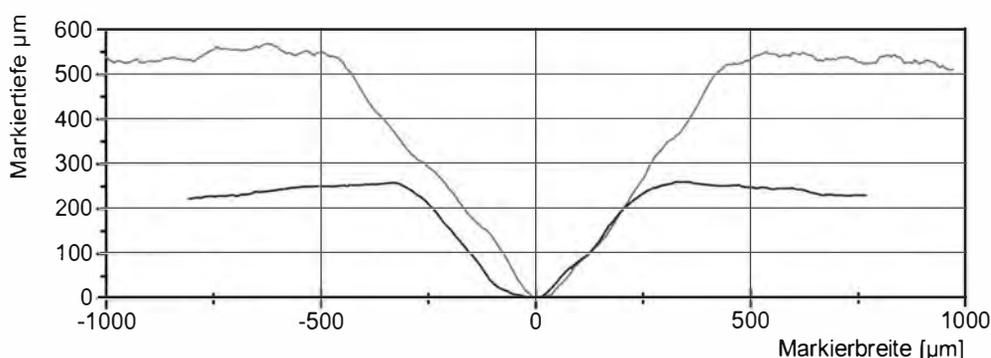


Bild 50 Gegenüberstellung zweier Querschnitte der Markierung von Prüfkörper 460-15-St-7 am Rand der Markierung (blau) und in einem tieferen Bereich (grün)

3.3.5.3 Fräsen

Die Fräsmarkierung wurde mit einer stationären, in einer Fertigungsstraße integrierten Fräsmaschine hergestellt. Hierbei stand keine Tiefenkontrolle zur Verfügung, weshalb die Markiertiefe nicht direkt gesteuert werden konnte. Da die Versuchskörper aus S355J2+N und S460N nicht zur gleichen Zeit markiert werden konnten, ergaben sich für die beiden Stahlsorten unterschiedliche Markiertiefen.

S355J2+N

Die Fräsmarkierungen der Versuchskörper aus S355J2+N haben im Mittel Markiertiefen von ca. 150 µm bis 200 µm. Die Markierungen weisen hierbei insgesamt eine relative raue Oberfläche auf, siehe Bild 51. Die Rauheit unterscheidet sich zwischen den Ansatzpunkten des Fräskopfes und den markierten Linien. Im Bereich der Ansatzpunkte, bei denen das Material noch relativ sauber herausgetrennt wird, siehe Bild 52, ist die Markierung weniger rau als im Bereich der Markierspur, siehe exemplarisch Bild 56 und Bild 57. Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass die Markierung aufgrund der geringen Tiefe und der Geometrie des eingesetzten Fräskopfes einen sehr großen Öffnungswinkel hat.

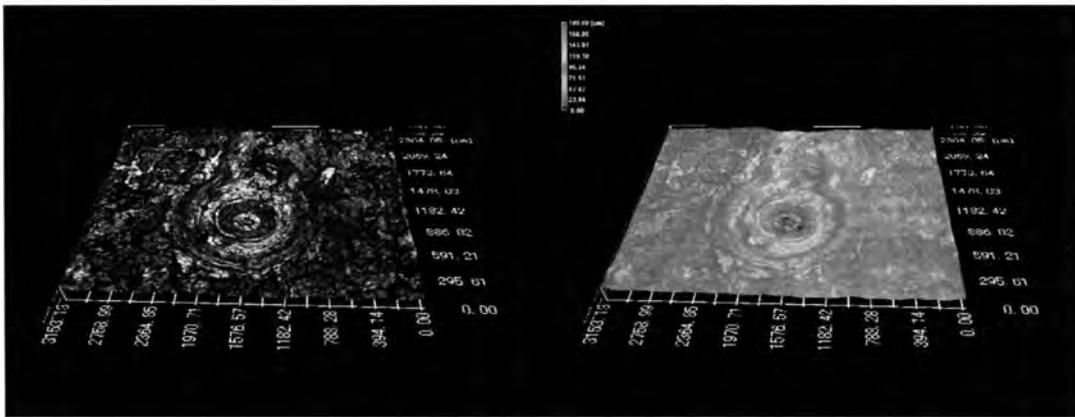


Bild 51 3-D-Modell einer gefrästen Kerbe aus Prüfkörper 355-15-Fr-11 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)

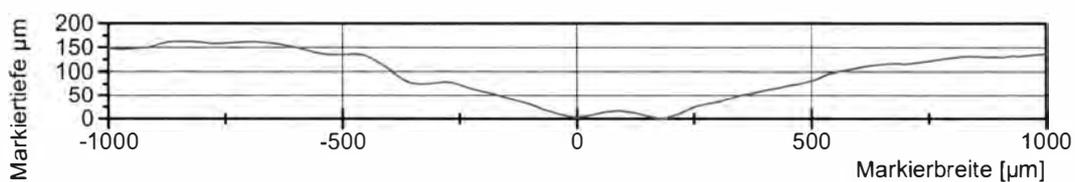


Bild 52 Querschnitt eines Teils der Markierung des Prüfkörpers 355-15-Fr-11

S460N

Bild 53 zeigt die Bereiche der Markierung, an denen die 3-D Modelle der exemplarischen Prüfkörper aus S460N erstellt wurden. Die Fräsmarkierungen der Versuchskörper aus S460N sind insgesamt tiefer als die Markierungen der Versuchskörper aus S355J2+N. Sie liegen im Mittel bei 300 μm bis 350 μm , siehe Bild 54. Der exemplarische Verlauf eines Querschnitts durch die gezeigte Markierung ist darüber hinaus in Bild 55 dargestellt. Die Geometrie der Kerbe entspricht hier nahezu der Geometrie der Kerben in den Versuchskörpern aus S355J2, mit dem Unterschied, dass die Markierung der S460N Prüfkörper tiefer ist.



Bild 53 Übersicht der Stellen der Mikroskopbilder des Prüfkörpers 460-15-Fr-6

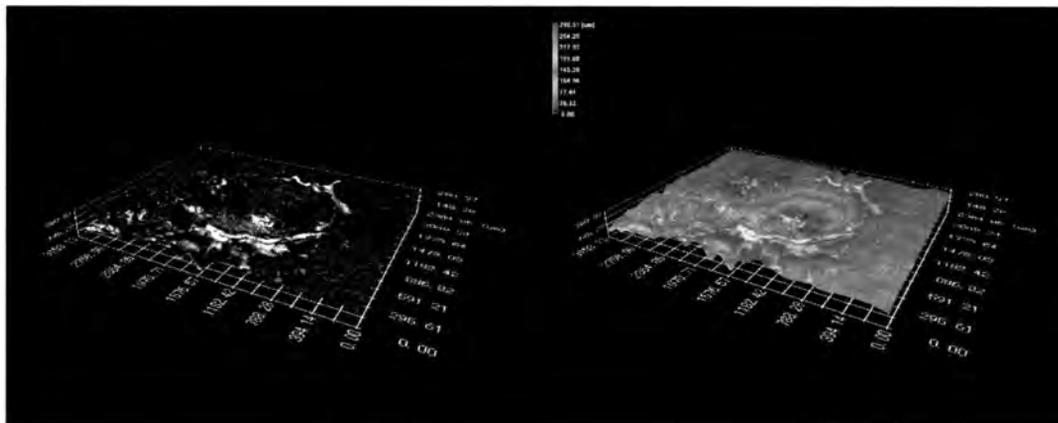


Bild 54 3-D-Modell einer gefrästen Kerbe aus Prüfkörper 460-15-Fr-6 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos.1 aus Bild 53)

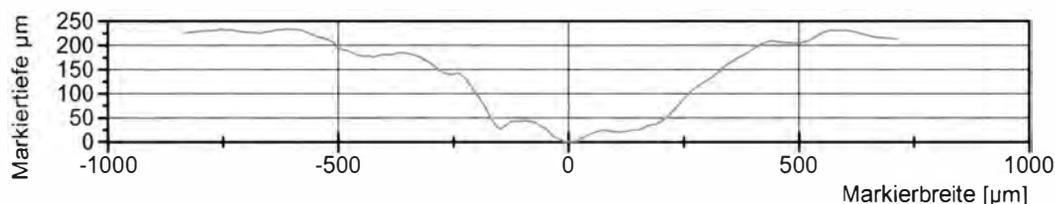


Bild 55 Querschnitt eines Teils der Markierung des Prüfkörpers 460-15-Fr-6

Bild 56 zeigt zudem eine Ansicht der Fräsmarkierung im Bereich einer markierten Linie, siehe auch Bild 53. Sobald der Fräskopf die ersten Ansatzpunkte verlässt und mit der Markierung beginnt, wird die Markieroberfläche deutlich rauer. Dies ist auf die hohe Umdrehungsgeschwindigkeit des Fräskopfes zurückzuführen, welcher in Abhängigkeit von der Markiergeschwindigkeit das Material nicht mehr exakt herausfräsen kann. Diese Rauheit kann zusätzlich Bild 57 entnommen werden. Hier wurde ein Längsschnitt entlang der Markierspur angefertigt, welcher deutlich die Rauheit des Profils und der Oberfläche darstellt. Diese Merkmale können dazu führen, dass trotz einer relativen geringen Markiertiefe die Ermüdungsfestigkeit beeinträchtigt wird.

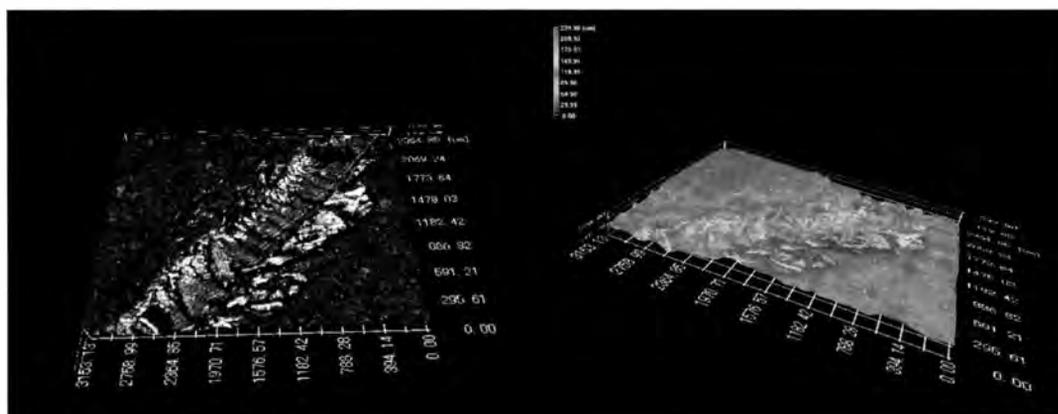


Bild 56 3-D-Modell einer gefrästen Kerbe aus Prüfkörper 460-15-Fr-6 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos.2 aus Bild 53)

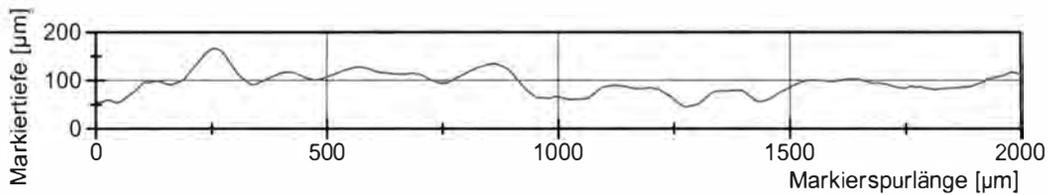


Bild 57 Längsschnitt eines Teils der Markierung des Prüfkörpers 460-15-Fr-6

3.3.5.4 Plasmamarkieren

Die Plasmamarkierungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden mit einem Plasmamarkierer der Firma Peddinghaus Anlagen & Maschinen GmbH hergestellt. Zunächst wurden Probekörper mit einer Markierstromstärke von 6 Ampere und einer Markiergeschwindigkeit von 6,1 m/min gekennzeichnet, siehe Bild 58 (b). Erste Ermüdungsversuche an je einem Prüfkörper der Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm aus S355J2+N zeigten allerdings quasi keinen Einfluss der Markierung auf die Ermüdungsfestigkeit: Die Prüfkörper versagten jeweils im Grundmaterial oder konnten als Durchläufer gewertet werden, obwohl sie relativ hohen Ermüdungsbeanspruchungen mit Oberspannungen von 85 % der Streckgrenze nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1 unterlagen. Daraufhin wurden die Markierparameter angepasst und für die weiteren Probekörper eine Stromstärke von 10 Ampere bei gleichbleibender Markiergeschwindigkeit gewählt. Der visuelle Unterschied der beiden Markierstromstärken ist in Bild 58 dargestellt.

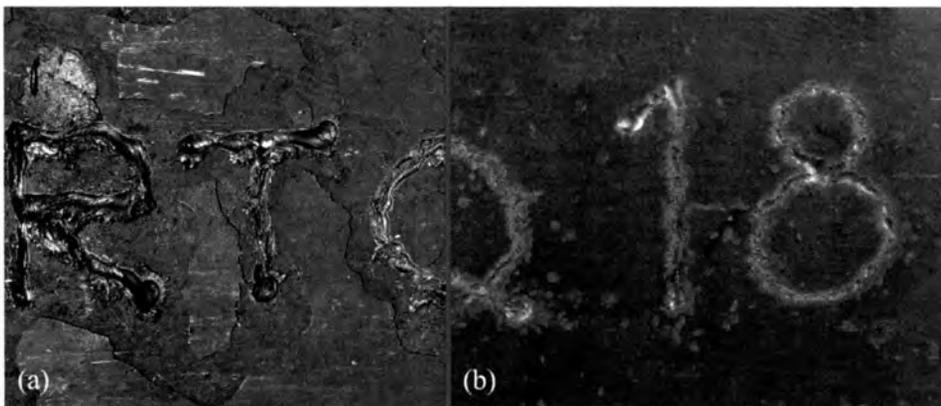


Bild 58 Vergleich unterschiedlicher Plasmamarkierstromstärken von (a) 10 A und (b) 6 A

Markierkerben infolge Plasmamarkieren können in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- Ansatz, End- und Umkehrpunkte sowie
- übrige Bereiche.

In Bereichen, in denen der Plasmabrenner angesetzt wird, ist die Markierung aufgrund der etwas höheren Verweildauer in der Regel deutlich tiefer als in den anderen Bereichen. Dies spiegelt sich auch in den Messungen der Markiergeometrien wider. Während der Einbrand im Bereich der Ansatzpunkte ca. 600 µm in das Material eingebracht wird, siehe Bild 59 und Bild 60, ist die Markiertiefe bei den gegebenen Markierparametern in der restlichen Markierspur mit 300 µm deutlich kleiner, siehe Bild 61 und Bild 62.

Generell liefern die Plasmamarkierungen ausgerundete Markiergeometrien mit weichen Übergängen zwischen dem Grundmaterial und der Markierung. Bei tieferen Markierungen infolge größerer Stromstärken oder in Bereichen von Ansatzpunkten

wird der Öffnungswinkel der Kennzeichnungen steiler, was einen negativen Effekt auf das Ermüdungsverhalten haben kann. Der relativ große Ausrundungsradius im Kerbgrund lässt sich allerdings sowohl im Bereich der Ansatzpunkte als auch im restlichen Bereich der Markierungen erkennen.

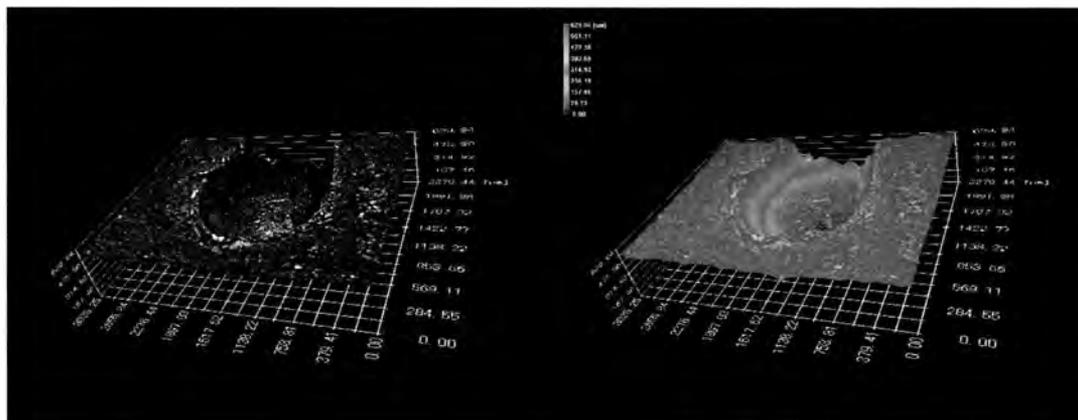


Bild 59 3-D-Modell einer plasmamarkierten Kerbe aus Prüfkörper 460-15-PI-7 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)

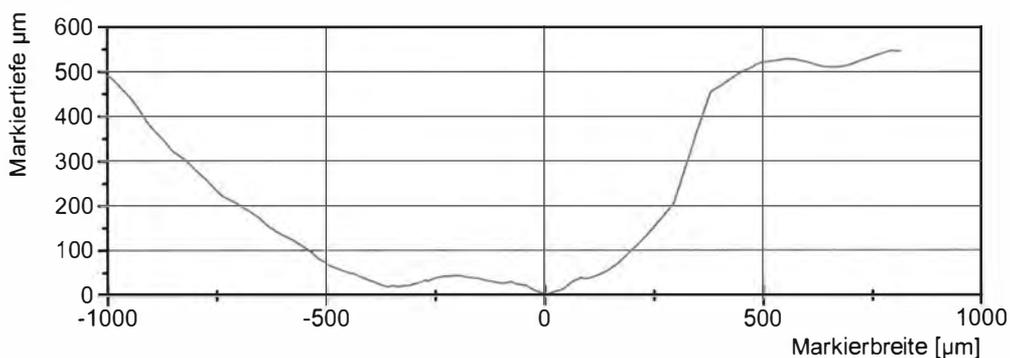


Bild 60 Querschnitt eines Teils der Markierung des Prüfkörpers 460-15-PI-7

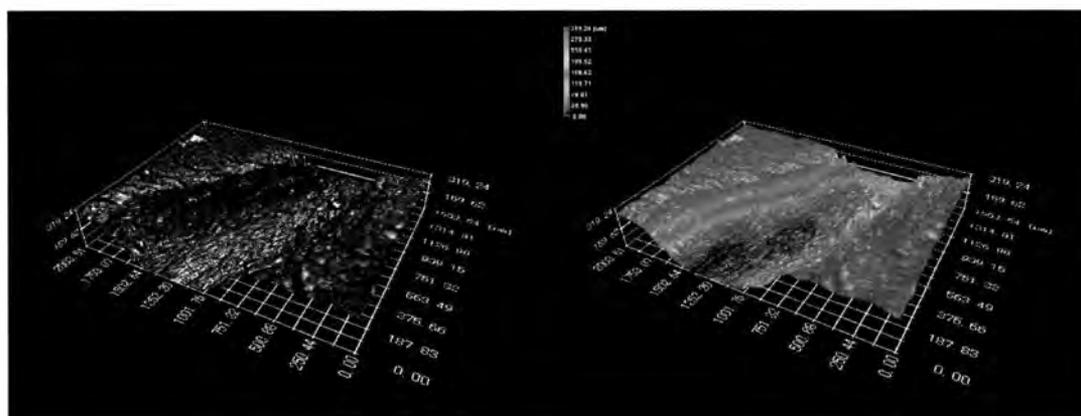


Bild 61 3-D-Modell einer plasmamarkierten Kerbe aus Prüfkörper 460-15-PI-7 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)

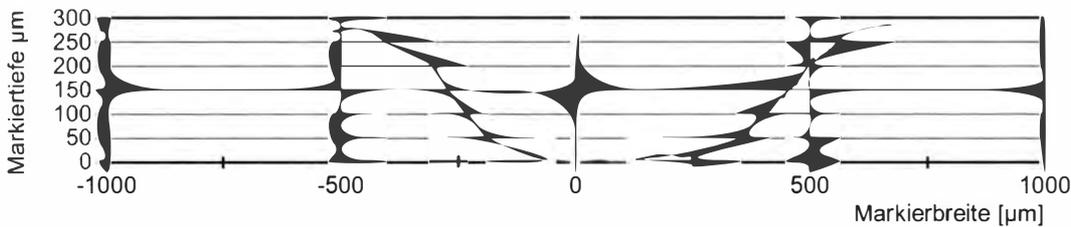


Bild 62 Querschnitt eines Teils der Markierung des Prüfkörpers 460-15-PI-7

3.3.5.5 Nadeln

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Nadelmarkierungen wurden mit einem mobilen Markiergerät der Firma MARKATOR® Manfred Borries GmbH hergestellt. Die Nadel des Markiertools FlyMarker Pro wurde dabei mit einem speziellen extra starken Magneten angetrieben, um tiefe Markierungen zu erzeugen. In einem ersten Ermüdungsversuch an einem Prüfkörper aus S355J2+N mit einer Blechdicke von 25 mm zeigten sich jedoch selbst bei einer Ermüdungsbeanspruchung mit einer Oberspannung von 85 % der Streckgrenze nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach fünf Millionen Lastwechseln keine sichtbaren Schädigungen am Probekörper, so dass dieser Versuch als Durchläufer zu werten war. Daraufhin wurden für die weiteren Nadelmarkierungen die Markierparameter insofern angepasst, dass jeder Nadelschlag zweifach ausgeführt wurde, um eine künstlich erhöhte Markiertiefe zu erzielen.

Die so erhaltenen Markierungen wiesen letztendlich eine Tiefe von ca. 300 µm auf, siehe Bild 63 und Bild 64. Charakteristisch für die hier untersuchten Nadelmarkierungen sind die besonders runden Geometrien der installierten Kerben. Der Übergang zwischen dem Grundmaterial und der Kerbe ist fließend und der Ausrundungsradius im Kerbgrund ist relativ groß. Neben dem großen Öffnungswinkel und der geringen Tiefe der Kerbe können diese Faktoren verantwortlich für ein optimiertes Ermüdungsverhalten sein.

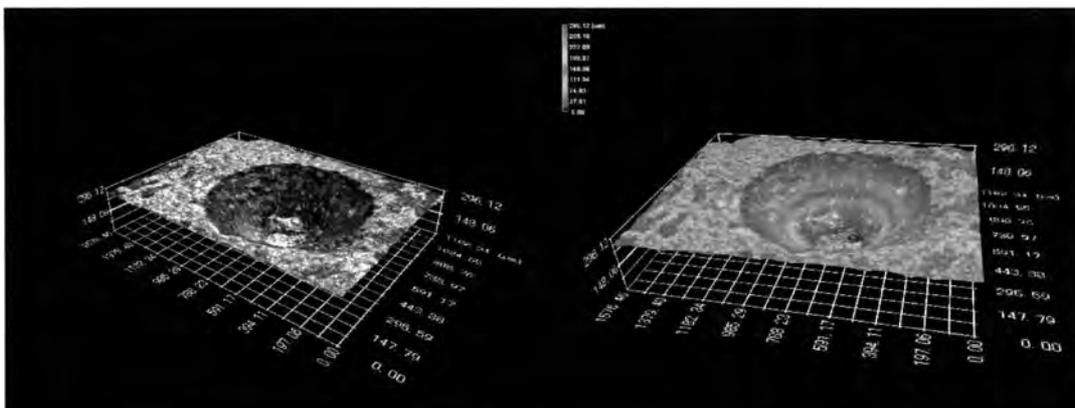


Bild 63 3-D-Modell einer plasmamarkierten Kerbe aus Prüfkörper 460-15-Na-1 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)

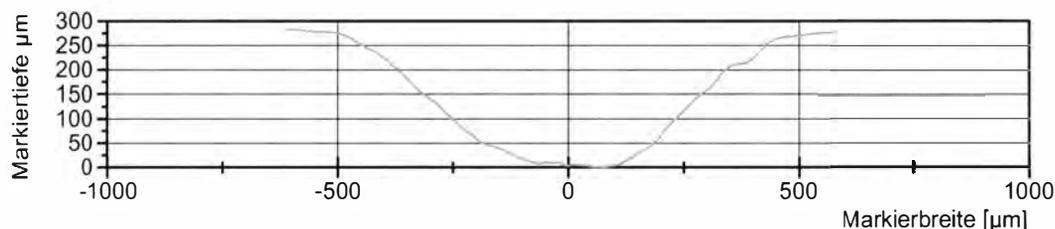


Bild 64 Querschnitt eines Teils der Markierung des Prüfkörpers 460-15-Na-1

3.3.5.6 Zusammenfassung

Die ermittelten Querschnitte sind vergleichend in Bild 65 dargestellt. In der direkten Gegenüberstellung lassen sich die unterschiedlichen Kennzeichnungsgeometrien gut vergleichen. Deutlich zu erkennen ist, dass die tiefere Stempelmarkierung (grün) in etwa die Markiertiefe der Plasmamarkierung in den Ansatzpunkten (violett) liefert. Die Plasmamarkierung erzeugt bei nahezu identischer Markiertiefe allerdings eine deutliche breitere und rundere Markierung. Zusätzlich sind auch die unterschiedlichen Markiertiefen der gefrästen Versuchskörper aus S355J2 (blau, Strichpunkt) und S460N (orange) zu erkennen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass jede Markiermethode eine spezifische Kerbgeometrie hinterlässt. Die hier gezeigten Geometrien können daher nur eine Tendenz zur Einordnung der Markiermethoden liefern. Die Geometrie der Kerben ist neben den hier vorgestellten grundlegenden Eigenschaften im Wesentlichen abhängig von den gewählten Markierwerkzeugen und Markierparametern. Dennoch lassen sich durch die im Rahmen des Forschungsvorhabens angestrebten Untersuchungen wesentliche Eigenschaften der Markiermethoden erkennen, welche Rückschlüsse auf das Ermüdungsverhalten liefern können.

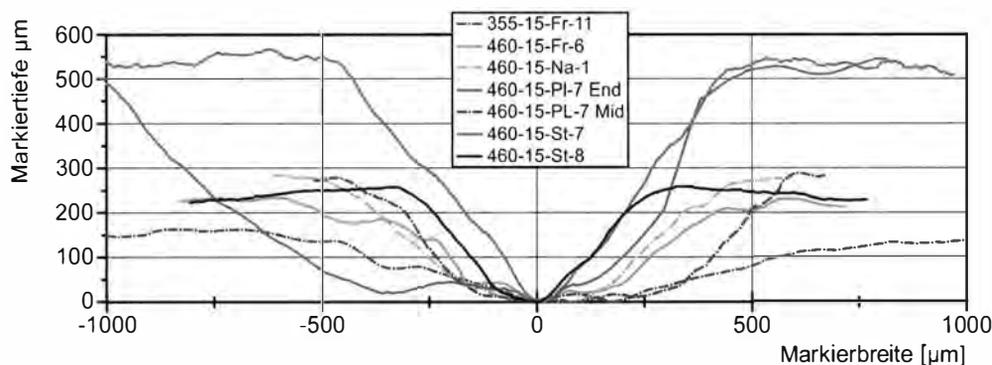


Bild 65 Übersicht der Markierkerbenverläufe im Querschnitt

3.4 Versuchsdurchführung

Die Ermüdungsversuche erfolgten an zwei der institutseigenen servohydraulischen Pulsatoren mit statischen Nennkapazitäten von 1,0 MN und 1,6 MN, siehe Bild 66. Die entsprechenden dynamischen Kapazitäten der Maschinen betragen 0,8 MN und 1,2 MN. Um maschinenbedingte Einflüsse innerhalb einer Versuchsserie zu vermeiden, wurde jede Serie in je einer Maschine getestet. Des Weiteren wurden nicht nur die Versuche einer Serie sondern auch die Versuche aller Serien mit gleichen Blechdicken in je einer Maschine durchgeführt. Konkret wurden alle Versuchsserien und -körper mit Blechdicken von 15 mm und 25 mm in der 1,0 MN-Prüfmaschine getestet, alle 40 mm Proben in der größeren 1,6 MN-Prüfmaschine.

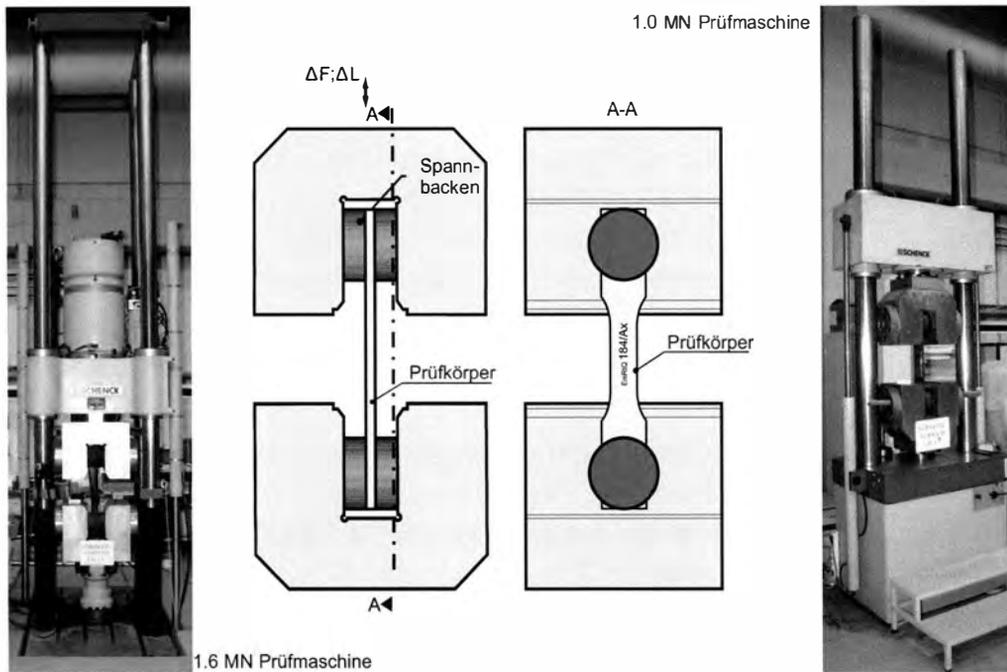


Bild 66 Servohydraulische Prüfmaschinen des Instituts für Metall- und Leichtbau

Die Ermüdungsversuche wurden kraftgesteuert mit einer sinusförmigen Belastungskurve im Zugschwellbereich und einem einstufigen Spannungskollektiv gefahren, siehe Bild 67. Die Ermüdungsbeanspruchung wurde im Rahmen der Versuche iterativ auf Basis der erzielten Ergebnisse angepasst. Die Versuche wurden bis zum Bruch der Versuchskörper gefahren. Durchläufer wurden nach fünf Millionen Lastwechseln beendet. Als maximale Oberspannungen wurden im Lauf der Versuche 30 % bis 96 % der gemessenen Streckgrenze nach den vorliegenden Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 eingestellt. Die Versuchsfrequenz betrug je nach Belastung zwischen 3 Hz und 9 Hz.

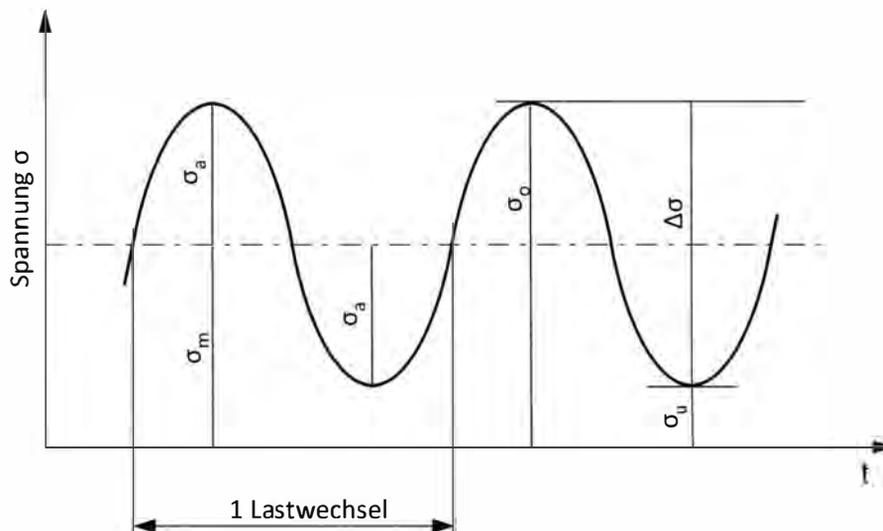


Bild 67 Sinusförmige Spannungs-Zeit-Funktion mit einstufigem Spannungskollektiv

3.5 Versuchsergebnisse

3.5.1 Allgemeines

Die Ermüdungsversuche der markierten Versuchskörper zeigen erwartungsgemäß einen eindeutigen Einfluss der vier Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit. Der Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hängt insbesondere von der Markiermethode und -geometrie sowie von der Blechdicke ab. Ein Einfluss der Streckgrenze des Grundmaterials auf das Ermüdungsverhalten konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche ist in Tabelle 11 dargestellt.

Die Darstellung und Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt in Form von Wöhlerlinien mit doppellogarithmischer Achseneinteilung. Auf der Abszisse ist jeweils die Lastwechselzahl N und auf der Ordinate die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ als Nennspannung aufgetragen. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte mithilfe der linearen Regression. Dabei wurden Wöhlerlinien in der Regel mit einer variablen, aus den Versuchsergebnissen resultierenden Steigung m ausgewertet. Zusätzlich wurde in den Wöhlerliniendiagrammen als Referenz die höchste nach DIN EN 1993-1-9 [2] gegebene Kerbfallklasse 160 mit einer Neigung von $m = 3,0$ angegeben (schwarze Linie, gestrichelt), welche den für die Bemessung günstigsten Kerbfall darstellt. Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,95\%}$ bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln wurde entsprechend DIN EN 1993-1-9 [2] sowie dem zugehörigen Hintergrundbericht [19] statistisch als 95 %-Fraktile mit 95 %-Überlebens- und 75 %-Vertrauenswahrscheinlichkeit ermittelt. Ausgegeben sind die Wöhlerlinien für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 95\%$ (Volllinien) sowie für $P_{\bar{0}} = 50\%$ (Strich-Punktlinien). Für die statistische Auswertung wurden ausschließlich Versuchskörper berücksichtigt, welche infolge eines Rissausgangs von der Markierung ausgehend versagten. Durchläufer oder Versuchskörper mit einem Ermüdungsversagen, welches nicht von der Markierung ausging, wurden nicht berücksichtigt.

Spezielle auf die Dauerfestigkeit der Versuchskörper ausgerichtete Untersuchungen wurden im Forschungsvorhaben nicht näher durchgeführt. Ziel der Ermüdungsversuche war es lediglich den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit und somit den Einfluss der unterschiedlichen Markiermethoden zu ermitteln.

Tabelle 11 Ergebnisse der Ermüdungsversuche

Kennzeichnungsmethode	Stahlsorte	Blechkdicke [mm]	Anzahl Versuche	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²]	Serie	Spannungsschwingbreite	
						$\Delta\sigma_{min.}^*$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{max.}^{**}$ [N/mm ²]
Hartes Stempeln	S355J2	15	7	398	355-15-St	143	305
		25	5	371	355-25-St	167	284
		40	7	397	355-40-St	167	322
	S460N	15	6	502	460-15-St	124	248
		25	6	488	460-25-St	144	310
		40	7	530	460-40-St	207	323
Fräsen	S355J2	15	7	458	355-15-Fr	206	350
		25	6	393	355-25-Fr	212	301
		40	6	415	355-40-Fr	262	318
	S460N	15	4	502	460-15-Fr	228	290
		25	5	488	460-25-Fr	207	311
		40	6	530	460-40-Fr	187	352
Plasmamarkieren	S355J2	15	7	398	355-15-PI	193	340
		25	7	371	355-25-PI	217	300
		40	5	397	355-40-PI	232	304
	S460N	15	5	502	460-15-PI	174	286
		25	5	488	460-25-PI	176	286
		40	7	530	460-40-PI	207	311
Nadeln	S355J2	15	2	398	355-15-Na	-	320
		25	2	371	355-25-Na	284	319
	S460N	15	2	502	460-15-Na	-	319
		25	2	488	460-25-Na	-	319

* kleinste untersuchte Spannungsschwingbreite innerhalb der Serie
** größte untersuchte Spannungsschwingbreite innerhalb der Serie

3.5.2 Verzögerungen / Unplanmäßigkeiten

Während der Ermüdungsversuche zeigte sich ein, im Vergleich zu den Voruntersuchungen, Kapitel 2.5.2, teilweise sehr gutmütiges Verhalten der Versuchskörper. Ein zu erwartender Blechkdickeinfluss, welcher die Ermüdungsfestigkeit für dickere Bleche verringert, konnte während der Versuche nicht festgestellt werden. Mit einer Zunahme der Blechkicken konnten teilweise deutlich höhere Lastwechselzahlen bei gleicher Beanspruchung sowie höhere Ermüdungsfestigkeiten erzielt werden. Zudem zeigten sich die Markiermethoden mit den hier untersuchten Markierparametern insgesamt als vergleichsweise unkritisch, was zu relativ hohen Bezugswerten der Ermüdungsfestigkeit führte.

Dieses nicht zu erwartende gutmütige Verhalten konnte fast ausnahmslos über alle Versuchsserien beobachtet werden und resultierte in hohen Lastwechselzahlen und dementsprechend langen Versuchszeiten. Zur Vermeidung von Durchläufern mussten weiterhin die Prüfkörper mit höheren Spannungsschwingbreiten beansprucht werden, was maschinenbedingt in geringeren Versuchsfrequenzen resultierte und somit zusätzlich die Versuchszeiten verlängerte.

Das gutmütige Verhalten ist ausdrücklich als positiv zu bewerten, da der Einfluss der Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit als weniger kritisch einzu-

stufen ist. Allerdings konnten aus diesem Grund in dem gegebenen Forschungszeitraum nur jeweils fünf bis sieben Versuchskörper, bzw. für Serie 460-15-Fr vier Versuchskörper, einer Serie getestet werden. Die Ergebnisse zeigen mit der getesteten Anzahl an Versuchskörpern allerdings aussagekräftige Ergebnisse, welche in ebenso aussagekräftigen Wöhlerlinien resultieren.

Des Weiteren lieferten die bisher untersuchten genadelten Versuchskörper ausschließlich Durchläufer oder ein Versagen im Grundmaterial, welches nicht von der Kennzeichnung ausging.

3.5.3 Hartes Stempeln

3.5.3.1 S355J2

Die Ergebnisse der gestempelten Versuchskörper aus S355J2 sind in Tabelle 12 zusammengefasst sowie in Bild 68 unter Angabe der ausgewerteten Wöhlerlinien dargestellt. Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit liegen zwischen $\Delta\sigma_{c,95\%} = 132 \text{ N/mm}^2$ (rote Volllinie) für die Versuchskörper der Blechdicke 15 mm und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 192 \text{ N/mm}^2$ (blaue Volllinie) für die Versuchskörper der Blechdicke 40 mm. Die Neigung der Wöhlerlinie der Serie 355-40-St ergibt sich zu $m = 4,0$, die der Serien 355-15-St und 355-25-St zu 2,9 und 2,8. Zwei der sieben Versuche (355-40-St-04 und 355-40-St-07) wurden bereits vor Eintreten eines Bruches oder Erreichen einer Lastwechselzahl von fünf Millionen abgebrochen, da die bis zum Abbruch erzielten Lastwechselzahlen im Vergleich mit anderen Prüfkörpern dieser Serie unerwartet hoch erschienen. Die Ermüdungsbeanspruchung war für diese beiden Versuche mit 65 % bzw. 70 % der Streckgrenze gemäß Abnahmeprüfzeugnis 3.1 in einem mittleren Belastungsbereich. Dennoch zeigte sich bei erreichten Lastwechselzahlen von knapp 3,4 bzw. 3,5 Millionen kein Bruch der Proben. Ein vergleichbarer Versuchskörper versagte dagegen bei einer Belastung von 75 % der gemessenen Streckgrenze bei ca. 900.000 Lastwechseln, ein weiterer bei einer Belastung von 60 % der gemessenen Streckgrenze bereits nach 2,9 Millionen Lastwechseln, so dass die beiden Versuche vorerst gestoppt wurden.

Ein weiterer Versuchskörper versagte bei einer relativ hohen Belastung von 90 % der gemessenen Streckgrenze im Grundmaterial. Der Riss ging in diesem Fall von der geschliffenen Schnittkante im Werkstoff aus, siehe Bild 69. Der Versuchskörper wurde für die statistische Auswertung nicht berücksichtigt.

Weiterhin erwähnenswert ist, dass jeder einzelne Versuchskörper mehr Lastwechsel bis zum Bruch durchlief als der entsprechende Versuchskörper mit vergleichbarer Belastung und geringerer Blechdicke.

Die Streuungen der Einzelergebnisse zum Mittelwert sind mit einer Standardabweichung von $s(\log N) = 0,05$ bei den 15 mm und 25 mm dicken Prüfkörper fast halb so groß wie bei den 40 mm dicken Versuchskörpern mit einer Standardabweichung von $s(\log N) = 0,09$. Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 355-15-St-02 sind in Bild 70 dargestellt. Anhand der Bruchbilder ist deutlich der Rissausgang von der Markierung sowie die vergleichsweise glatte Ermüdungsbruchfläche sowie die raue Restbruchfläche zu erkennen. Weitere Bruchbilder zu allen getesteten Serien sind dem Anhang zu entnehmen.

Tabelle 12 Versuchsparameter und –ergebnisse gestempelter Versuchskörper aus S355J2

Probennr.	Zustand	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastwechsel [-]	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, R_{eH} = 398 N/mm²					
355-15-St-07	gestempelt	0.40	143.3	2 227 857	M
355-15-St-05	gestempelt	0.50	179.1	1 020 312	M
355-15-St-04	gestempelt	0.60	214.9	566 220	M
355-15-St-01	gestempelt	0.65	232.8	519 282	M
355-15-St-02	gestempelt	0.70	250.7	493 260	M
355-15-St-03	gestempelt	0.75	268.7	350 662	M
355-15-St-06	gestempelt	0.85	304.5	226 205	M
Blechdicke t = 25 mm, R_{eH} = 371 N/mm²					
355-25-St-05	gestempelt	0.50	167.0	1 922 448	M
355-25-St-04	gestempelt	0.60	200.3	861 042	M
355-25-St-01	gestempelt	0.70	233.7	693 284	M
355-25-St-03	gestempelt	0.75	250.4	538 004	M
355-25-St-02	gestempelt	0.85	283.8	408 569	M
Blechdicke t = 40 mm, R_{eH} = 397 N/mm²					
355-40-St-03	gestempelt	0.60	214.4	2 900 000	M
355-40-St-04	gestempelt	0.65	232.2	3 482 953	A
355-40-St-07	gestempelt	0.70	250.1	3 378 738	A
355-40-St-02	gestempelt	0.75	268.0	917 765	M
355-40-St-06	gestempelt	0.80	285.8	796 402	M
355-40-St-01	gestempelt	0.85	303.7	806 633	M
355-40-St-05	gestempelt	0.90	321.6	452 199	G

M = Rissausgang von der Markierung
D = Durchläufer
A = Abbruch des Versuches vor Erreichen eines Abbruchkriteriums
G = Rissausgang im Grundmaterial, nicht von der Markierung ausgehend

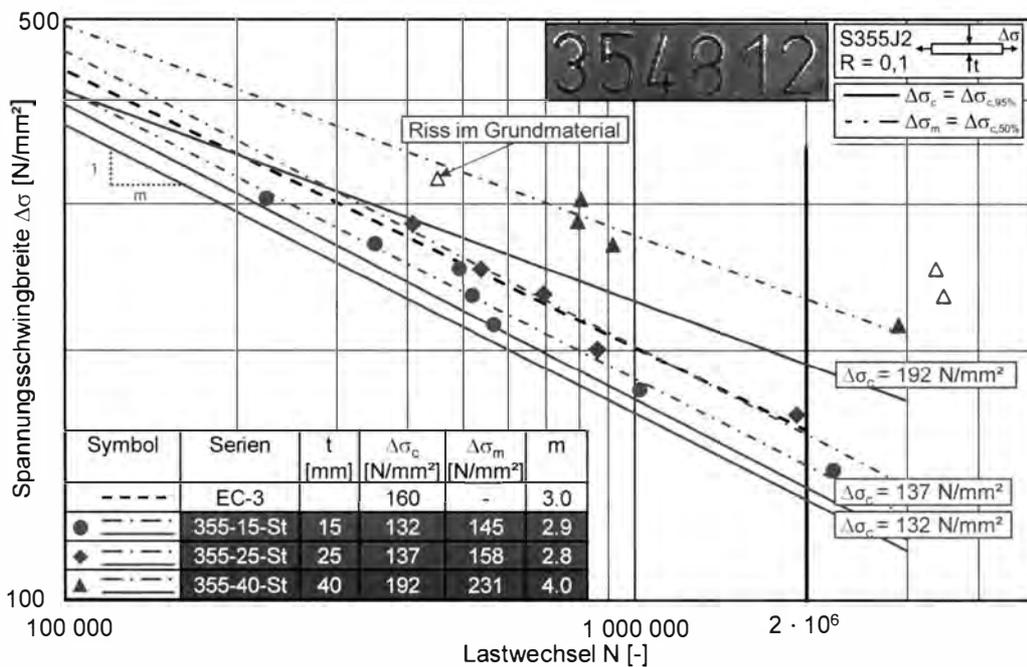


Bild 68 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gestempelter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2



Bild 69 Rissausgang des Prüfkörpers 355-40-St-05 im Grundmaterial (Übergang zwischen tailliertem und eingespanntem Bereich)

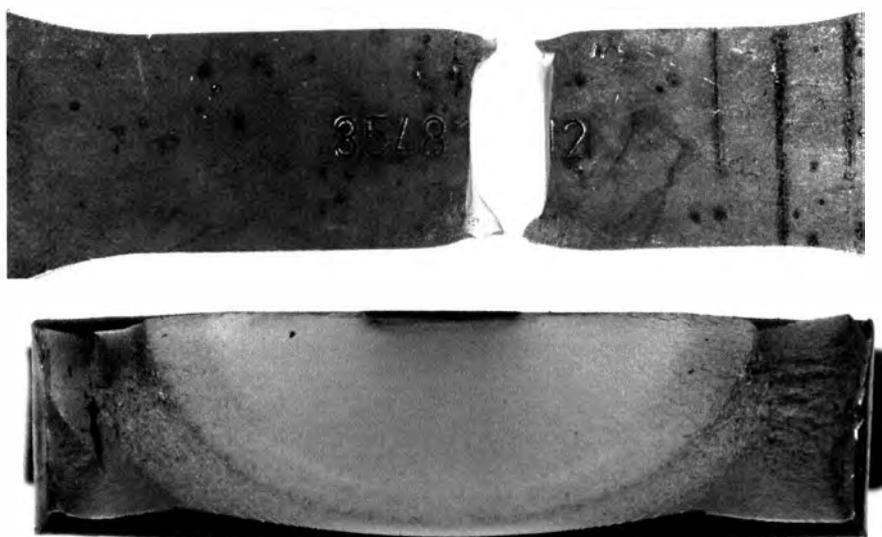


Bild 70 Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 355-15-St-02

3.5.3.2 S460N

Die Ergebnisse der gestempelten Versuchskörper der Stahlsorte S460N sind in Tabelle 13 zusammengefasst sowie in Bild 71 in Form von Wöhlerlinien ausgewertet. Die Versuchsserien aus S460N zeigen eine ähnliche Tendenz wie die korrespondierenden Versuchskörper aus S355J2. Die Ermüdungsfestigkeit steigt ebenfalls mit zunehmender Blechdicke an. Die Ermüdungsfestigkeitswerte ergeben sich zu $\Delta\sigma_{c,95\%} = 125 \text{ N/mm}^2$ (rote Volllinie), $\Delta\sigma_{c,95\%} = 155 \text{ N/mm}^2$ (grüne Volllinie) und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 216 \text{ N/mm}^2$ (blaue Volllinie) für die Versuchskörper der Blechdicke 15, 25 und 40 mm. Bis auf je einen Versuchskörper jeder Serie versagten alle Prüfkörper mit einem Rissausgang von der Markierung. Die Durchläufer traten bei vergleichsweise geringen Ermüdungsbeanspruchungen von 27 % (15 mm), 33 % (25 mm) und 43 % (40 mm) der jeweiligen gemessenen Streckgrenze entsprechend Abnahmeprüfung 3.1 auf.

Tabelle 13 Versuchsp Parameter und –ergebnisse gestempelter Versuchskörper aus S460N

Probennr.	Zustand	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastwechsel [-]	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, R_{eH} = 502 N/mm²					
460-15-St-05	gestempelt	0.27	124.2	5 000 000	D
460-15-St-03	gestempelt	0.32	144.9	1 522 059	M
460-15-St-06	gestempelt	0.37	165.6	891 354	M
460-15-St-01	gestempelt	0.39	178.0	784 210	M
460-15-St-02	gestempelt	0.46	207.0	493 035	M
460-15-St-04	gestempelt	0.55	248.4	258 490	M
Blechdicke t = 25 mm, R_{eH} = 488 N/mm²					
460-25-St-01	gestempelt	0.33	144.9	5 000 000	D
460-25-St-03	gestempelt	0.47	207.0	1 028 608	M
460-25-St-04	gestempelt	0.57	248.4	561 562	M
460-25-St-06	gestempelt	0.61	269.1	173 388	2M
460-25-St-02	gestempelt	0.65	285.7	363 452	M
460-25-St-05	gestempelt	0.71	310.5	235 143	M
Blechdicke t = 40 mm, R_{eH} = 530 N/mm²					
460-40-St-04	gestempelt	0.43	207.0	5 000 000	D
460-40-St-05	gestempelt	0.49	231.8	2 222 464	M
460-40-St-02	gestempelt	0.52	248.4	1 320 146	M
460-40-St-07	gestempelt	0.52	248.4	1 447 193	M
460-40-St-06	gestempelt	0.56	269.1	1 313 472	M
460-40-St-01	gestempelt	0.60	285.7	601 368	M
460-40-St-03	gestempelt	0.68	322.9	376 012	M

M = Rissausgang von der Markierung
D = Durchläufer
2M = Rissausgang infolge einer doppelten Markierung

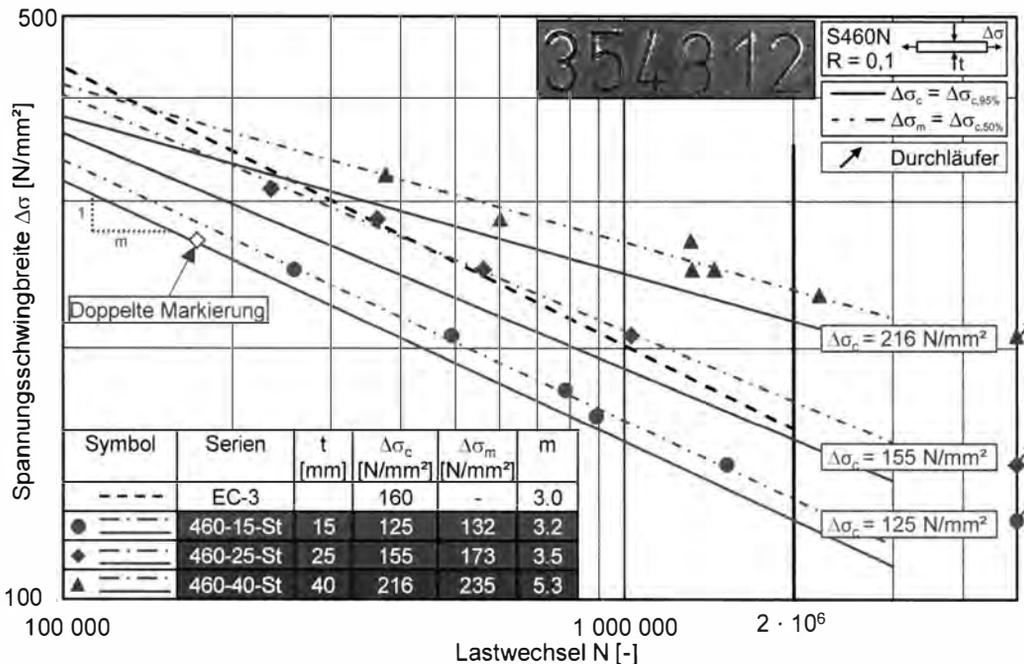


Bild 71 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gestempelter Versuchskörper der Stahlsorte S460N

Aufgrund einer doppelt aufgetragenen Markierung des Prüfkörpers 460-25-St-06, siehe Bild 72, versagte dieser bereits nach 173.388 Lastwechseln unter einer

Belastung von $\Delta\sigma = 269 \text{ N/mm}^2$ und wich somit deutlich von dem bis dahin ermittelten Streuband ab. Infolge der doppelt aufgebrachten Markierung in Randnähe des Prüfkörpers ging ein erster Ermüdungsriss im Bereich dieser randnahen Markierung aus, welcher sich dann infolge der mittigen Markierung schneller aufweiten konnte. Der Versuchskörper wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt.

Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 460-25-St-03 sind Bild 73 zu entnehmen. Die Risse der gestempelten Prüfkörper gingen in der Regel von der Ziffer „1“ in der Markierung aus. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Markierungen dieser Serie im Bereich der Ziffern „1“ und „2“ tiefer waren als im restlichen Bereich, zum anderen auf die höhere Kerbschärfe gegenüber den anderen Ziffern.



Bild 72 Exemplarisches Bruchbild des Prüfkörpers 460-25-St-06 mit doppelter Markierung

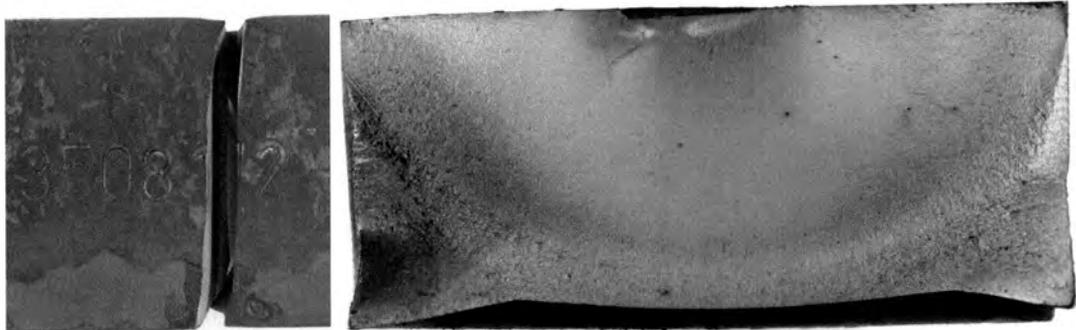


Bild 73 Exemplarische Bruchbilder des gestempelten Prüfkörpers 460-25-St-03

3.5.4 Fräsen

3.5.4.1 S355J2

Die Versuchsparameter und -ergebnisse aus den Ermüdungsversuchen der gefrästen Versuchskörper aus S355J2 sind in Tabelle 14 zusammengefasst sowie in Bild 71 in Form von Wöhlerlinien ausgewertet. Die erzielten Ermüdungsfestigkeiten liegen für diese Serie zwischen $\Delta\sigma_{c,95\%} = 191 \text{ N/mm}^2$ für die Versuchskörper der Blechdicken 15 mm (rote Volllinie) und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 231 \text{ N/mm}^2$ für die 40 mm dicken Prüfkörper (blaue Volllinie). Diese im Vergleich zu den Prüferien gestempelter Versuchskörper hohen Ermüdungsfestigkeiten resultieren aus den vergleichsweise geringen Markiertiefen von ca. 150 μm bis 200 μm , siehe Kapitel 3.3.5.3.

Die Standardabweichungen $s(\log N) = 0,04$ für die 15 mm dicken Prüfkörper, $s(\log N) = 0,06$ für die 25 mm Prüfkörper sowie $s(\log N) = 0,07$ für die 40 mm

Versuchskörper sind als gering einzustufen. Die geringen Streuungen deuten auf einen definierten quasi technischen Anriss durch die Markierung hin, so dass die Lastwechselzahlen bis zum technischen Anriss vernachlässigt werden können und die Lebensdauer fast ausschließlich über den Rissfortschritt definiert werden kann.

Exemplarische Bruchbilder der Prüfkörper 355-40-Fr-01 und 355-40-Fr-04 sind in Bild 75 dargestellt. Weitere Bruchbilder sind dem Anhang zu entnehmen. Bei den Bruchbildern des Prüfkörpers 355-40-Fr-01 (links) fällt die im Verhältnis zur Restbruchfläche relativ kleine Ermüdungsbruchfläche auf. Diese ist auf die vergleichsweise hohe Belastung mit einer Oberspannung von 85 % der gemessenen Streckgrenze zurückzuführen. Im Gegensatz dazu ist die Ermüdungsbruchfläche für Prüfkörper 355-40-Fr-04 (rechts) aufgrund der geringeren Belastung mit einer Oberspannung von 70 % der Streckgrenze deutlich größer.

Tabelle 14 Versuchsparemeter und –ergebnisse gefräster Versuchskörper aus S355J2

Probennr.	Zustand	σ_{\max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastwechsel [-]	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, R_{eH} = 458 N/mm²					
355-15-Fr-08	gefräst	0.50	206.1	1 944 449	M
355-15-Fr-07	gefräst	0.55	226.7	1 173 681	M
355-15-Fr-03	gefräst	0.61	251.4	894 523	M
355-15-Fr-06	gefräst	0.65	267.9	517 604	M
355-15-Fr-05	gefräst	0.70	288.5	429 336	M
355-15-Fr-02	gefräst	0.74	304.5	342 010	M
355-15-Fr-04	gefräst	0.85	350.4	206 431	M
Blechdicke t = 25 mm, R_{eH} = 393 N/mm²					
355-25-Fr-01	gefräst	0.60	212.2	2 500 000	F
355-25-Fr-05	gefräst	0.70	247.6	982 791	M
355-25-Fr-06	gefräst	0.75	265.3	652 684	M
355-25-Fr-03	gefräst	0.80	283.0	480 395	M
355-25-Fr-04	gefräst	0.85	300.6	315 463	M
355-25-Fr-02	gefräst	0.90	318.3	166 406	M
Blechdicke t = 40 mm, R_{eH} = 415 N/mm²					
355-40-Fr-04	gefräst	0.70	261.5	1 797 976	M
355-40-Fr-07	gefräst	0.73	271.6	1 448 410	M
355-40-Fr-05	gefräst	0.75	281.2	1 179 745	M
355-40-Fr-03	gefräst	0.79	295.7	679 192	M
355-40-Fr-06	gefräst	0.80	297.1	900 889	M
355-40-Fr-01	gefräst	0.85	317.5	727 396	M
M = Rissausgang von der Markierung					
D = Durchläufer					
F = Maschinenfehler; Erzielte Lastwechsel >2,5 Mio. nicht dokumentiert.					

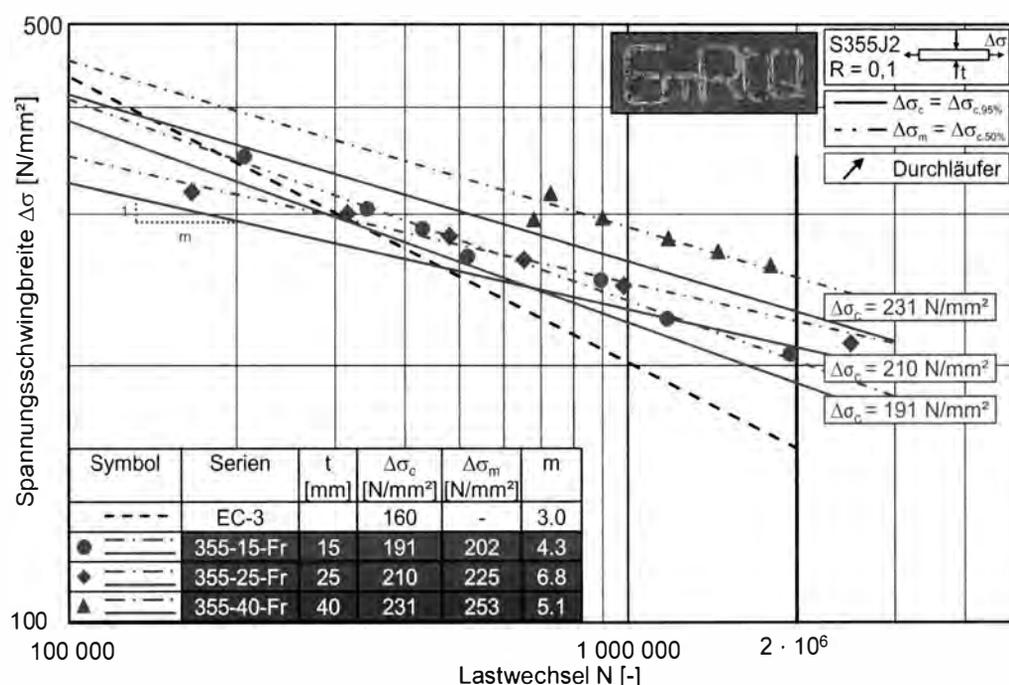


Bild 74 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gefräster Versuchskörper der Stahlsorte S355J2



Bild 75 Exemplarische Bruchbilder der gefrästen Prüfkörper 355-40-Fr-01 mit $\Delta\sigma = 317,5 \text{ N/mm}^2$ (links) und 355-40-Fr-04 mit $\Delta\sigma = 261,5 \text{ N/mm}^2$ (rechts)

3.5.4.2 S460N

Die Versuchsparameter und –ergebnisse der Ermüdungsversuche der gefrästen Versuchskörper aus S460N sind in Tabelle 15 dargestellt. Die Auswertung der Versuche in Form von Wöhlerlinien ist in Bild 76 abgebildet. Die Ermüdungsfestigkeiten der drei Serien mit Blechdicken von 15 mm, 25 mm und 40 mm liegen zwischen $\Delta\sigma_{c,95\%} = 149 \text{ N/mm}^2$ für die Versuchskörper der Blechdicke 25 mm (grüne Volllinie) und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 173 \text{ N/mm}^2$ für die Versuchskörper der Blechdicke 40 mm dicht zusammen. Die Ermüdungsfestigkeit der 15 mm dicken Prüfkörper liegt mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 154 \text{ N/mm}^2$ auf einem mit der Ermüdungsfestigkeit der 25 mm dicken

Proben vergleichbaren Niveau. Alle geprüften Versuchskörper versagten durch einen Ermüdungsriss ausgehend von der gefrästen Markierung.

Die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der gefrästen Versuchskörper aus S355J2 ist aufgrund der unterschiedlichen Markierparameter erschwert. Dennoch wird deutlich, dass bei einer Markierung mit gleichen Werkzeugen und unterschiedlichen Markierparametern der Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit stark variieren kann. So weisen die gefrästen Versuchskörper aus S355J2 mit einer Dicke von 15 mm eine vergleichbar hohe Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 191 \text{ N/mm}^2$ auf wie die gefrästen Versuchskörper aus S460N mit einer Dicke von 40 mm und einer Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 173 \text{ N/mm}^2$. Hervorzuheben ist weiterhin die geringe Streuung der Versuchsergebnisse der 40 mm dicken Prüfkörper mit einer Standardabweichung von $s(\log N) = 0,02$, welche auch visuell durch den geringen Abstand der Wöhlerlinien $\Delta\sigma_{c,95\%}$ und $\Delta\sigma_{c,50\%}$ in Bild 76 zu erkennen ist. Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 460-25-Fr-01 sind in Bild 77 dargestellt. Die Bruchfläche sowie das Bruchbild zeigen deutlich den Rissausgang von der Markierung.

Tabelle 15 Versuchsparameter und –ergebnisse gefräster Versuchskörper aus S460N

Probennr.	Zustand	σ_{\max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastwechsel [-]	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, R_{eH} = 502 N/mm²					
460-15-Fr-02	gefräst	0.50	227.7	780 852	M
460-15-Fr-03	gefräst	0.55	248.4	431 570	M
460-15-Fr-04	gefräst	0.60	269.1	384 376	M
460-15-Fr-01	gefräst	0.64	289.8	227 060	M
Blechdicke t = 25 mm, R_{eH} = 488 N/mm²					
460-25-Fr-05	gefräst	0.47	207.0	1 175 885	M
460-25-Fr-04	gefräst	0.57	248.4	422 099	M
460-25-Fr-03	gefräst	0.61	269.1	501 181	M
460-25-Fr-01	gefräst	0.66	289.8	249 242	M
460-25-Fr-02	gefräst	0.71	310.5	200 507	M
Blechdicke t = 40 mm, R_{eH} = 530 N/mm²					
460-40-Fr-05	gefräst	0.39	186.3	1 730 688	M
460-40-Fr-04	gefräst	0.52	248.4	509 644	M
460-40-Fr-03	gefräst	0.56	269.1	383 829	M
460-40-Fr-06	gefräst	0.61	289.8	302 583	M
460-40-Fr-02	gefräst	0.65	310.5	229 591	M
460-40-Fr-01	gefräst	0.74	351.9	129 891	M

M = Rissausgang von der Markierung

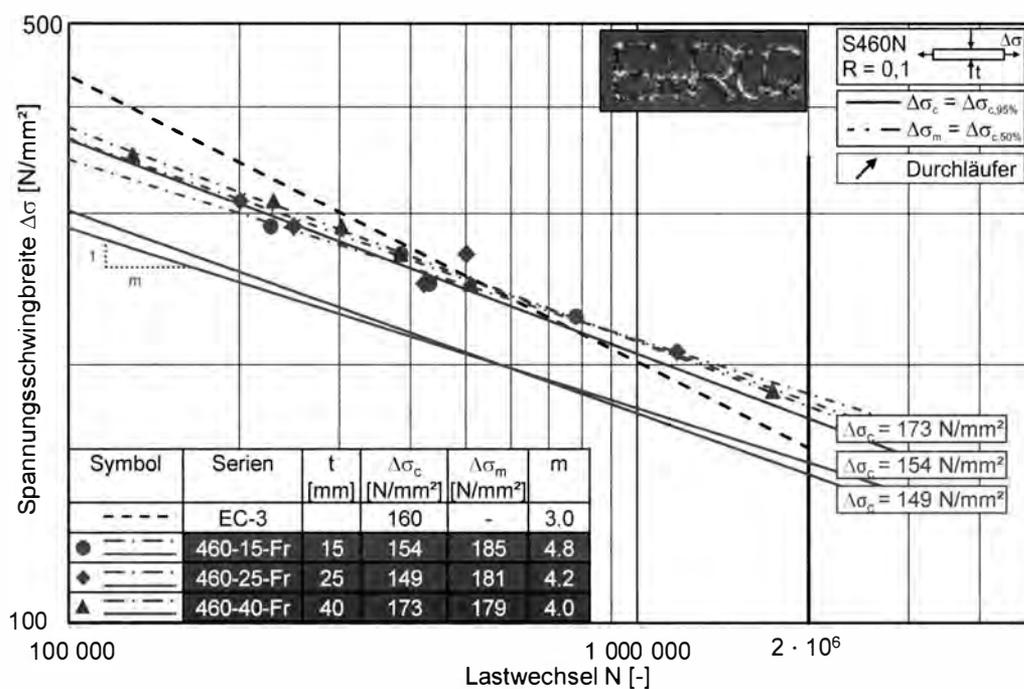


Bild 76 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gefräster Versuchskörper der Stahlsorte S460N

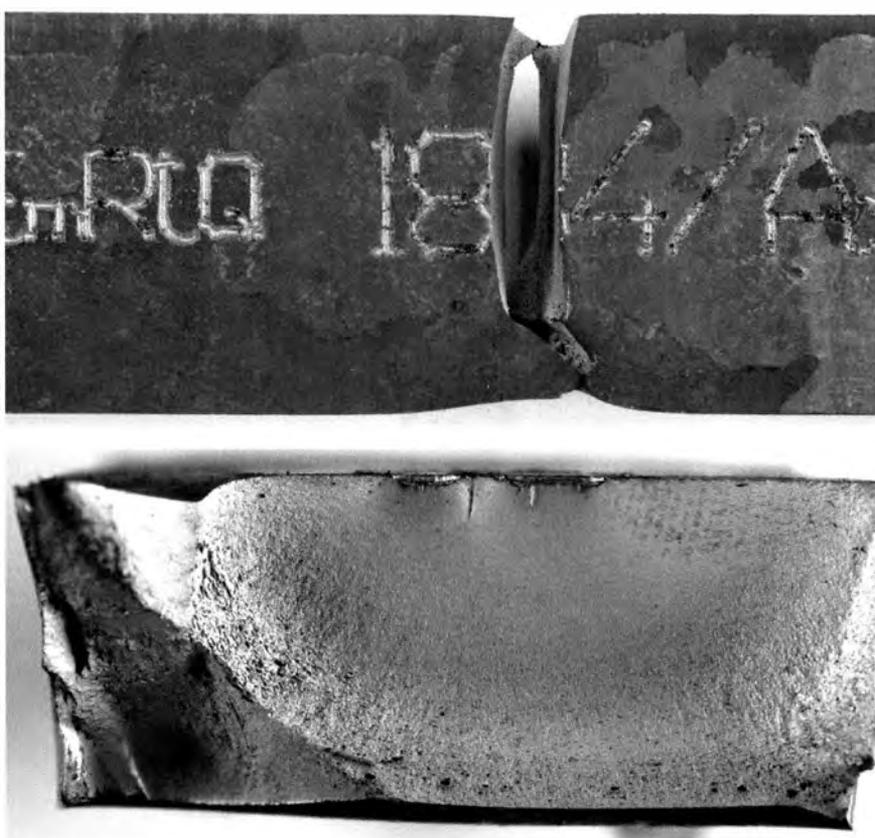


Bild 77 Exemplarische Bruchbilder des gefrästen Prüfkörpers 460-25-Fr-01

3.5.5 Plasmamarkieren

3.5.5.1 S355J2

Die Ergebnisse der plasmamarkierten Versuchskörper aus S355J2 sind in Tabelle 16 und Bild 78 dargestellt. Im Vergleich zu den gefrästen und gestempelten Versuchskörpern wurden für die plasmamarkierten Versuchskörper aus S355J2 die meisten Durchläufer erzielt. Die Ermüdungsfestigkeiten für die 15 mm und 25 mm dicken Prüfkörper liegen bei $\Delta\sigma_{c,95\%} = 139 \text{ N/mm}^2$ und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 180 \text{ N/mm}^2$ (rote und grüne Volllinie).

Die Versuchskörper mit einer Blechdicke von 40 mm zeigen ein nicht nachvollziehbares Verhalten, so dass sich eine Wöhlerlinie nicht sinnvoll ermitteln ließ, siehe Bild 78. Die Mittelwertkurve der Wöhlerlinie wurde dennoch mit einer festen Steigung von $m = 3,0$ ausgewertet und liefert einen Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,50\%} = 175 \text{ N/mm}^2$. Bereits ab relativ hohen Belastungen mit Oberspannungen von 75 % der gemessenen Streckgrenze nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1 oder geringer stellen sich Durchläufer mit fünf Millionen Lastwechseln ein. Durch eine Erhöhung der Oberspannung von nur 5 % auf 80 % der gemessenen Streckgrenze wurden für Prüfkörper 355-40-PI-05 dahingegen lediglich 1.024.000 Lastwechsel erzeugt, für einen weiteren Versuchskörper 355-40-PI-07 auf dem identischen Lastniveau jedoch nur 203.953 Lastwechsel. Beide Prüfkörper versagten infolge eines Rissausgangs von der Markierung. Die Bruchbilder der beiden Prüfkörper 355-40-PI-05 und 355-40-PI-07 sind in Bild 79 dargestellt. Die Restbruchfläche des Versuchskörpers 355-40-PI-05 (rechts), dem Prüfkörper mit 1.024.000 Lastwechseln ist deutlich kleiner als bei Versuchskörper 355-40-PI-07. Dies deutet auf eine deutlich längere stabile Risswachstumsphase hin. Der Grund für die deutlich höheren Bruchlastwechselzahlen des Prüfkörpers 355-40-PI-07 konnte nicht geklärt werden.

Es ist davon auszugehen, dass für die 40 mm dicken Prüfkörper aufgrund des deutlich größeren Verhältnisses zwischen Blechdicke zu Markiertiefe die durch das Plasmamarkieren eingebrachte Kerbe nicht zwingend als technischer Anriss gewertet werden kann, wodurch sich die Lebensdauer in eine undefinierte Rissinitiierungsphase und eine Rissfortschrittsphase aufteilt. Die im Wesentlichen von dem Grundmaterial und der Geometrie der Kerbe abhängige Phase der Rissinitiierung führt zu größeren Streuungen, da sich Inhomogenitäten stärker in der Gesamtzyklenzahl ausprägen [8].

Die im Vergleich zu den weiteren Prüfserien anderer Markiermethoden hohen Streuungen der plasmamarkierten Versuchskörper aus S355J2 lassen sich anhand der Standardabweichungen der einzelnen Serien nachvollziehen. Während die Standardabweichungen für die 15 mm und 25 mm dicken Prüfkörper bei $s(\log N) = 0,1$ zwar etwas höher liegen als bei entsprechenden Serien anderer Markiermethoden, beträgt die Standardabweichung für die Serie mit 40 mm dicken Blechen $s(\log N) = 0,35$ bei einer Auswertung der Wöhlerlinie mit einer festgelegten Neigung von $m = 3,0$ und liegt damit deutlich höher.

Tabelle 16 Versuchsparameter und -ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper aus S355J2

Probennr.	Zustand	σ_{\max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastwechsel [-]	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, R_{eH} = 398 N/mm²					
355-15-PI-03	Plasma	0.54	193.4	5 000 000	D
355-15-PI-05	Plasma	0.65	232.8	5 000 000	D
355-15-PI-08	Plasma	0.70	250.7	743 505	M
355-15-PI-04	Plasma	0.75	268.7	417 800	M
355-15-PI-02	Plasma	0.85	304.5	457 020	M
355-15-PI-06	Plasma	0.90	322.4	251 126	M
355-15-PI-07	Plasma	0.95	340.3	189 654	M
Blechdicke t = 25 mm, R_{eH} = 371 N/mm²					
355-25-PI-02	Plasma	0.65	217.0	2 242 320	M
355-25-PI-06	Plasma	0.70	233.7	5 000 000	D
355-25-PI-04	Plasma	0.75	250.4	566 817	M
355-25-PI-08	Plasma	0.77	255.6	5 000 000	D
355-25-PI-07	Plasma	0.80	267.1	678 597	M
355-25-PI-03	Plasma	0.85	283.8	367 069	M
355-25-PI-05	Plasma	0.90	300.5	292 625	M
Blechdicke t = 40 mm, R_{eH} = 397 N/mm²					
355-40-PI-02	Plasma	0.65	232.2	5 000 000	D
355-40-PI-06	Plasma	0.75	268.0	5 000 000	D
355-40-PI-05	Plasma	0.80	285.8	1 024 000	M
355-40-PI-07	Plasma	0.80	284.4	203 953	M
355-40-PI-04	Plasma	0.85	303.7	396 080	M

M = Rissausgang von der Markierung
D = Durchläufer

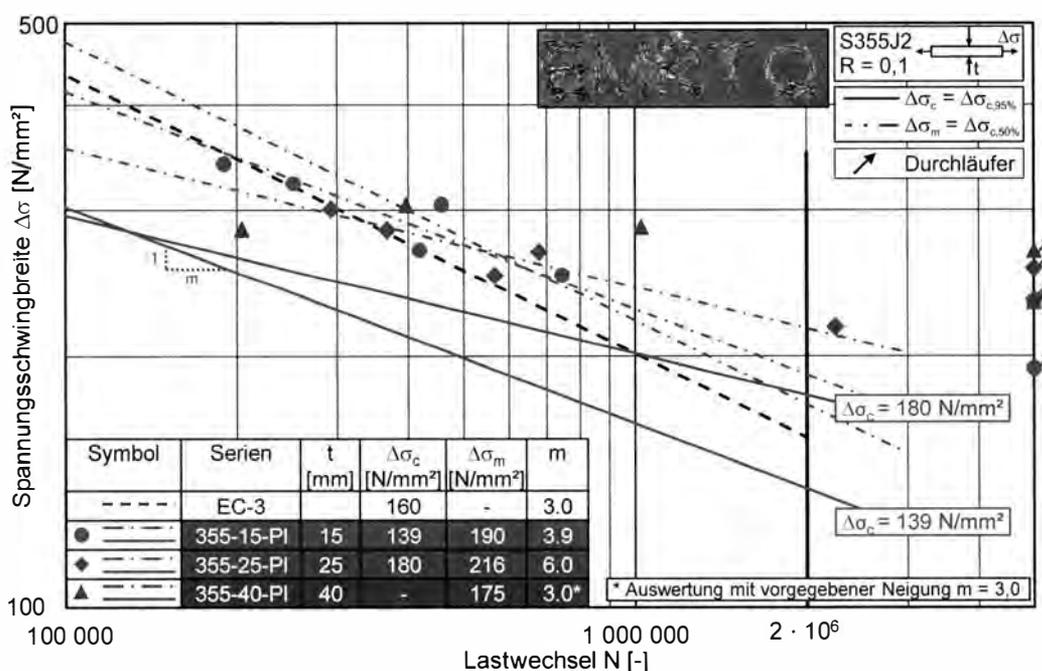


Bild 78 Ergebnisse der Ermüdungsversuche plasmamarkierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2

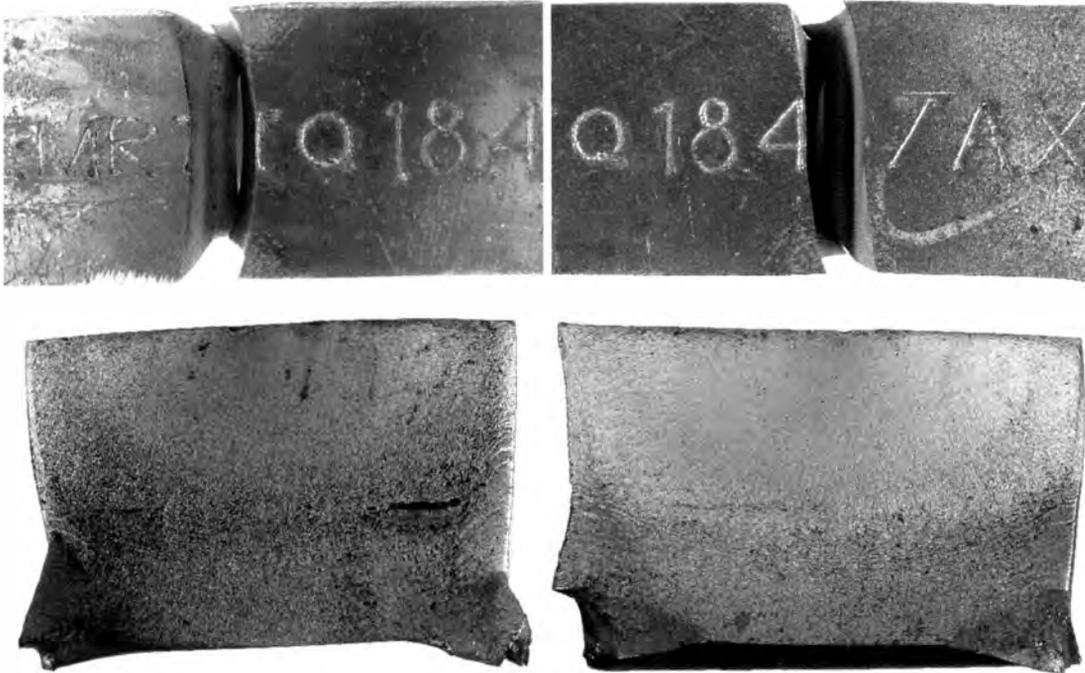


Bild 79 Exemplarische Bruchbilder der plasmamarkierten Prüfkörper 355-40-PI-07 (links) und 355-40-PI-05 (rechts)

3.5.5.2 S460N

Die Ergebnisse der plasmamarkierten Versuchskörper aus S460N zeigen deutlich geringere Streuungen als vergleichbare Versuchskörper aus S355J2. Die Streuungen der Ergebnisse sind mit Werten von $s(\log N) = 0,04$ für die Versuchskörper der Dicke 40 mm und $s(\log N) = 0,08$ (15 mm) sowie $s(\log N) = 0,05$ (25 mm) als gering einzustufen.

Die in Tabelle 17 dargestellten und in Bild 80 in Form von Wöhlerlinien ausgewerteten Ergebnisse liefern Ermüdungsfestigkeiten von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 129 \text{ N/mm}^2$ für Proben der Blechdicke 15 mm (rote Volllinie) bis $\Delta\sigma_{c,95\%} = 143 \text{ N/mm}^2$ für Versuchskörper der Dicke 40 mm (blaue Volllinie). Die Ermüdungsfestigkeit der 25 mm dicken Prüfkörper ist mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 136 \text{ N/mm}^2$ zwischen diesen Werten.

Aufgrund der vorhandenen verwertbaren Probenanzahl der Prüfkörper mit einer Blechdicke von 40 mm war eine Auswertung der Wöhlerlinie mit einer variablen Neigung nicht sinnvoll, weshalb diese Serie mit einer vorgegebenen Wöhlerlinienneigung von $m = 3,0$ ausgewertet wurde. Zwei der sieben getesteten Versuchskörper waren Durchläufer. Diese beiden Durchläufer 460-40-PI-03 und 460-40-PI-04 wurden mit einer relativ geringen Oberspannung von 43 % bzw. 48 % der Streckgrenze nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1 getestet.

Versuchskörper 460-40-PI-06 versagte bei einer Ermüdungsbeanspruchung in Höhe von $\Delta\sigma = 310 \text{ N/mm}^2$ nach 992.551 Lastwechseln im Grundmaterial mit einem Rissausgang in der Ausrundung des Prüfkörpers, siehe Bild 81.

Tabelle 17 Versuchsparameter und –ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper aus S460N

Probenr.	Zustand	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastwechsel [-]	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, R_{eH} = 502 N/mm²					
460-15-PI-05	Plasma	0.37	165.6	1 163 433	M
460-15-PI-03	Plasma	0.38	173.9	1 144 117	M
460-15-PI-04	Plasma	0.49	219.4	573 029	M
460-15-PI-02	Plasma	0.55	248.4	248 725	M
460-15-PI-01	Plasma	0.63	285.7	156 639	M
Blechdicke t = 25 mm, R_{eH} = 488 N/mm²					
460-25-PI-04	Plasma	0.40	175.7	1 395 568	M
460-25-PI-03	Plasma	0.50	219.6	528 378	M
460-25-PI-05	Plasma	0.57	248.4	449 007	M
460-25-PI-02	Plasma	0.60	263.5	320 844	M
460-25-PI-01	Plasma	0.65	285.5	252 612	M
Blechdicke t = 40 mm, R_{eH} = 530 N/mm²					
460-40-PI-03	Plasma	0.43	207.0	5 000 000	D
460-40-PI-04	Plasma	0.48	227.7	5 000 000	D
460-40-PI-05	Plasma	0.52	248.4	483 174	M
460-40-PI-02	Plasma	0.56	269.1	336 949	M
460-40-PI-01	Plasma	0.61	289.8	314 246	M
460-40-PI-06	Plasma	0.65	310.5	992 551	G
460-40-PI-07	Plasma	0.65	310.5	286 764	M

M = Rissausgang von der Markierung
D = Durchläufer
G = Rissausgang im Grundmaterial, nicht von der Markierung ausgehend

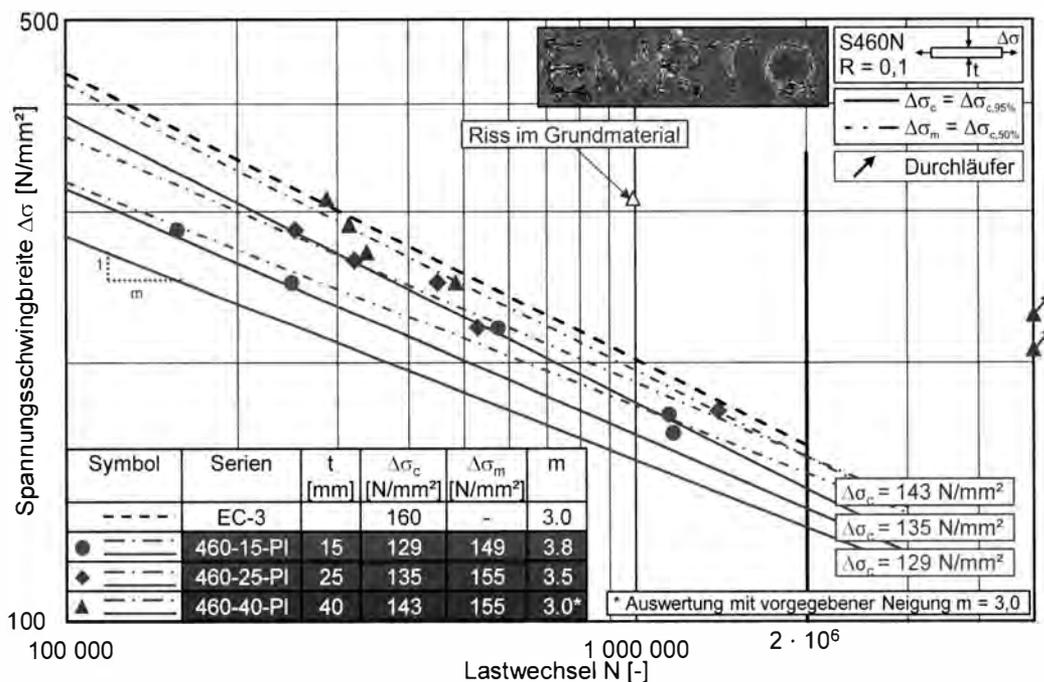


Bild 80 Ergebnisse der Ermüdungsversuche plasmamarkierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N



Bild 81 Exemplarische Bruchbilder des plasmamarkierten Prüfkörpers 460-40-PI-06 mit Rissausgang im Grundmaterial

3.5.6 Nadeln

Die Ergebnisse an genadelten Versuchskörpern zeigen ein ausgesprochenes gutmütiges Verhalten der Versuchskörper. Die je zwei getesteten Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und S460N mit Blechdicken von jeweils 15 und 25 mm versagten entweder im Grundmaterial oder konnten als Durchläufer deklariert werden, obwohl sie durch verhältnismäßig hohe Ermüdungsbeanspruchungen $\Delta\sigma = 283\text{-}319\text{ N/mm}^2$ belastet wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 und Bild 82 dargestellt.

Die hohen ertragbaren Lastwechselzahlen bei den hohen Spannungsschwingbreiten lassen den Schluss zu, dass die hier untersuchten Nadelmarkierungen nahezu keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben.

Tabelle 18 Versuchsparameter und –ergebnisse genadelter Versuchskörper

Probennr.	Zustand	σ_{\max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Lastwechsel [-]	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, $R_{eH} = 398\text{ N/mm}^2$					
355-15-Na-01	genadelt	0,89	319,5	1.275.596	G
355-15-Na-02	genadelt	0,89	319,5	858.630	G
Blechdicke t = 25 mm, $R_{eH} = 371\text{ N/mm}^2$					
355-25-Na-01	genadelt	0,85	283,8	5.000.000	D
355-25-Na-02	genadelt	0,96	319,5	723.095	G
Blechdicke t = 15 mm, $R_{eH} = 502\text{ N/mm}^2$					
460-15-Na-01	genadelt	0,73	318,8	563.659	G
460-15-Na-03	genadelt	0,73	318,8	690.306	G
Blechdicke t = 25 mm, $R_{eH} = 488\text{ N/mm}^2$					
460-25-Na-01	genadelt	0,73	318,8	554.532	G
460-25-Na-02	genadelt	0,73	318,8	425.570	G
D = Durchläufer					
G = Rissausgang im Grundmaterial, nicht von der Markierung ausgehend					

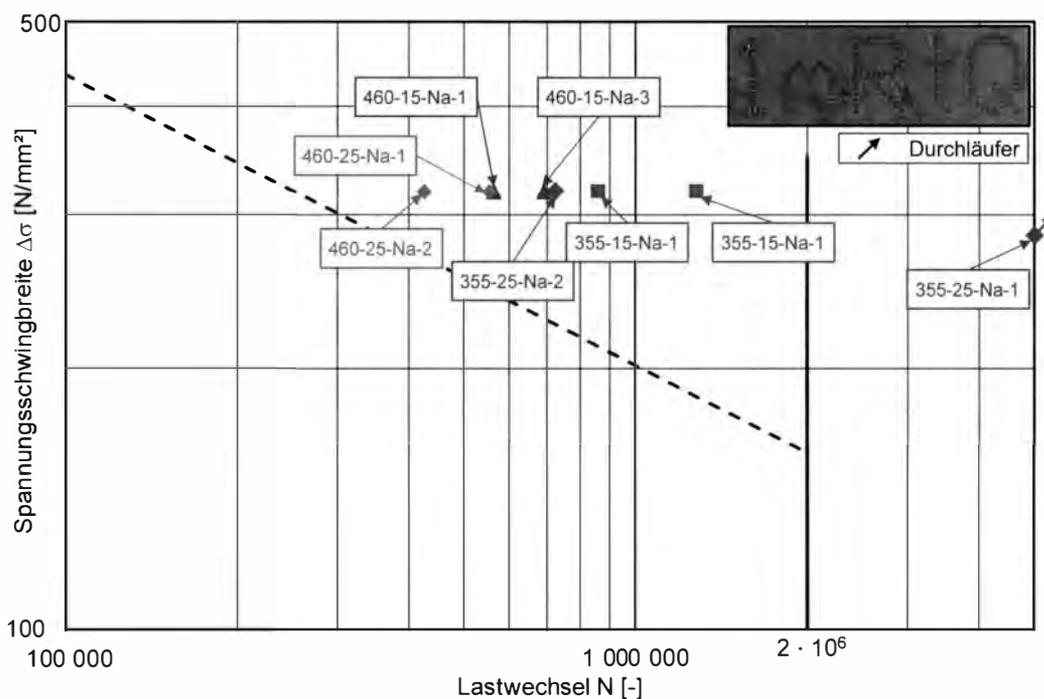


Bild 82 Ergebnisse der Ermüdungsversuche nadelmarkierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und S460N

3.6 Zusammenfassung

Im Rahmen von Ermüdungsversuchen wurde der Einfluss der vier Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf die Ermüdungsfestigkeit von Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2 und S460N und der Blechdicken 15, 25 und 25 mm untersucht.

Die erzielten Bruchlastwechselzahlen zeigen einen deutlichen Einfluss der drei Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren auf die Ermüdungsfestigkeit der getesteten Versuchskörper. Für die untersuchten Versuchskörper mit genadelten Markierungen konnte hingegen kein Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Diese Versuchskörper versagten entweder im Grundmaterial mit einem Riss, welcher nicht von der Markierung ausging, oder erzielten fünf Millionen Lastwechsel ohne sichtbaren Riss und konnten somit als Durchläufer deklariert werden.

Die Höhe des Einflusses der Markiermethoden und der damit verbundenen Verringerung der Ermüdungsfestigkeit ist im Wesentlichen abhängig von der Geometrie der durch die Kennzeichnungsmethoden eingebrachten Kerben sowie von der Materialdicke der Prüfkörper. Die untersuchten Versuchskörper zeigen keinen negativen Blechdickeneffekt, wie es bei geschweißten Kerbdetails der Fall ist. Mit größeren Blechdicken wurden teilweise höhere Ermüdungsfestigkeiten, vor allem für die Versuchsserien mit gestempelten Versuchskörpern erzielt. Zusätzlich kann die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit auch für die gefrästen Versuchsserien der Stahlsorte S355J2 sowie die plasmamarkierten Versuchsserien der Stahlsorte S355 beobachtet werden. Mit zunehmender Markiertiefe verringert sich die Ermüdungsfestigkeit. Neben der Markiertiefe können vergleichsweise scharfe Kerben mit scharfkantigen Übergängen zwischen Grundmaterial und Kerbe und geringen Rundungsradien im Kerbgrund sowie vergleichsweise raue Kerboberflächen als

negative Faktoren benannt werden. Ein Einfluss der Streckgrenze auf die Ermüdungsfestigkeit konnte hingegen nicht ermittelt werden.

Die für die untersuchten Versuchsserien erzielten Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechseln liegen mit mindestens $\Delta\sigma_{c,95\%} = 125 \text{ N/mm}^2$ für gestempelte Versuchskörper der Blechdicke 15 mm aus S355J2 auf einem hohen Niveau im Vergleich zum Europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [2]. Die Ergebnisse aller untersuchten Versuchsserien sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Kennzeichnungsmethode	Stahlsorte	Blechdicke [mm]	Serie	Anzahl Versuche	Streckgrenze R_{eH} [N/mm ²]	Spannungsschwingbreite		Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln		
						$\Delta\sigma_{min.}^*$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{max.}^{**}$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{c,50\%}$ [N/mm ²]	$\Delta\sigma_{c,95\%}$ [N/mm ²]	m [-]
Hartes Stempeln	S355J2	15	355-15-St	7	398	143	305	145	132	2,9
		25	355-25-St	5	371	167	284	158	137	2,8
		40	355-40-St	7	397	167	322	231	192	4,0
	S460N	15	460-15-St	6	502	124	248	132	125	3,2
		25	460-25-St	6	488	144	310	173	155	3,5
		40	460-40-St	7	530	207	323	235	216	5,3
Fräsen	S355J2	15	355-15-Fr	7	458	206	350	202	191	4,3
		25	355-25-Fr	6	393	212	301	225	210	6,8
		40	355-40-Fr	6	415	262	318	253	231	5,1
	S460N	15	460-15-Fr	4	502	228	290	185	154	4,8
		25	460-25-Fr	5	488	207	311	181	149	4,2
		40	460-40-Fr	6	530	187	352	179	173	4,0
Plasma- markieren	S355J2	15	355-15-PI	7	398	193	340	190	139	3,9
		25	355-25-PI	7	371	217	300	216	180	6,0
		40	355-40-PI	5	397	232	304	175	-	-
	S460N	15	460-15-PI	5	502	174	286	149	129	3,8
		25	460-25-PI	5	488	176	286	155	135	3,4
		40	460-40-PI	7	530	207	311	155	143	3,0
Nadeln	S355J2	15	355-15-Na	2	398	-	320	-	-	-
		25	355-25-Na	2	371	284	319	-	-	-
	S460N	15	460-15-Na	2	502	-	319	-	-	-
		25	460-25-Na	2	488	-	319	-	-	-

* kleinste untersuchte Spannungsschwingbreite innerhalb der Serie
** größte untersuchte Spannungsschwingbreite innerhalb der Serie

4 Bewertung der Ergebnisse

4.1 Diskussion der Versuchsergebnisse

Nachdem in Kapitel 3.5 die Ergebnisse der Ermüdungsversuche dargestellt wurden, werden diese im Nachfolgenden bewertet und verglichen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen ein insgesamt nachvollziehbares Verhalten der Versuchskörper. Lediglich die durch Nadelmarkierungen gekennzeichneten Versuchskörper zeigen nahezu keine Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens infolge der eingebrachten Kerbe. Alle getesteten Versuchskörper mit Nadelmarkierungen versagten im Grundmaterial mit einem Riss, welcher nicht von der Markierung ausging oder erzielten eine Lastwechselzahl von fünf Millionen ohne sichtbaren Riss, siehe Bild 82. Die Rissausgänge im Grundmaterial belegen, dass die Lebensdauer nicht durch die Kerbe der Nadelmarkierung beeinflusst wird. Die erzielten Lastwechselzahlen sind somit konservativ für einen potentiellen Rissausgang von der Nadelmarkierung.

Des Weiteren ist für die durchgeführten Untersuchungen kein negativer Blechdickeneffekt festzustellen, wie beispielsweise bei geschweißten Verbindungen [21–23]. Im Gegensatz dazu ist die Tendenz zu beobachten, dass sich die Ermüdungsfestigkeit mit ansteigender Blechdicke für einzelne Versuchsserien vergrößert.

Wie in Kapitel 3.5.1 erläutert, wurden die Versuche in der Regel mit einer variablen Wöhlerlinienneigung ausgewertet. Die Neigung der Wöhlerlinien reicht hierbei von $m = 2,8$ für gestempelte Versuchskörper mit einer Blechdicke von 25 mm der Stahlsorte S355J2 bis $m = 6,5$ für gefräste Versuchskörper mit einer Blechdicke von 25 mm der Stahlsorte S355J2. Die Neigung der Wöhlerlinie gibt Auskunft über das Ermüdungsverhalten einer eingebrachten Kerbe. Mit größerer Wöhlerlinienneigung vergrößert sich der Anteil der Rissinitiierungsphase an der Gesamtlebensdauer. Die in Kapitel 4.1.2 bis 0 dargestellten Wöhlerlinien enthalten zusätzlich zur Wöhlerlinie der Kerbfallklasse 160 des Europäischen Kerbfallkatalogs auch diejenige der Kerbfallklasse 125, da für die vorliegenden Versuchsergebnisse Ermüdungsfestigkeiten in diesen Bereichen erzielt wurden.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt detailliert für die Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren und getrennt für die durchgeführten Versuche an nadelmarkierten Versuchskörpern.

4.1.1 Nadelmarkierung

Der Einfluss der nadelmarkierten Versuchskörper konnte für die durchgeführten Untersuchungen als vernachlässigbar erachtet werden. Die Versuchskörper versagten mit Ausnahme eines Durchläufers im Grundmaterial ohne einen Rissausgang von der Markierung. Aufgrund der verhältnismäßig großen Anzahl an Grundmaterialbrüchen können die Ergebnisse zum einen als konservativ für einen Rissausgang von der Nadelmarkierung, zum anderen als Referenz für das Ermüdungsverhalten von Grundmaterialkerben (z.B. Schnittkanten, Walzoberfläche) betrachtet werden. Die sieben getesteten nadelmarkierten Versuchskörper, welche im Grundmaterial versagten, zeigten Lastwechselzahlen zwischen 425.570 und 1.275.596. Diese großen Streuungen sind unabhängig von den unterschiedlichen

Blechdicken und Stahlsorten vor allem auf die höheren Fertigungstoleranzen in der Versuchskörperherstellung zwischen dem eingespannten und verjüngten Bereich zurückzuführen. Der Rissausgang der Grundmaterialbrüche ging in allen Fällen von dieser Ausrundung aus, beginnend von einer der Prüfkörperkanten, vgl. Bild 83.



Bild 83 Exemplarisches Bruchbild (oben) mit Bruchfläche (unten) des Prüfkörper 355-15-Na-1

4.1.2 Blechdicke 15 mm

In Bild 84 und Bild 85 sind die Versuchsergebnisse der Prüfkörper mit einer Blechdicke von 15 mm der Stahlsorte S355J2 und S460N vergleichend ausgewertet. Die geringsten Ermüdungsfestigkeiten ergeben sich bei beiden Stahlsorten für gestempelte Versuchskörper mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 132 \text{ N/mm}^2$ (S355J2) bzw. $\Delta\sigma_{c,95\%} = 125 \text{ N/mm}^2$ (S460N). Die Ermüdungsfestigkeit dieser Serien liegt um 37 % (S355J2) bzw. 25 % (S460N) höher als die vergleichbare Serie aus den Voruntersuchungen mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 103 \text{ N/mm}^2$, vgl. Bild 39. Der Unterschied lässt sich vor allem auf die vergleichsweise tiefen Stempelmarkierungen im Rahmen der Voruntersuchungen mit Markiertiefen von bis zu 1,2 mm zurückführen und ist daher als plausibel einzustufen.

Für die gefrästen Versuchskörper liegt der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit bei $\Delta\sigma_{c,95\%} = 191 \text{ N/mm}^2$ (S355J2) bzw. $\Delta\sigma_{c,95\%} = 154 \text{ N/mm}^2$ (S460N), siehe Bild 84 und Bild 85. Für die gefrästen Versuchskörper resultiert die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit für die Stahlsorte S460N um 20 % gegenüber der Stahlsorte S355J2 aus den unterschiedlichen Markiertiefen der Versuchskörper beider Stahlsorten, siehe Kapitel 3.5.4. Weiterhin ist festzustellen, dass der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit der Versuchsserie 355-15-Fr mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 191 \text{ N/mm}^2$ um 40 % höher liegt als die vergleichbare Serie aus den Voruntersuchungen mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 137 \text{ N/mm}^2$, siehe Bild 39. Die Markiertiefe der Prüfkörper aus den Voruntersuchungen wurde zu 0,2-0,3 mm ermittelt, siehe Bild 33. Dies entspricht einer ähnlichen Markiertiefe im Vergleich zu den aktuellen Untersuchungen (355-15-Fr und 460-15-Fr) und erklärt somit nicht die unterschiedlich hohen Ermüdungsfestigkeiten. Aus diesem Grund wurde die Tiefe der Fräsmarkierungen aus den Voruntersuchungen erneut mithilfe der in den Hauptuntersuchungen genutzten Mikroskopie gemessen, siehe Bild 86.

Die erneute Messung ergab eine Markiertiefe im Mittel von ca. 550 μm . Die neu gemessene und genauer ermittelte Markiertiefe ist in Bezug auf die unterschiedlichen Ermüdungsfestigkeiten als plausibel zu bewerten.

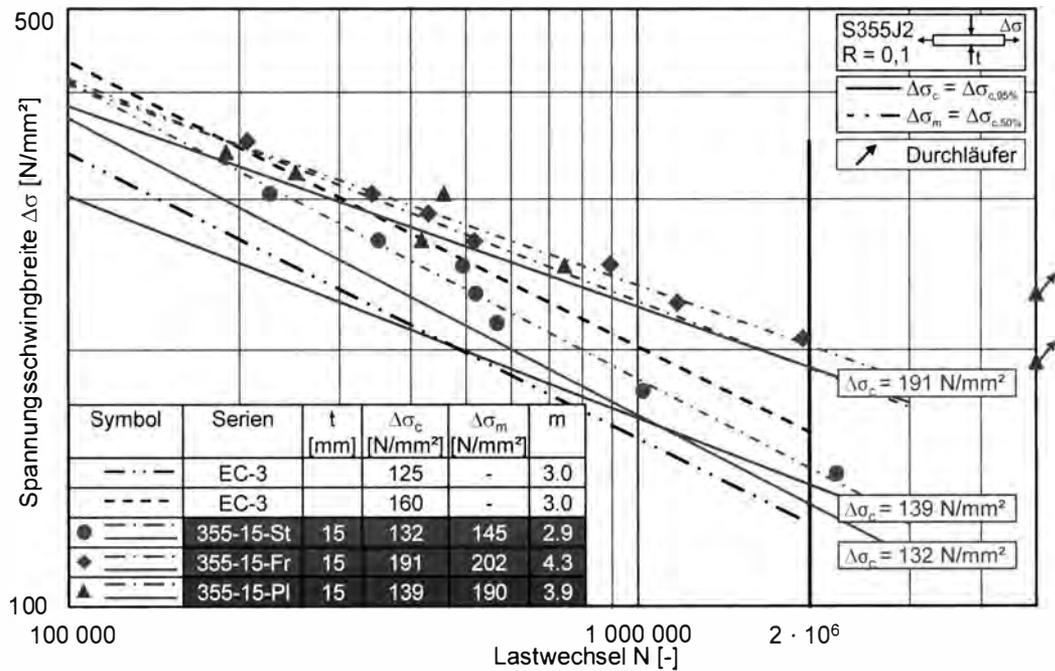


Bild 84 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 mit Blechdicke 15 mm

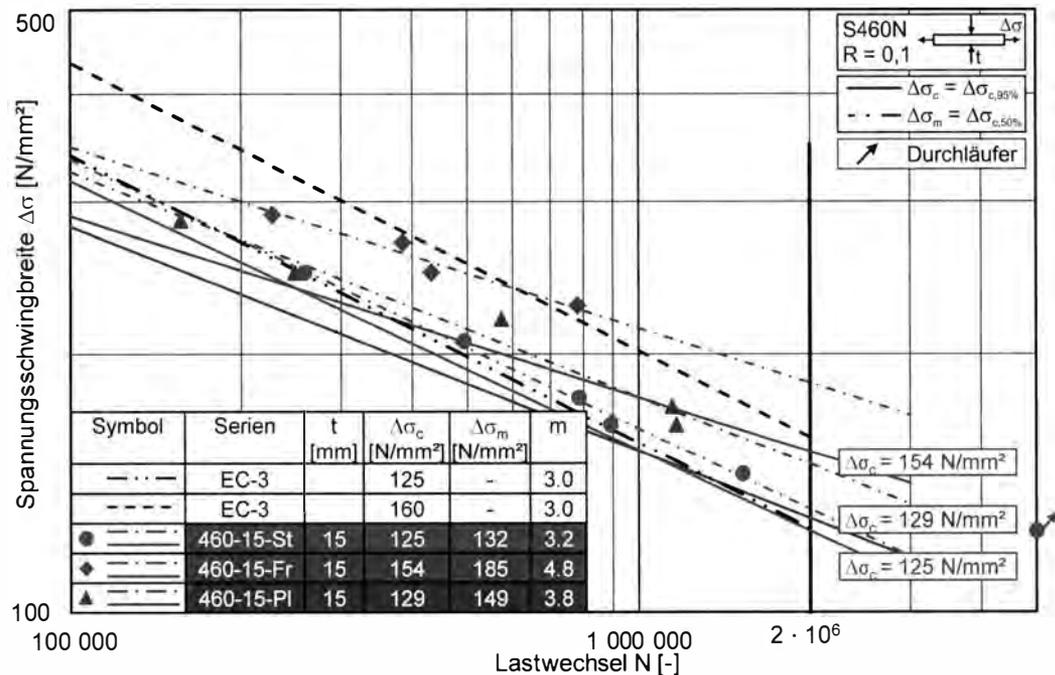
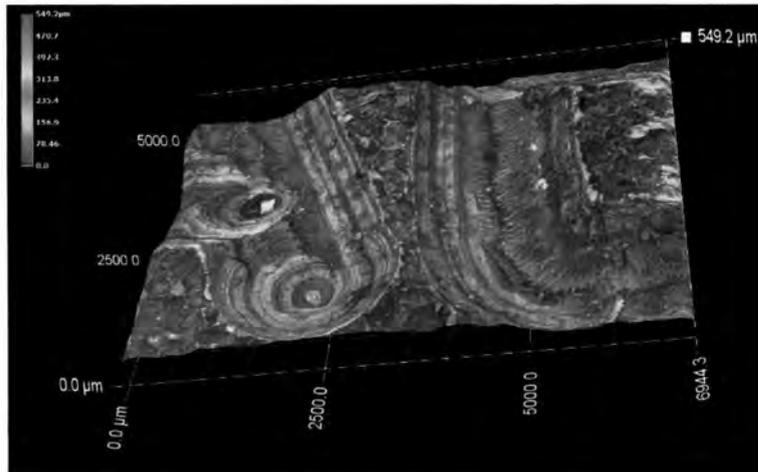


Bild 85 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit Blechdicke 15 mm

So ergibt sich aufgrund der größeren Markiertiefe von 550 μm im Vergleich zu den aktuell untersuchten Prüfserien eine geringere Ermüdungsfestigkeit. Die Verringerung der Ermüdungsfestigkeit um 13 % gegenüber der Versuchsserie 460-15-Fr von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 154 \text{ N/mm}^2$ auf $\Delta\sigma_{c,95\%} = 137 \text{ N/mm}^2$ (Voruntersuchungen) ist daher

nachvollziehbar und bestätigt die Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens.



daher nur eine erste Einschätzung der Ermüdungsfestigkeit und der Einordnung in eine Kerbfallklasse vorgenommen werden, wenngleich die generierten Ergebnisse mit Literaturwerten nachvollzogen werden können.

4.1.3 Blechdicke 25 mm

Für die Versuchskörper der untersuchten Blechdicke 25 mm zeigt sich im Vergleich zu den 15 mm dicken Versuchskörpern ein vergleichbares Ermüdungsverhalten. Die Auswertungen der Ergebnisse für die Versuchskörper der Blechdicke 25 mm sind in Bild 87 (S355J2) und Bild 88 (S460N) dargestellt.

Für Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 ergibt sich die geringste Ermüdungsfestigkeit für gestempelte Versuchskörper zu $\Delta\sigma_{c,95\%} = 137 \text{ N/mm}^2$ (355-25-St). Aufgrund der geringen Tiefe der Fräsmarkierung ergibt sich eine deutlich größere Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 210 \text{ N/mm}^2$ (355-25-Fr). Die Ermüdungsfestigkeit der plasmamarkierten Versuchskörper liegt zwischen den beiden Prüfserien mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 180 \text{ N/mm}^2$ (355-25-PI).

Im Gegensatz dazu liegen die Ergebnisse der Versuchsserien der Stahlsorte S460N in einem deutlich schmaleren Streuband, siehe Bild 88. Die Ermüdungsfestigkeit der gestempelten Versuchskörper $\Delta\sigma_{c,95\%} = 155 \text{ N/mm}^2$ (460-25-St) ist vergleichbar mit der Ermüdungsfestigkeit der entsprechenden Prüfserie aus S355J2 (355-25-St).

Für die gefrästen Versuchskörper ergibt sich eine im Vergleich zur entsprechenden Versuchsserie aus S355J2 (355-25-Fr) deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 149 \text{ N/mm}^2$. Dies entspricht einer Abnahme der Ermüdungsfestigkeit von 29 % und ist wie bei der Prüfserie aus gefrästen Versuchskörpern der Blechdicke 15 mm (355-15-Fr und 460-15-Fr) auf die unterschiedliche Markiertiefe zurückzuführen.

Die plasmamarkierten Versuchskörper der Stahlsorte S460N zeigen mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 135 \text{ N/mm}^2$ (460-25-PI) eine deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit als die entsprechende Serie aus S355J2 mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 180 \text{ N/mm}^2$ (355-25-PI).

Im Vergleich zu den Versuchskörpern mit einer Blechdicke von 15 mm liegen die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit für die Versuchsserien mit Blechdicken von 25 mm im Bereich von hohen Kerbfallklassen. Für eine gezielte Einordnung in den Europäischen Kerbfallkatalog ist eine größere Anzahl an Versuchsergebnissen basierend auf praxisnahen variablen Markierparametern nötig. Die in den Versuchen ermittelten Streuungen der Ergebnisse innerhalb einer Versuchsserie sind mit Standardabweichungen zwischen $s(\log N) = 0,03$ und $s(\log N) = 0,11$ als vergleichsweise gering zu bewerten, so dass bei einer größeren Anzahl an Versuchen mit unterschiedlichen Parametern auch größere Streuungen möglich sind.

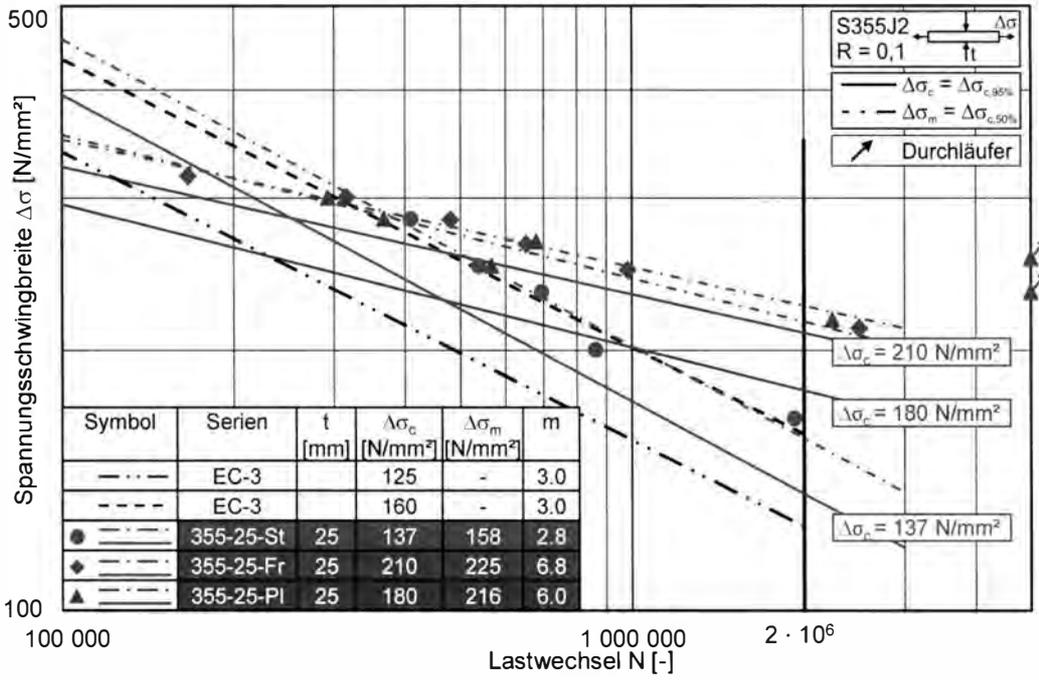


Bild 87 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 mit Blechdicke 25 mm

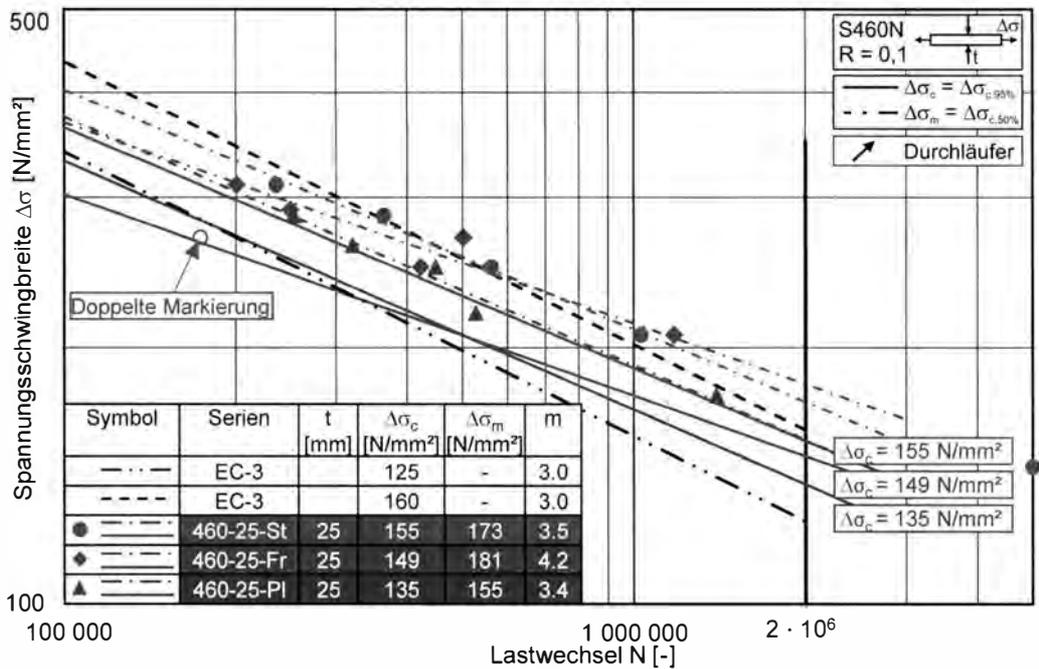


Bild 88 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit Blechdicke 25 mm

4.1.4 Blechdicke 40 mm

Die Versuchskörper der Blechdicke 40 mm zeigen den geringsten Einfluss aller untersuchten Blechdicken infolge der aufgetragenen Kerben. Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit liegen mit Ausnahme der plasmamarkierten Versuchskörper zwischen 8 % (355-40-St, $\Delta\sigma_{c,95\%} = 192 \text{ N/mm}^2$) und 44 % (355-40-Fr, $\Delta\sigma_{c,95\%} = 231 \text{ N/mm}^2$) über der höchsten Kerbfallklasse 160 nach DIN EN 1993-1-9 [2], siehe Bild 89. Wie in Kapitel 3.5.5.1 erläutert, konnte für die plasmamarkierten Prüfkörper der Stahlsorte S355J2 aufgrund der Streuung der Versuchsergebnisse keine sinnvolle Wöhlerlinienneigung ermittelt werden. Die Prüfkörper zeigten ein nicht nachvollziehbares Verhalten. Drei der getesteten Versuchskörper versagten unter nahezu gleicher Ermüdungsbeanspruchung nach erzielten Lastwechseln zwischen 203.953 und 1.024.000. Dieses große Streuband ist als ungewöhnlich zu betrachten. Der Grund für dieses Verhalten konnte nicht geklärt werden.

Die plasmamarkierten Versuchskörper der Stahlsorte S460N erzielten eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 143 \text{ N/mm}^2$. Bei allen weiteren Prüfserien mit Materialdicken von 40 mm ergeben sich Ermüdungsfestigkeiten von über 160 N/mm^2 , so dass die Ergebnisse im Bereich von hohen Kerbfallklassen liegen. Trotz größerer Steigungen der Wöhlerlinien schneiden sich diese nicht mit der entsprechenden Wöhlerlinie der Kerbfallklasse 125, siehe Bild 89 und Bild 90.

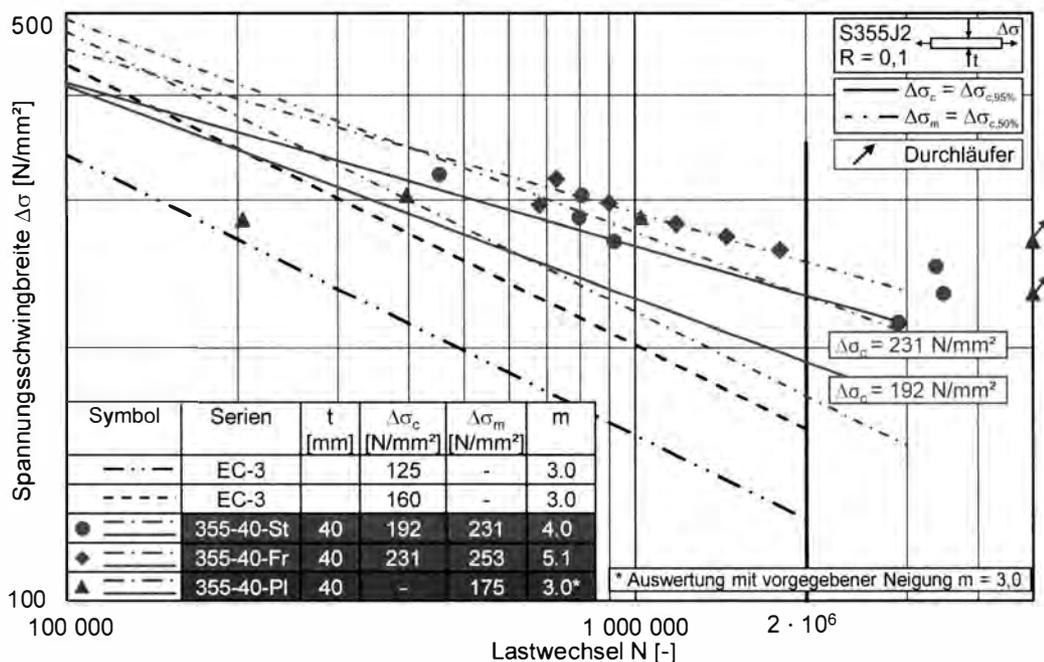


Bild 89 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 mit Blechdicke 40 mm

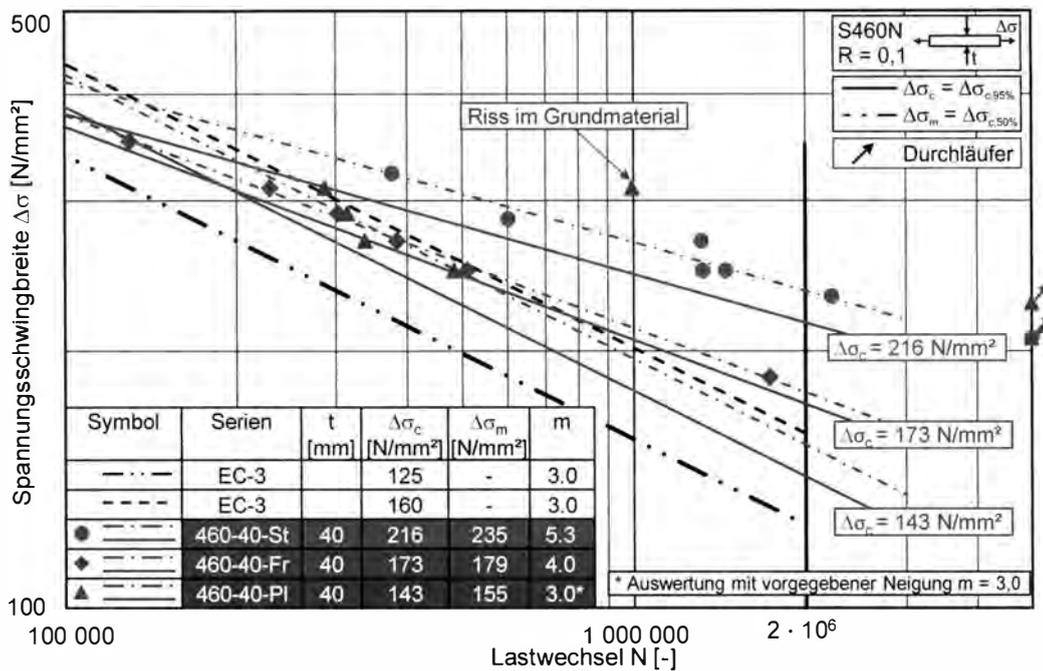


Bild 90 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit Blechdicke 40 mm

4.2 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Ein Hauptergebnis des Forschungsvorhabens ist die Gewährleistung der Sicherheit von, mittels verschiedener Methoden gekennzeichneten, Stahlbauteilen. Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen lässt sich für Markierungen mittels der in Kapitel 3.3.5 beschriebenen Markierparameter und Kennzeichnungssysteme ein zwar eindeutiger, aber vergleichsweise geringer Einfluss der durch die Markierungen eingebrachten Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit der untersuchten Versuchskörper feststellen. Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass für die betrachteten in der Praxis eingesetzten und üblichen Markiermethoden und -verfahren und für die untersuchten Blechdicken und Stahlsorten der Einfluss der Kennzeichnungen auf die Ermüdungsfestigkeit vergleichsweise gering ist. Mit Ausnahme der Nadelmarkierung lässt sich für alle Markierverfahren ein Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit erkennen, welcher allerdings in relativen hohen Kerbfallklassen resultiert.

Aufgrund hoher Ermüdungsfestigkeits werden für den Ermüdungsnachweis von Stahlbauteilen in der Regel andere Kerbfälle, wie beispielsweise geschweißte Verbindungen, maßgebend sein, so dass die hier untersuchten Markiermethoden für einen Ermüdungsnachweis nicht zwingend ausschlaggebend sind. Diese bisher nicht vorhandenen Erkenntnisse lassen sich durch weitere experimentelle und numerische Parameterstudien auch auf weitere Blechdicken, Stahlsorten und Markiergeometrien erweitern, so dass letztendlich Empfehlungen zur Einordnung in Kerbfallklassen oder Empfehlungen für unkritische Markierparameter erarbeitet werden können.

Der wirtschaftliche Nutzen begründet sich in einem reduzierten Planungs- sowie Fertigungsaufwand, wenn die Anbringung und Kontrolle von dauerhaften Kennzeichnungsmethoden nicht zwingend geplant und durchgeführt werden muss.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im gegenwärtigen Stahlbau gewinnen effektive und effiziente Kennzeichnungsmethoden immer mehr an Bedeutung. Die Kennzeichnung von Bauteilen dient der Qualitätskontrolle, dem Schutz vor Fälschungen sowie der eindeutigen Identifizierbarkeit bei evtl. auftretenden Haftungsansprüchen. In der Fertigung und Produktion von Stahltragwerken ist eine Rückverfolgbarkeit von Bauteilen von der Herstellung bis zum Einbau und darüber hinaus nicht nur vorteilhaft, sondern normativ gefordert. Die für die Ausführung von Stahltragwerken anzuwendende Norm DIN EN 1090-2:2011-10 [1] fordert für Bauwerke der Ausführungsklasse EXC3 und EXC4 explizit die lückenlose Rückverfolgbarkeit von Bauteilen von der Lieferung bis zum Einbau, ohne dass die Aufbringung von dauerhaften Kennzeichnungen zu Beschädigungen des Bauteils führt. Harte Kennzeichnungsmethoden wie Hartprägungen, gebohrte oder gestanzte Markierungen sind nur zulässig für Stahlsorten des Festigkeitsbereiches bis einschließlich S355 und nur in festgelegten Bereichen, wo die Markierung keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat. Der Deutsche Bahn Standard (DBS) 918 002-02 [14] fordert zugleich eine Kennzeichnung von Form- und Stabstahl mit einem Gewicht von mehr als 15 kg/m mittels Schlagstempelung oder weiterer harter Kennzeichnungsmethoden, so dass derzeit unterschiedliche Forderungen zur Art der Markierung von Bauteilen existieren.

Eine Forderung nach dauerhaften Kennzeichnungsmethoden impliziert die Widerstandsfähigkeit der Markierungen gegenüber nachgeschalteter Fertigungsprozesse wie Strahlen, Beschichten oder Feuerverzinken sowie vor Witterungseinflüssen. Insbesondere eignen sich für eine dauerhafte Kennzeichnung Methoden wie Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren oder Nadeln. Diese Kennzeichnungssysteme erzeugen jedoch alle eine Oberflächenveränderung und hinterlassen eine Kerbe, welche einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben kann. Dieser Einfluss wurde bisher nicht im Detail untersucht, weshalb eine Einordnung der Markierkerben in den Europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [2] prinzipiell nicht möglich ist.

Aus diesen Gründen hat das Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen das Forschungsvorhaben „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ als IGF-Vorhaben 17218 N des Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. (DASt), gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der vier Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf die Ermüdungsfestigkeit markierter Stahloberflächen zu quantifizieren und zu bewerten.

Als Werkstoffe kamen je Markiermethode die im Brückenbau übliche Stahlsorte S355J2 sowie die Stahlsorte S460N zur Abdeckung eines über des in DIN EN 1090-2 zulässigen Festigkeitsbereichs zum Einsatz. Zur Untersuchung eines möglichen Blechdickeneffekts wurden je Markiermethode und Stahlsorte Prüfkörper der Blechdicken 15, 25 und 40 mm untersucht.

Die installierten Kennzeichnungen wurden, mit einer Ausnahme, für alle Blechdicken und Stahlsorten mit identischen Parametern hergestellt. Einzig bei der Fräsmarkierung unterschieden sich die installierten Kerben zwischen den Stahlsorten S355J2 und S460N.

Die Untersuchungen zur Geometrie und Beschaffenheit der installierten Kennzeichnungskerben wurden mithilfe von 3-D Computermodellen durchgeführt, welche mit einem geeigneten Mikroskop erzeugt wurden. Die Auswertungen der 3-D Modelle haben ergeben, dass jede der vier Kennzeichnungsmethoden eine unterschiedliche Kerbgeometrie erzeugt. Charakteristische Merkmale der Markierkerbe durch Hartes Stempeln sind besonders scharfe Kanten bzw. Übergänge zwischen dem Grundmaterial und der Kerbe, mit vergleichsweise glattwandigen Wangenflächen. In der Regel zeichnen sich Harte Stempelungen durch spitz zulaufende Markierkerben aus. Die Oberfläche der Kennzeichnung entspricht dabei im Wesentlichen dem Negativ des eingesetzten Stempels. Im Vergleich dazu wird bei der Fräsmarkierung eine deutlich rauere Oberfläche erzeugt, was insbesondere auf die hohe Arbeits- und Umdrehungsgeschwindigkeit des Fräswerkzeuges zurückzuführen ist. Die hier untersuchten Fräsmarkierungen produzieren eine geringere Markiertiefe als die weiteren Markierverfahren, wobei zwischen den etwas tieferen Markierungen der Prüfkörper aus S460N und den flacheren Markierungen der Prüfkörper aus S355J2 unterschieden werden muss. Plasmamarkierungen zeichnen sich durch Markierkerben aus, welche vor allem bei vergleichsweise geringen Markierstromstärken und somit auch Markiertiefen weiche Übergänge zwischen dem Grundmaterial und der Markierung erzeugen. Plasmamarkierungen unterscheiden sich in Ansatz-, End- und Umkehrpunkten des Plasmamarkierbrenners grundlegend vom restlichen Bereich der Markierung, da in diesen Bereichen die geringfügig längere Verweildauer des Brenners dafür sorgt, dass mehr Material aufgeschmolzen wird und die Markierung somit eine tiefere Kerbe im Material hervorruft. Die Ermüdungsrisse starteten in den untersuchten Fällen ausnahmslos in einem dieser Ansatz- oder Umkehrpunkte. Die durch Nadelmarkierungen erzeugten Kerben sind von ihrer Geometrie im Wesentlichen abhängig von der Geometrie der verwendeten Nadel. Bei der Verwendung von stark abgerundeten Nadelköpfen wird auch vom „low stress needling“ gesprochen. Die hier verwendeten Nadelkerben wiesen große Ausrundungen im Kerbgrund auf. Die Kerben hatten einen fließenden Übergang zum Grundmaterial und Oberflächenzustände mit der im Vergleich zu den übrigen Markiermethoden geringsten Streuung der geometrischen Parameter Öffnungswinkel, Markiertiefe oder Ausrundung im Kerbgrund.

Die Markiertiefen beliefen sich für Harte Stempelungen auf ca. 600 μm , für Fräsmarkierungen auf ca. 150-200 μm (S355J2) bzw. 300-350 μm (S460N). Für die untersuchten Plasmamarkierungen resultierten in den Ansatz- und Endpunkten ca. 600 μm tiefe Kerben und für die Nadelmarkierung waren die Kerben im Mittel ca. 300 μm tief.

Die Ergebnisse der durchgeführten Ermüdungsversuche zeigen einen deutlichen Einfluss der Kennzeichnungsmethoden auf das Ermüdungsverhalten. Die Höhe des Einflusses und die damit verbundene Verminderung der Ermüdungsfestigkeit ist im Wesentlichen abhängig von der Geometrie der eingebrachten Kerbe. Infolgedessen ergeben sich je nach Markiermethode unterschiedliche Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen nahezu keinen Einfluss der Nadelmarkierungen auf das Ermüdungsverhalten. Die getesteten Versuchskörper versagten mit vergleichsweise hohen Ermüdungsbeanspruchungen entweder im Grundmaterial mit einem Rissausgang, welcher nicht von der Markierung ausging, oder erreichten fünf Millionen Lastwechsel ohne sichtbaren Riss.

Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechseln liegen für die weiteren Versuchsserien zwischen $\Delta\sigma_{c,95\%} = 125 \text{ N/mm}^2$ für gestempelte Versuchskörper der Blechdicke 15 mm aus S355J2 und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 231 \text{ N/mm}^2$ für gefräste Versuchskörper der Blechdicke 40 mm aus S460N. Innerhalb der Versuchsserien einer Markiermethode lässt sich für die Versuche kein negativer Blechdicken-effekt feststellen. Tendenziell steigt die Ermüdungsfestigkeit für die untersuchten Prüfkörper mit zunehmender Blechdicke an. Darüber hinaus lässt sich kein Einfluss der Streckgrenze auf das Ermüdungsverhalten erkennen. Aufgrund der erzielten Ergebnisse lassen sich die Kennzeichnungsmethoden für die gegebenen Kerbgeometrien, Blechdicken und Stahlsorten in vergleichsweise hohe Kerbfallklassen einordnen.

Für detailliertere Aussagen zum Verhalten von markierten Prüfkörpern sind weitere Untersuchungen in Form von weiteren experimentellen oder numerischen Analysen notwendig. Die folgenden Punkte sind zu klären:

- (1) Verhalten von markierten Prüfkörpern mit größerer Blechdicke. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen haben den Einfluss der Markiermethoden auf die Ermüdungsfestigkeit von Prüfkörpern der Blechdicken 15, 25 und 40 mm gezeigt. Eine Aussage über das Verhalten von Prüfkörpern größerer Blechdicken kann nicht getroffen werden.
- (2) Auswirkungen veränderter Markierparameter. Die ermittelten Ergebnisse zeigen den Einfluss praxisnaher dauerhafter Kennzeichnungen. Insbesondere mit Fräs- oder Plasmamarkierungen können infolge abweichender Markierparameter unterschiedliche Kerben installiert werden. Mithilfe weiterer Untersuchungen könnte der Einfluss abweichender Kerbgeometrien ermittelt werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1090-2:2011-10: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008+A1:2011.
- [2] DIN EN 1993-1-9:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009.
- [3] EN 1090-2:2008+A1:2011: Execution of steel structures and aluminium structures — Part 2: Technical requirements for steel structures.
- [4] EN 1993-1-9:2010-12: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue.
- [5] topex West CL GmbH. <http://topexwest.de/>.
- [6] VOORTMAN STEEL MACHINERY.
<http://www.voortman.net/de/produkte/maschinen/tragerbearbeitung/v704>.
- [7] Fahrenwaldt, H., Schuler, V.: Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. Wiesbaden: Springer-Verlag 2011.
- [8] Radaj, D., Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure. s.l.: Springer-Verlag 2007.
- [9] Richard, H. A., Sander, M.: Ermüdungsrisse. Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2012.
- [10] Maddox, S. J.: Fatigue strength of welded structures. Cambridge: Abington Publishing; Abington Pub. 1991.
- [11] DIN 18800-7:2008-11: Stahlbauten – Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation.
- [12] DIN EN 1011-1:2009-07: Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 1: Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen; Deutsche Fassung EN 1011-1:2009.
- [13] ZTV-ING:2012-12: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 4 Stahlbau, Stahlverbundbau.
- [14] DBS 918 002-02:2013-01: DB Standard. Technische Lieferbedingungen. Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen für den Eisenbahnbrückenbau.
- [15] Schmidt, H., Zwätz, R., Bär, L., Kathage, K.: Ausführungen von Stahlbauten. Erläuterungen zu DIN EN 1090-1 und DIN EN 1090-2. Berlin: Ernst 2010.
- [16] Kranz, B., Wolski, U.: Einsatzmöglichkeiten und –grenzen des Plasmamarkierens für sichere Schweißkonstruktionen, Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Bericht über Forschungsleistungen – Abschlussbericht. Berlin 2010.
- [17] Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components 2008.
- [18] DIN EN 10204:2005-01: Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen; Deutsche Fassung EN 10204:2004.

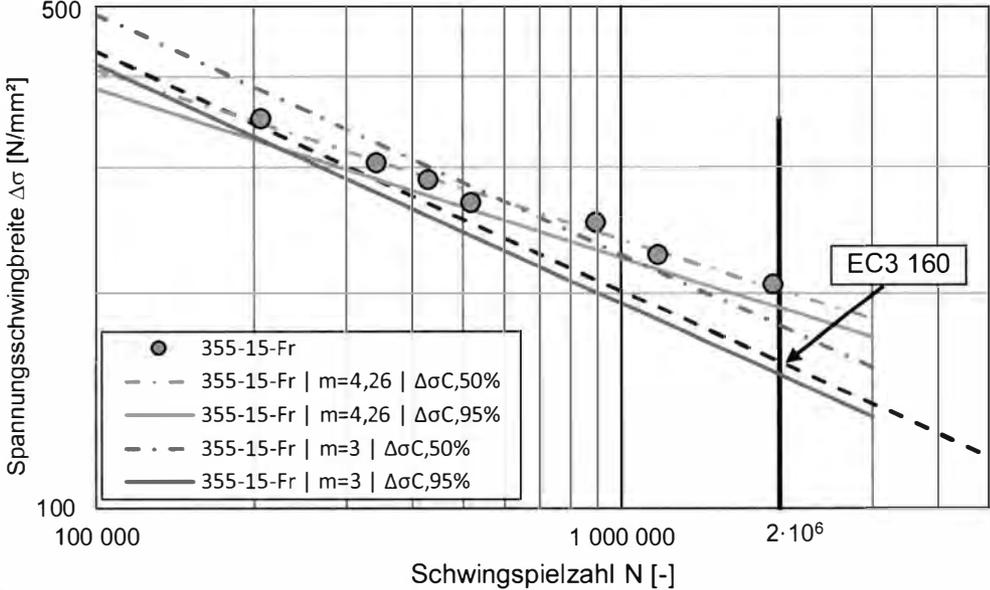
- [19] Brozetti, J., Hirt, M. A., Ryan, I., Sedlacek, G., *Smith, I. F. C.*: Background informations on fatigue design rules - Statistical evaluation. Background documentation Chapter 9 - Document 9.01 1989.
- [20] DIN 50125:2009-07: Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben.
- [21] Maddox, S. J.: The effect of plate thickness on the fatigue strength of fillet welded joints. Cambridge: Welding Institute 1987.
- [22] Örjasäter, O.: Effect of plate thickness on fatigue of welded components 1995.
- [23] *Costa Borges, L. A.*: Size effects in the fatigue behaviour of tubular bridge joints. Dissertation, Thesis EPFL n° 4142. Lausanne, Schweiz 2008.

Danksagung

Die in diesem Schlussbericht vorgestellten Untersuchungen wurden am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ als IGF-Vorhaben 17218 N des Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. (DASt), gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, durchgeführt.

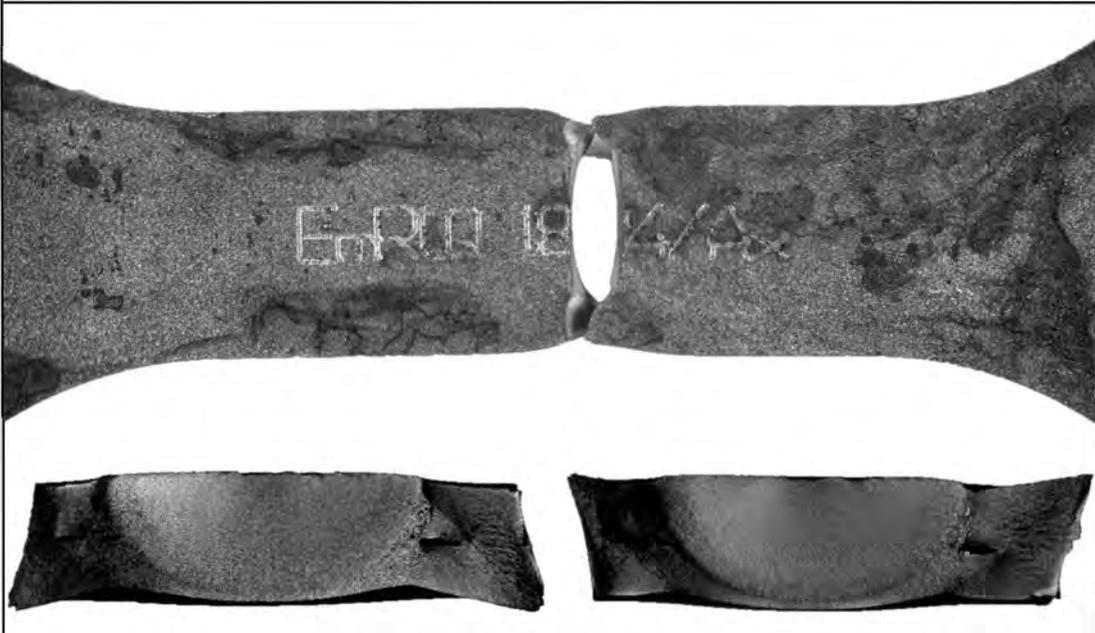
Die Autoren bedanken sich bei den Firmen Dillinger Hütte AG und F. Hackländer GmbH für die Bereitstellung von Probenausgangsmaterial. Weiterer Dank gilt den Firmen Stahlbau Magdeburg GmbH, Rudolstädter Systembau GmbH und MARKATOR® Manfred Borries GmbH für das Markieren der Versuchskörper und der Beratung im Rahmen der Markierprozesse und Wurst Stahlbau GmbH für das Bereitstellen von Probenausgangsmaterial und die Bearbeitung sowie das Markieren von Versuchskörpern. Besonders Dank gilt bauforumstahl e.V. und den partizipierenden Arbeitsausschüssen für die stetige Beratung und Unterstützung.

Anhang A Datenblätter und Bruchbilder

Versuchparameter Serie 355-15-Fr						
Kennzeichnungsmethode		Fräsmarkierung				
Blechdicke	15 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 458					
R_{eM}	[N/mm ²] 578					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-15-Fr-02	0,95	0,74	304,5	342.010	Markierung	-
355-15-Fr-03	0,79	0,61	251,4	894.523	Markierung	-
355-15-Fr-04	1,10	0,85	350,4	206.431	Markierung	-
355-15-Fr-05	0,90	0,70	288,5	429.336	Markierung	-
355-15-Fr-06	0,84	0,65	267,9	517.604	Markierung	-
355-15-Fr-07	0,71	0,55	226,7	1.173.681	Markierung	-
355-15-Fr-08	0,65	0,50	206,1	1.944.449	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
7	3,0	konstant	180	154		
7	4,3	variabel	202	191		

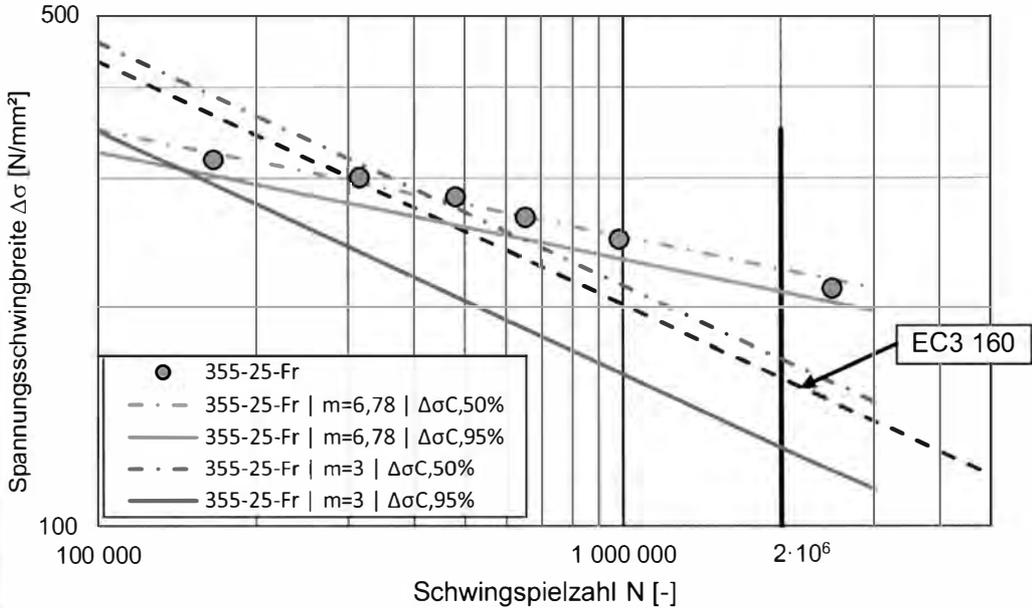
Bruchbilder Serie 355-15-Fr

Versuchskörper 355-15-Fr-06



Versuchskörper 355-15-Fr-02



Versuchparameter Serie 355-25-Fr							
Kennzeichnungsmethode		Fräsmarkierung					
Blechdicke	25 mm						
Stahlsorte	S355J2						
f_y	[N/mm ²]						355
R_{eH}	[N/mm ²]						393
R_{eM}	[N/mm ²]						537
Prüfzeugnis	APZ 3.1						
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung				
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche							
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen	
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]			
355-25-Fr-01	0,66	0,60	212,2	2.500.000	Markierung	-	
355-25-Fr-02	1,00	0,90	318,3	166.406	Markierung	-	
355-25-Fr-03	0,89	0,80	283,0	480.395	Markierung	-	
355-25-Fr-04	0,94	0,85	300,6	315.463	Markierung	-	
355-25-Fr-05	0,77	0,70	247,6	982.791	Markierung	-	
355-25-Fr-06	0,83	0,75	265,3	652.684	Markierung	-	
							
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$			
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]			
6	3,0	konstant	170	129			
6	6,8	variabel	225	210			

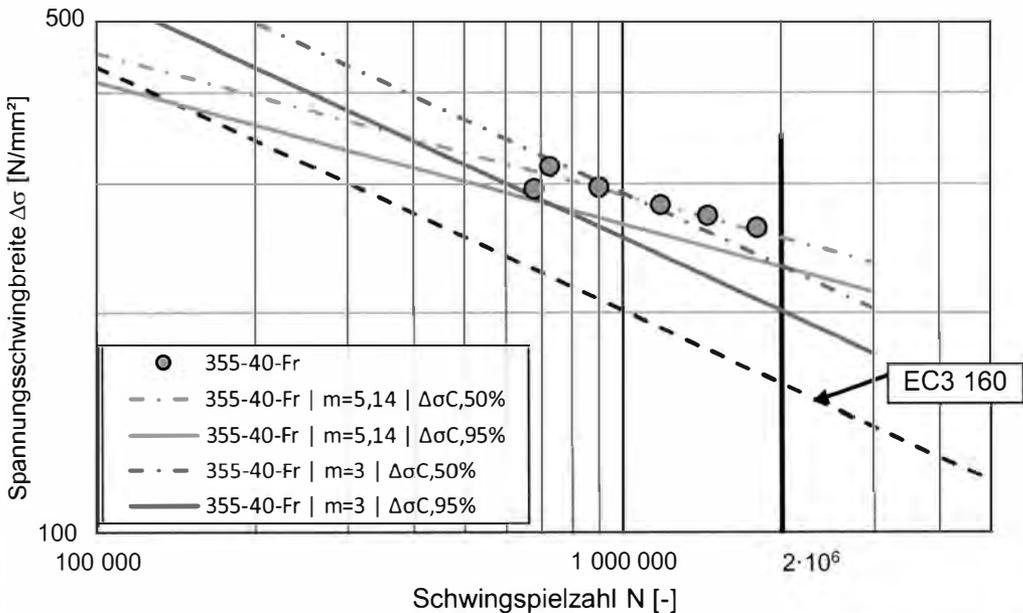
Bruchbilder Serie 355-25-Fr

Versuchskörper 355-25-Fr-03



Versuchskörper 355-25-Fr-05



Versuchparameter Serie 355-40-Fr						
Kennzeichnungsmethode		Fräsmarkierung				
Blechdicke	40 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 415					
R_{eM}	[N/mm ²] 576					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-40-Fr-01	0,99	0,85	317,5	727.396	Markierung	-
355-40-Fr-03	0,93	0,79	295,7	679.192	Markierung	-
355-40-Fr-04	0,82	0,70	261,5	1.797.976	Markierung	-
355-40-Fr-05	0,88	0,75	281,2	1.179.745	Markierung	-
355-40-Fr-06	0,93	0,80	297,1	900.889	Markierung	-
355-40-Fr-07	0,85	0,73	271,6	1.448.410	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
6	3,0	konstant	232	201		
6	5,1	variabel	253	231		

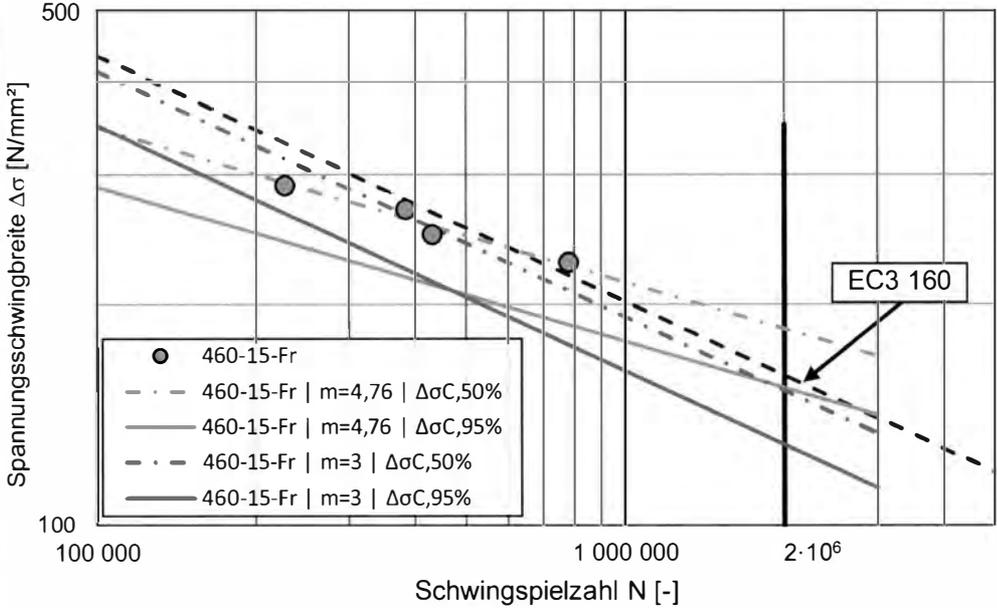
Bruchbilder Serie 355-40-Fr

Versuchskörper 355-40-Fr-01



Versuchskörper 355-40-Fr-04



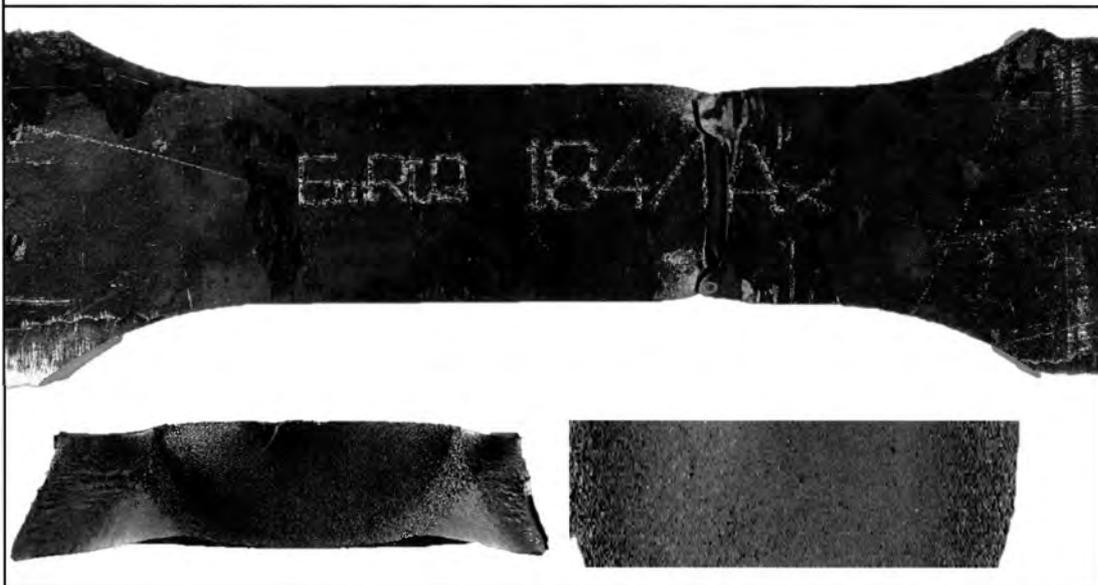
Versuchparameter Serie 460-15-Fr						
Kennzeichnungsmethode		Fräsmarkierung				
Blechdicke	15 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 502					
R_{eM}	[N/mm ²] 598					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-15-Fr-01	0,70	0,64	298,8	227.060	Markierung	-
460-15-Fr-02	0,55	0,50	227,7	780.852	Markierung	-
460-15-Fr-03	0,60	0,55	248,4	431.570	Markierung	-
460-15-Fr-04	0,65	0,60	269,1	384.376	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
4	3,0	konstant	152	129		
4	4,8	variabel	185	154		

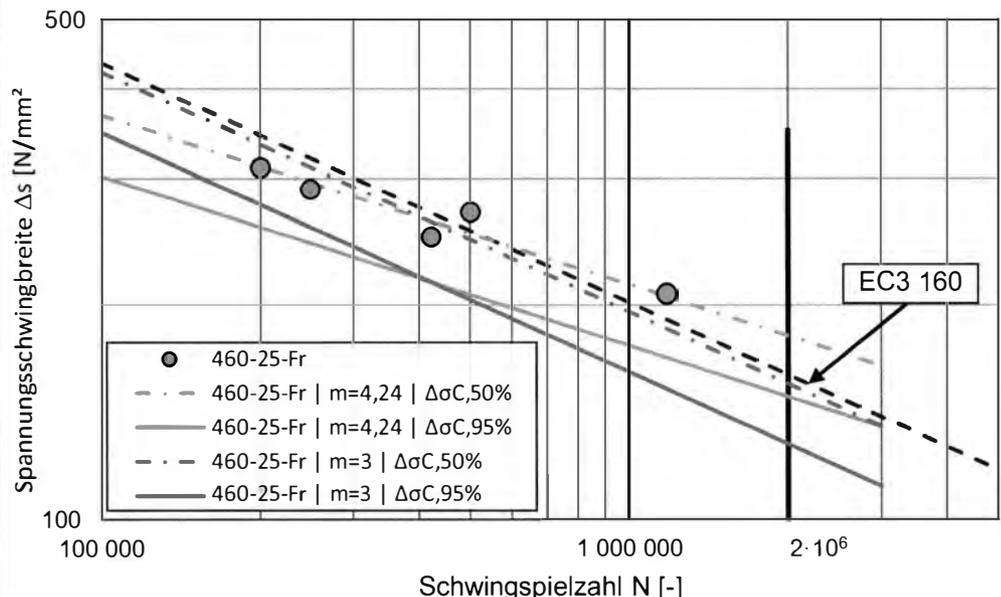
Bruchbilder Serie 460-15-Fr

Versuchskörper 460-15-Fr-01



Versuchskörper 460-15-Fr-04



Versuchparameter Serie 460-25-Fr						
Kennzeichnungsmethode		Fräsmarkierung				
Blechdicke	25 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 488					
R_{eM}	[N/mm ²] 588					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-25-Fr-01	0,70	0,66	289,8	249.242	Markierung	-
460-25-Fr-02	0,75	0,71	310,5	200.507	Markierung	-
460-25-Fr-03	0,65	0,61	269,1	501.181	Markierung	-
460-25-Fr-04	0,60	0,57	248,4	422.099	Markierung	-
460-25-Fr-05	0,50	0,47	207,0	1.175.885	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
5	3,0	konstant	155	128		
5	4,2	variabel	181	149		

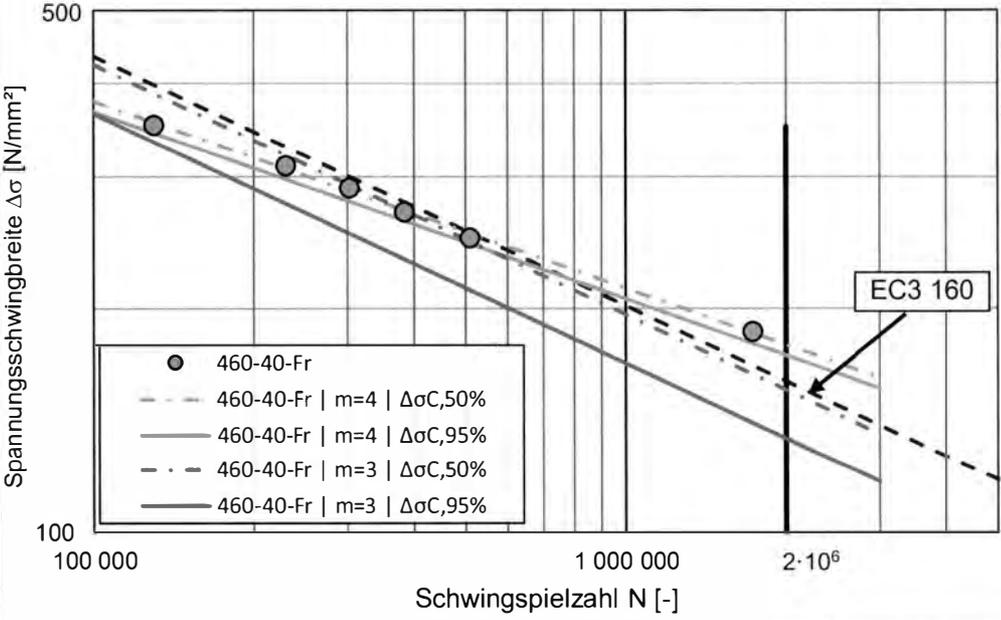
Bruchbilder Serie 460-25-Fr

Versuchskörper 460-25-Fr-01



Versuchskörper 460-25-Fr-02



Versuchparameter Serie 460-40-Fr						
Kennzeichnungsmethode		Fräsmarkierung				
Blechdicke	40 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 530					
R_{eM}	[N/mm ²] 659					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-40-Fr-01	0,85	0,74	351,9	129.891	Markierung	-
460-40-Fr-02	0,75	0,65	310,5	229.591	Markierung	-
460-40-Fr-03	0,65	0,56	269,1	383.829	Markierung	-
460-40-Fr-04	0,60	0,52	248,4	509.644	Markierung	-
460-40-Fr-05	0,45	0,39	186,3	1.730.688	Markierung	-
460-40-Fr-06	0,70	0,61	289,8	302.583	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
6	3,0	konstant	156	134		
6	4,0	variabel	179	173		

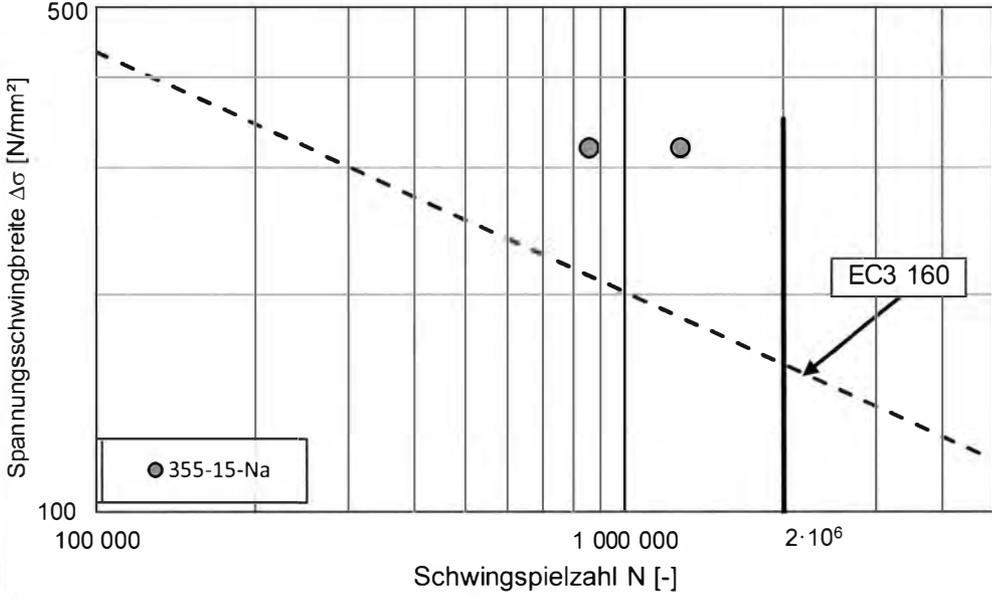
Bruchbilder Serie 460-40-Fr

Versuchskörper 460-40-Fr-01



Versuchskörper 460-40-Fr-04



Versuchparameter Serie 355-15-Na						
Kennzeichnungsmethode		Nadelmarkierung				
Blechdicke	15 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 395					
R_{eM}	[N/mm ²] 540					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	$\frac{\sigma_{max}}{f_y}$	$\frac{\sigma_{max}}{R_{eH}}$	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-15-Na-01	1,00	0,89	319,5	1.275.596	Grundmaterial	-
355-15-Na-02	1,00	0,89	319,5	858.630	Grundmaterial	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
	3,0	konstant				
		variabel				

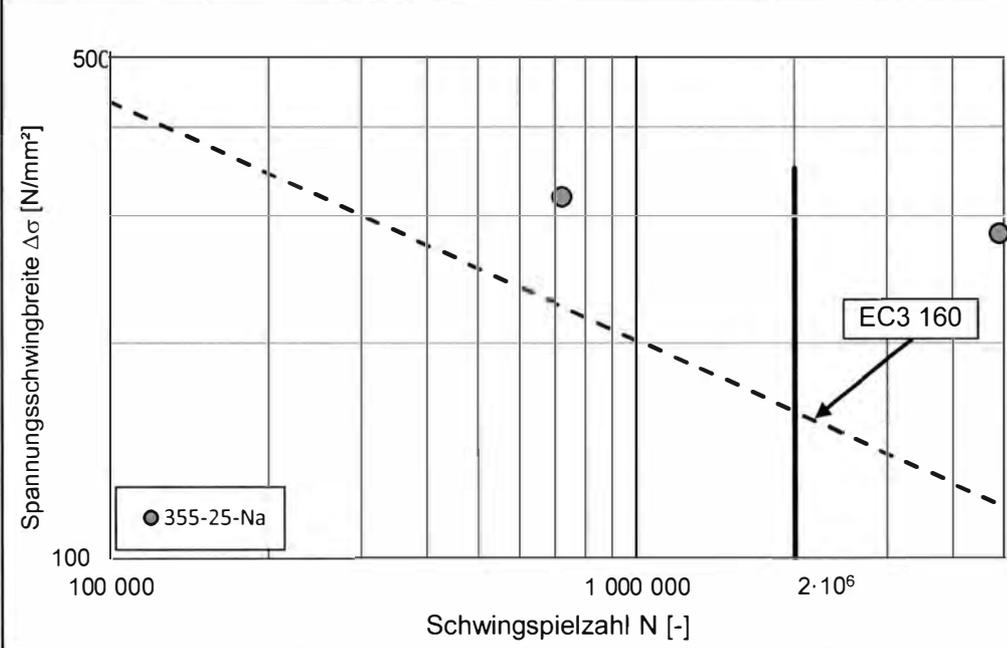
Bruchbilder Serie 355-15-Na

Versuchskörper 355-15-Na-01



Versuchskörper 355-15-Na-02

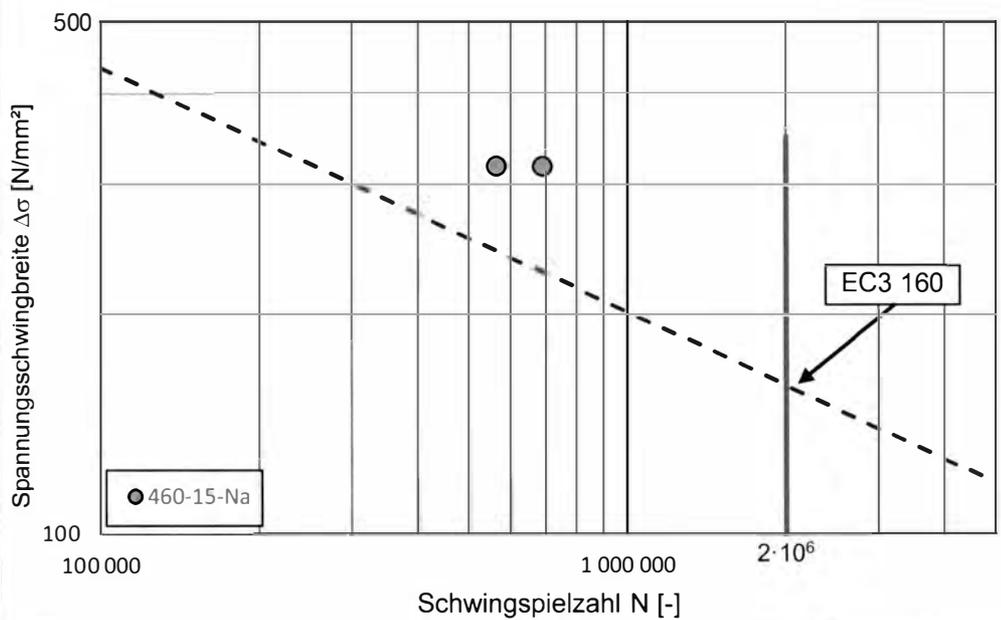


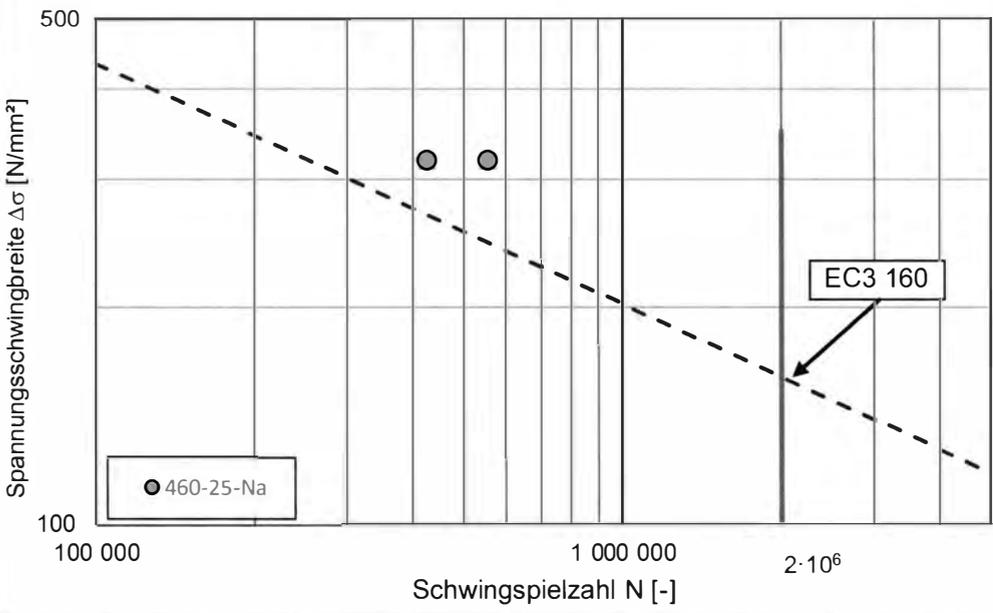
Versuchparameter Serie 355-25-Na						
Kennzeichnungsmethode		Nadelmarkierung				
Blechdicke	25 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 371					
R_{eM}	[N/mm ²] 545					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-25-Na-01	0,89	0,85	283,8	4.899.506	Durchläufer	-
355-25-Na-02	1,00	0,96	319,5	723.095	Grundmaterial	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_c, 50\%$	$\Delta\sigma_c, 95\%$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
	3,0	konstant				
		variabel				

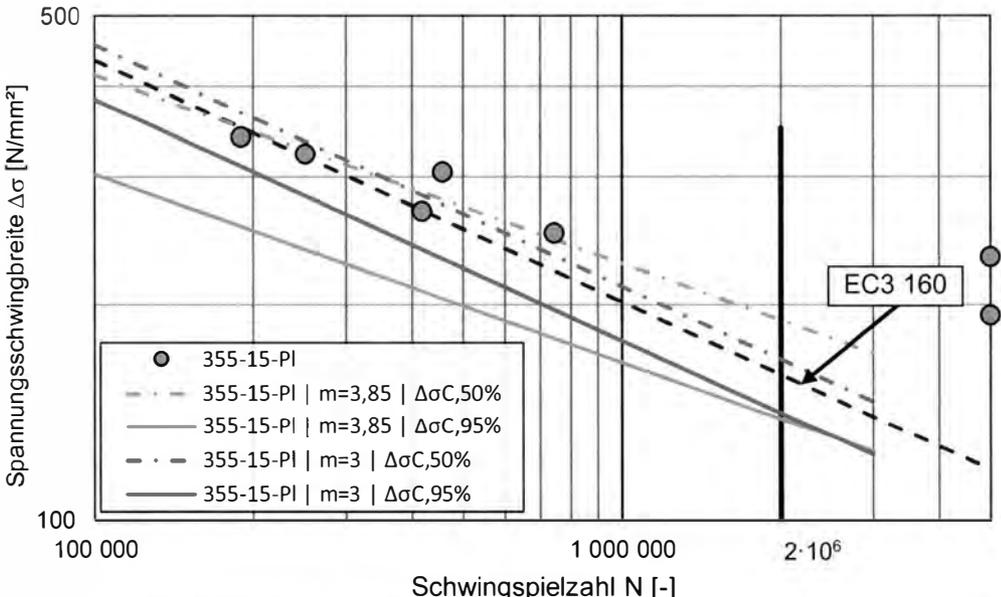
Bruchbilder Serie 355-25-Na

Versuchskörper 355-25-Na-02



Versuchparameter Serie 460-15-Na						
Kennzeichnungsmethode		Nadelmarkierung				
Blechdicke	15 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 502					
R_{eM}	[N/mm ²] 598					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-15-Na-01	0,77	0,71	318,8	563.659	Grundmaterial	
460-15-Na-03	0,77	0,71	318,8	690.306	Grundmaterial	
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
	3,0	konstant				
		variabel				

Versuchsparameter Serie 460-25-Na						
Kennzeichnungsmethode		Nadelmarkierung				
Blechdicke	25 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 488					
R_{eM}	[N/mm ²] 588					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-25-Na-01	0,77	0,73	318,8	554.532	Grundmaterial	
460-25-Na-02	0,77	0,73	318,8	425.570	Grundmaterial	
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_c, 50\%$	$\Delta\sigma_c, 95\%$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
	3,0	konstant				
		variabel				

Versuchparameter Serie 355-15-PI						
Kennzeichnungsmethode		Plasmamarkierung				
Blechdicke	15 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 398					
R_{eM}	[N/mm ²] 540					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-15-PI-02	0,95	0,85	304,5	457.020	Markierung	-
355-15-PI-03	0,61	0,54	193,4	5.000.000	Durchläufer	-
355-15-PI-04	0,84	0,75	268,7	417.800	Markierung	-
355-15-PI-05	0,73	0,65	232,8	5.000.000	Durchläufer	-
355-15-PI-06	1,01	0,90	322,4	251.126	Markierung	-
355-15-PI-07	1,07	0,95	340,3	189.654	Markierung	-
355-15-PI-08	0,78	0,70	250,7	743.505	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
7	3,0	konstant	168	141		
7	3,9	variabel	190	139		

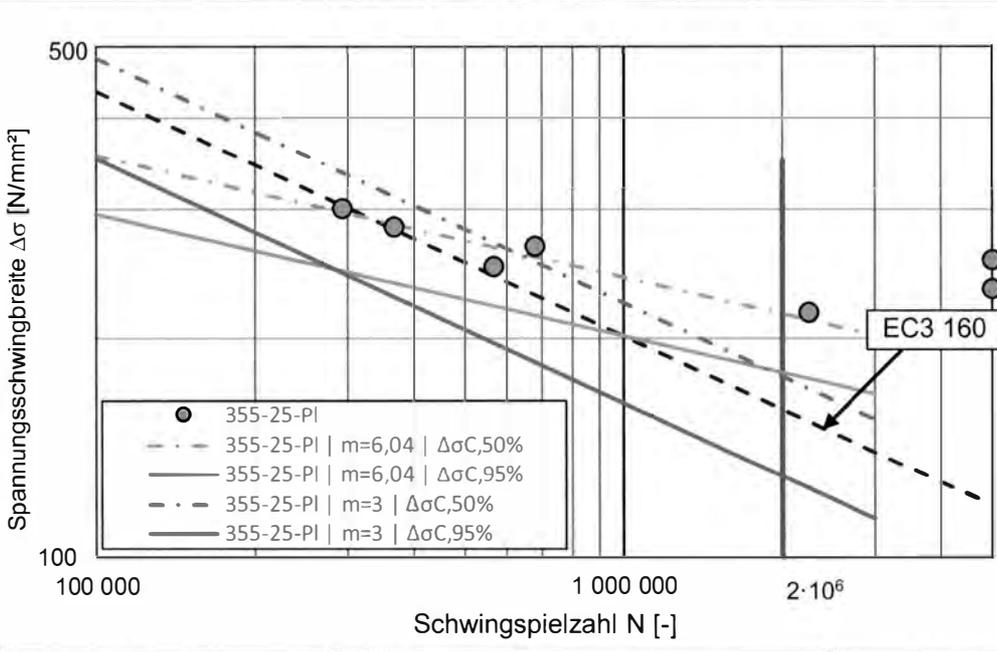
Bruchbilder Serie 355-15-PI

Versuchskörper 355-15-PI-06



Versuchskörper 355-15-PI-08



Versuchparameter Serie 355-25-PI							
Kennzeichnungsmethode		Plasmamarkierung					
Blechdicke	25 mm						
Stahlsorte	S355J2						
f_y	[N/mm ²]						355
R_{eH}	[N/mm ²]						371
R_{eM}	[N/mm ²]						545
Prüfzeugnis	APZ 3.1						
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung				
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche							
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen	
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]			
355-25-PI-02	0,68	0,65	217,0	2.242.320	Markierung	-	
355-25-PI-03	0,89	0,85	283,8	367.069	Markierung	-	
355-25-PI-04	0,78	0,75	250,4	566.817	Markierung	-	
355-25-PI-05	0,94	0,90	300,5	292.625	Markierung	-	
355-25-PI-06	0,73	0,70	233,7	5.000.000	Durchläufer	-	
355-25-PI-07	0,84	0,80	267,1	678.597	Markierung	-	
355-25-PI-08	0,80	0,77	255,6	5.000.000	Durchläufer	-	
							
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$			
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]			
7	3,0	konstant	178	130			
7	6,0	variabel	216	180			

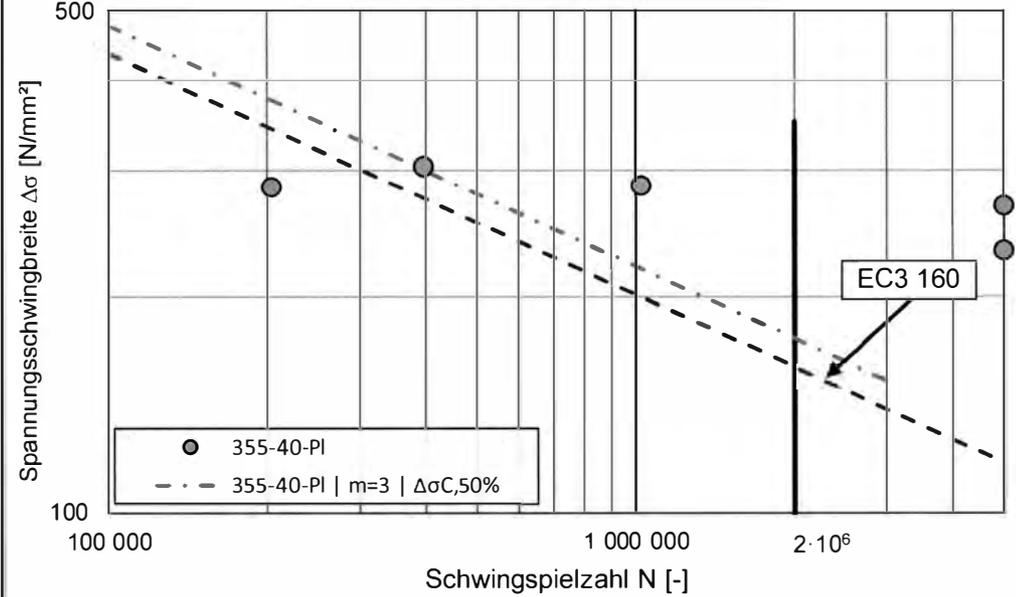
Bruchbilder Serie 355-25-PI

Versuchskörper 355-25-PI-06



Versuchskörper 355-25-PI-04



Versuchparameter Serie 355-40-PI						
Kennzeichnungsmethode		Plasmamarkierung				
Blechdicke	40 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 397					
R_{eM}	[N/mm ²] 570					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probennr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-40-PI-02	0,73	0,65	232,2	5.000.000	Durchläufer	-
355-40-PI-04	0,95	0,85	303,7	396.080	Markierung	-
355-40-PI-05	0,89	0,80	285,8	1.024.000	Markierung	-
355-40-PI-06	0,84	0,75	268,0	5.000.000	Durchläufer	-
355-40-PI-07	0,89	0,80	284,4	203.953	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
5	3,0	konstant	175	79		
5	-	Variabel	-	-		

Bruchbilder Serie 355-40-PI

Versuchskörper 355-40-PI-07



Versuchskörper 355-40-PI-04



Versuchsparameter Serie 460-15-PI

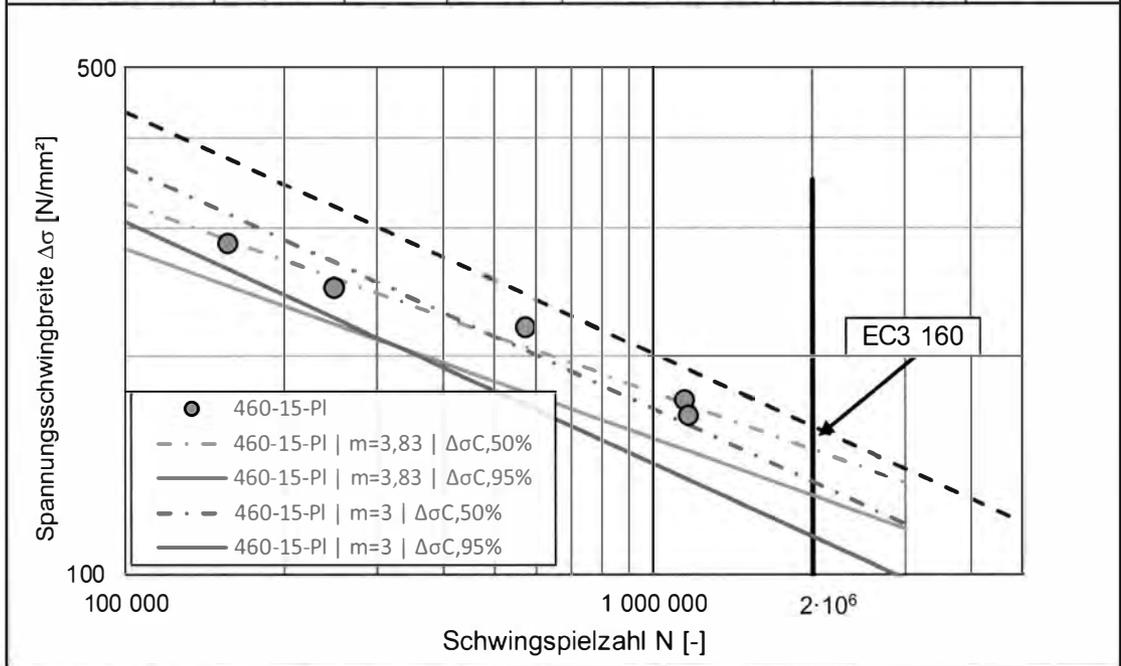
Kennzeichnungsmethode

Plasmamarkierung

Blechdicke	15 mm		
Stahlsorte	S460N		
f_y [N/mm ²]	460		
R_{eH} [N/mm ²]	502		
R_{eM} [N/mm ²]	598		
Prüfzeugnis	APZ 3.1		
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung

Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche

Probennr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-15-PI-01	0,69	0,63	285,7	156.639	Markierung	-
460-15-PI-02	0,60	0,55	248,4	248.725	Markierung	-
460-15-PI-03	0,42	0,38	173,9	1.144.117	Markierung	-
460-15-PI-04	0,53	0,49	219,4	573.029	Markierung	-
460-15-PI-05	0,40	0,37	165,6	1.163.433	Markierung	-



Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]
5	3,0	konstant	134	113
5	3,8	variabel	149	129

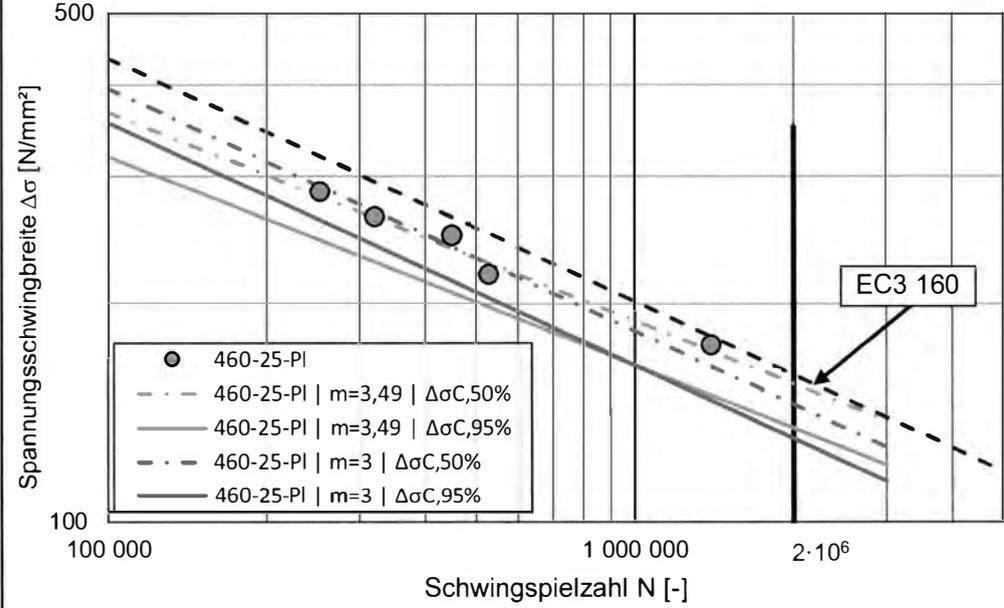
Bruchbilder Serie 460-15-PI

Versuchskörper 460-15-PI-01



Versuchskörper 460-15-PI-04



Versuchparameter Serie 460-25-PI						
Kennzeichnungsmethode		Plasmamarkierung				
Blechdicke	25 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 488					
R_{eM}	[N/mm ²] 588					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-25-PI-01	0,69	0,65	285,5	252.612	Markierung	-
460-25-PI-02	0,64	0,60	263,5	320.844	Markierung	-
460-25-PI-03	0,53	0,50	219,6	528.378	Markierung	-
460-25-PI-04	0,42	0,40	175,7	1.395.568	Markierung	-
460-25-PI-05	0,60	0,57	248,4	449.007	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
5	3,0	konstant	147	134		
5	3,4	variabel	155	135		

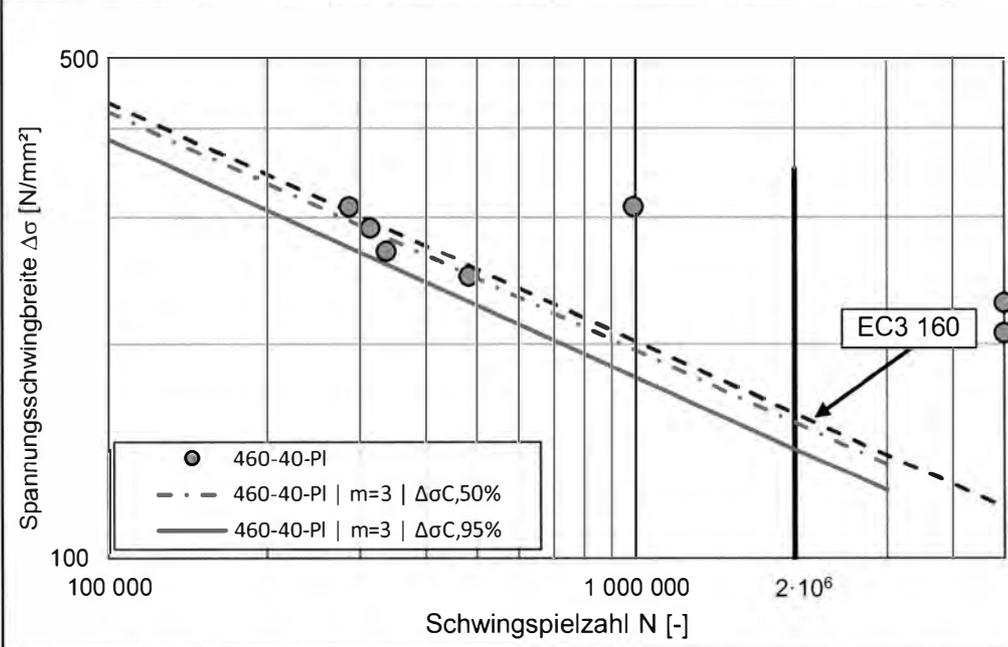
Bruchbilder Serie 460-25-PI

Versuchskörper 460-25-PI-01



Versuchskörper 460-25-PI-04



Versuchparameter Serie 460-40-PI						
Kennzeichnungsmethode		Plasmamarkierung				
Blechdicke	40 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 530					
R_{eM}	[N/mm ²] 659					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-40-PI-01	0,70	0,61	289,8	314.246	Markierung	-
460-40-PI-02	0,65	0,56	269,1	336.949	Markierung	-
460-40-PI-03	0,50	0,43	207,0	5.000.000	Durchläufer	-
460-40-PI-04	0,55	0,48	227,7	5.000.000	Durchläufer	-
460-40-PI-05	0,60	0,52	248,4	483.174	Markierung	-
460-40-PI-06	0,75	0,65	310,5	992.551	Grundmaterial	-
460-40-PI-07	0,75	0,65	310,5	286.764	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
7	3,0	konstant	155	143		
7	-	variabel	-	-		

Bruchbilder Serie 460-40-PI

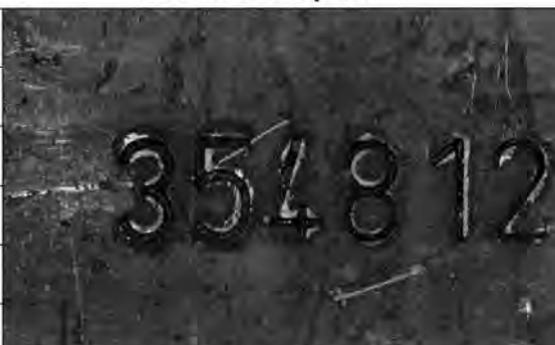
Versuchskörper 460-40-PI-02



Versuchskörper 460-40-PI-07

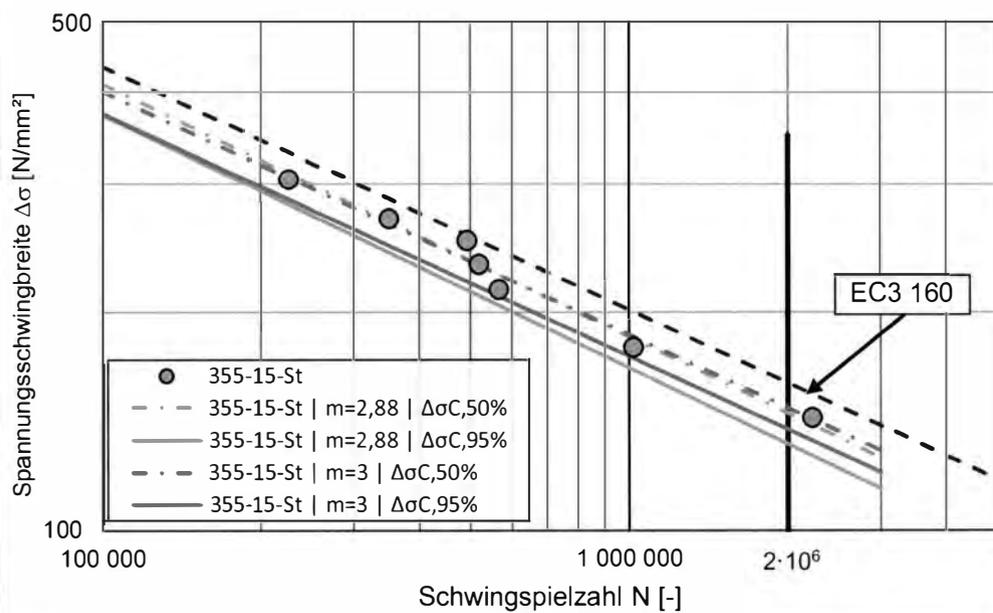


Versuchsparameter Serie 355-15-St

Kennzeichnungsmethode		Hartes Stempeln	
Blechdicke	15 mm		
Stahlsorte	S355J2		
f_y	[N/mm ²] 355		
R_{eH}	[N/mm ²] 398		
R_{eM}	[N/mm ²] 540		
Prüfzeugnis	APZ 3.1		
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung

Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche

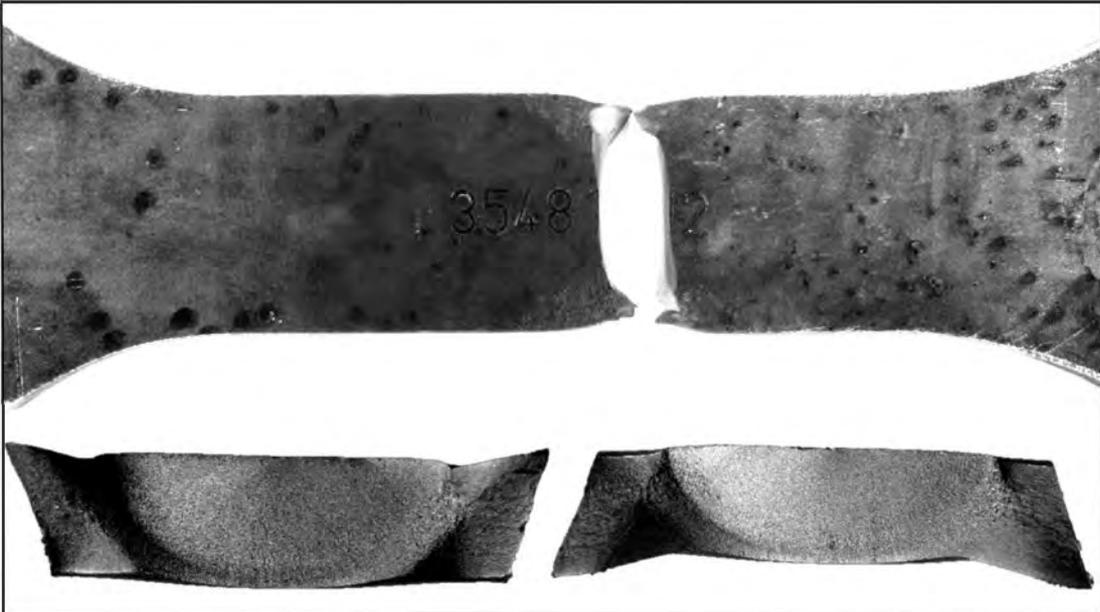
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-15-St-01	0,73	0,65	232,8	519.282	Markierung	-
355-15-St-02	0,78	0,70	250,7	493.260	Markierung	-
355-15-St-03	0,84	0,75	268,7	350.662	Markierung	-
355-15-St-04	0,67	0,60	214,9	566.220	Markierung	-
355-15-St-05	0,56	0,50	179,1	1.020.312	Markierung	-
355-15-St-06	0,95	0,85	304,5	226.205	Markierung	-
355-15-St-07	0,45	0,40	143,3	2.227.857	Markierung	-



Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]
7	3,0	konstant	148	138
7	2,9	variabel	145	132

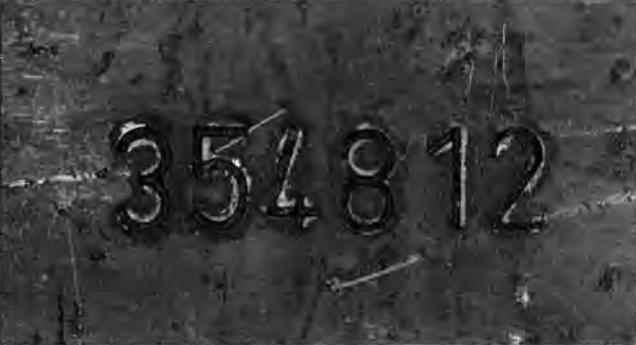
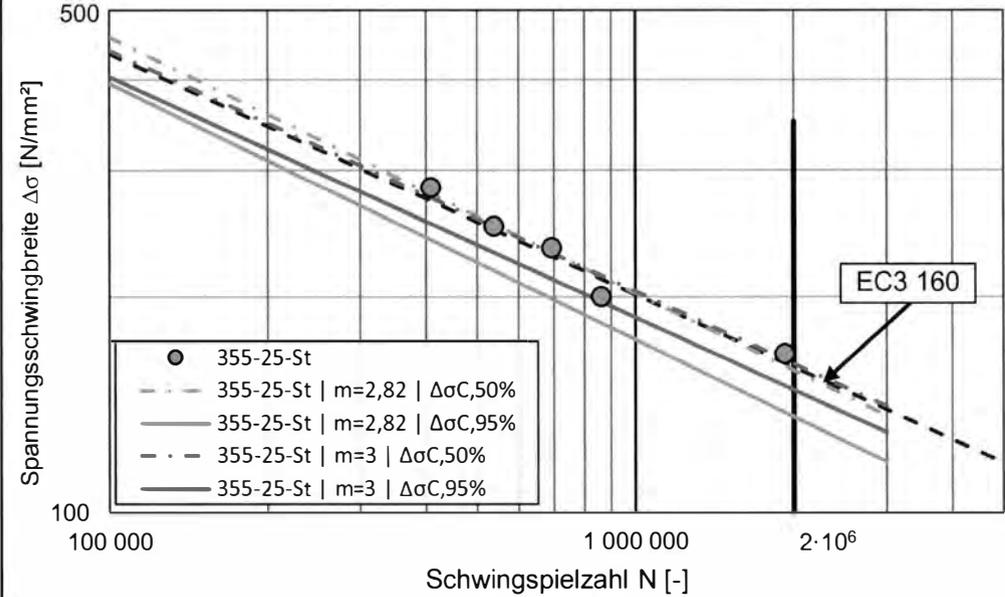
Bruchbilder Serie 355-15-St

Versuchskörper 355-15-St-03



Versuchskörper 355-15-St-01



Versuchparameter Serie 355-25-St						
Kennzeichnungsmethode		Hartes Stempeln				
Blechdicke	25 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 371					
R_{eM}	[N/mm ²] 545					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-25-St-01	0,73	0,70	233,7	693.284	Markierung	-
355-25-St-02	0,89	0,85	283,8	408.569	Markierung	-
355-25-St-03	0,78	0,75	250,4	538.004	Markierung	-
355-25-St-04	0,63	0,60	200,3	861.042	Markierung	-
355-25-St-05	0,52	0,50	167,0	1.922.448	Markierung	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
5	3,0	konstant	162	149		
5	2,8	variabel	158	137		

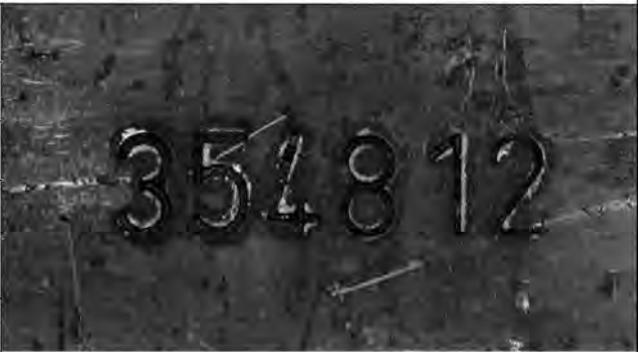
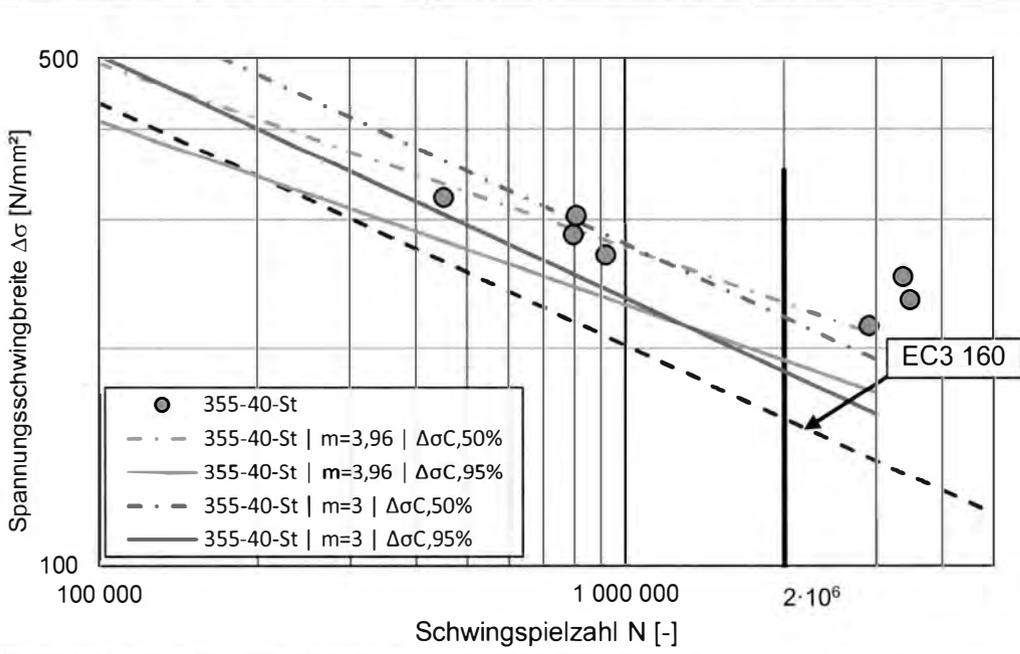
Bruchbilder Serie 355-25-St

Versuchskörper 355-25-St-05



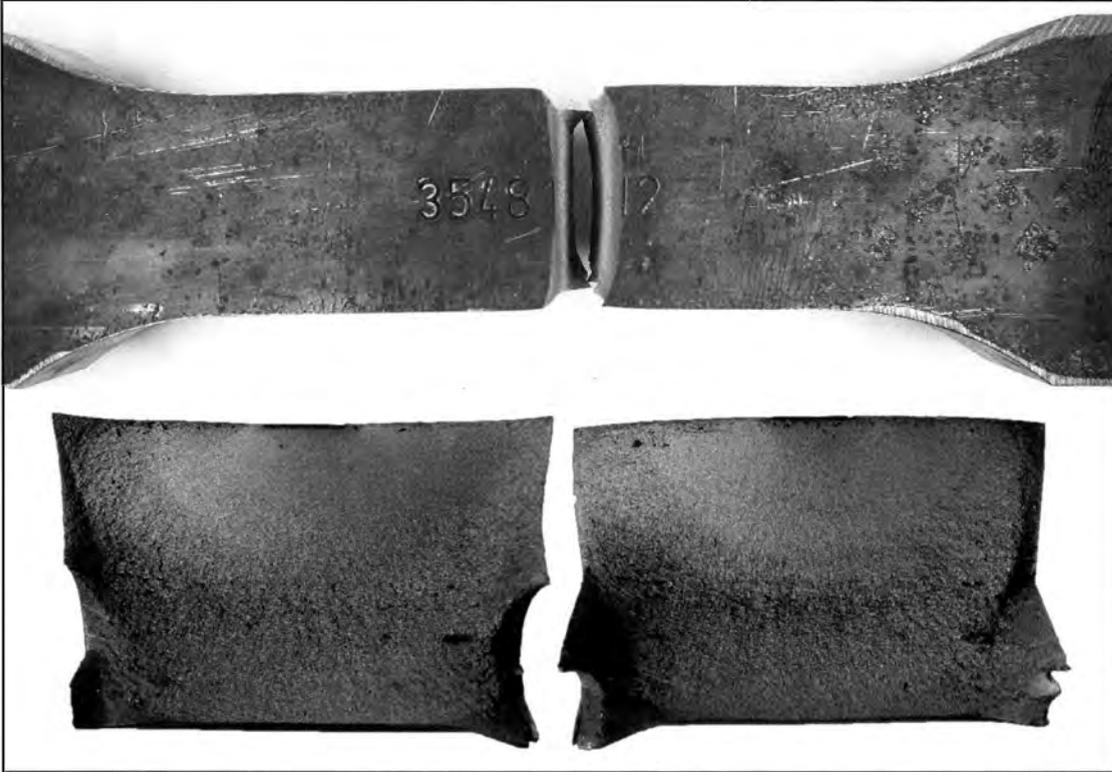
Versuchskörper 355-25-St-01



Versuchparameter Serie 355-40-St						
Kennzeichnungsmethode		Hartes Stempeln				
Blechdicke	40 mm					
Stahlsorte	S355J2					
f_y	[N/mm ²] 355					
R_{eH}	[N/mm ²] 397					
R_{eM}	[N/mm ²] 570					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
355-40-St-01	0,95	0,85	303,7	806.633	Markierung	-
355-40-St-02	0,84	0,75	268,0	917.765	Markierung	-
355-40-St-03	0,67	0,60	214,4	2.900.000	Markierung	-
355-40-St-04	0,73	0,65	232,2	3.482.953	Durchläufer	-
355-40-St-05	1,01	0,90	321,6	452.199	Ausrundung	-
355-40-St-06	0,89	0,80	285,8	796.402	Markierung	-
355-40-St-07	0,78	0,70	250,1	3.378.738	Durchläufer	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
7	3,0	konstant	221	186		
7	4,0	variabel	231	192		

Bruchbilder Serie 355-40-St

Versuchskörper 355-40-St-01



Versuchskörper 355-40-St-02



Versuchsparameter Serie 460-15-St

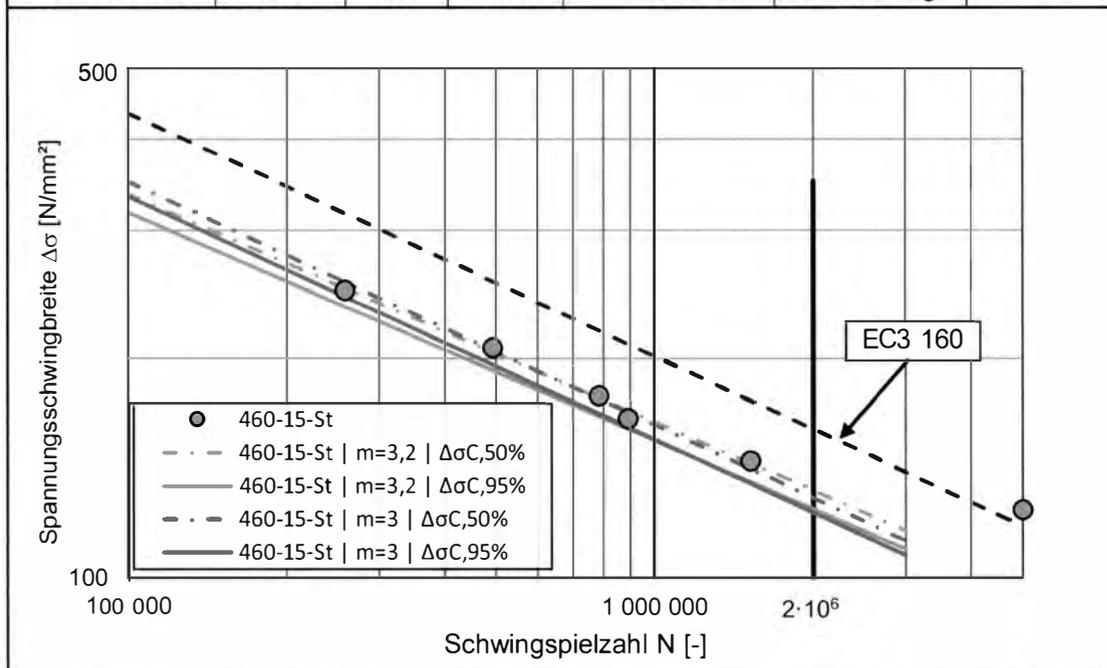
Kennzeichnungsmethode

Hartes Stempeln

Blechdicke	15 mm		
Stahlsorte	S460N		
f_y [N/mm ²]	460		
R_{eH} [N/mm ²]	502		
R_{eM} [N/mm ²]	598		
Prüfzeugnis	APZ 3.1		
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung

Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche

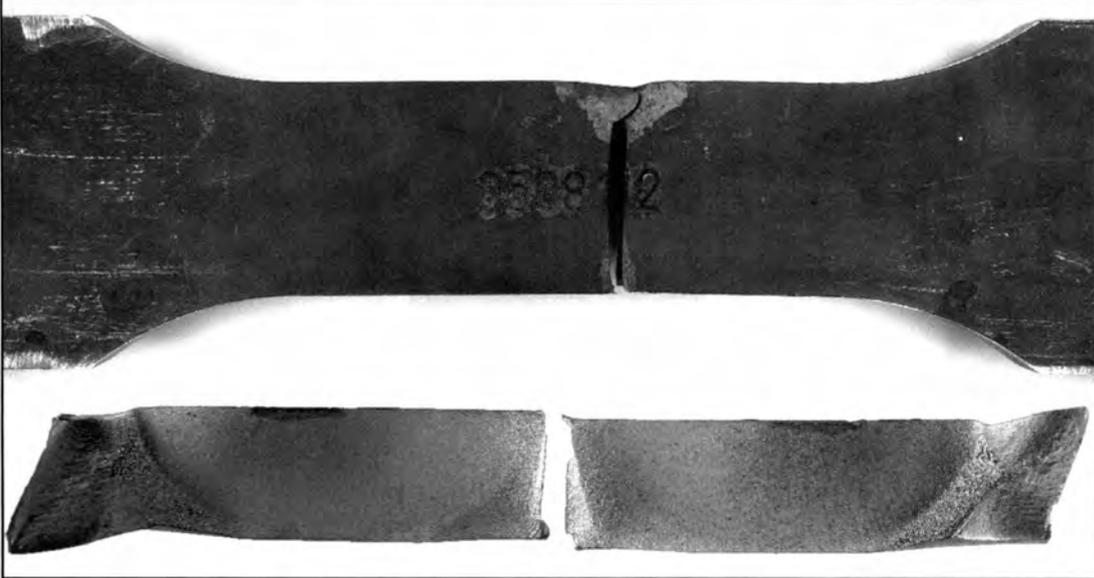
Probennr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-15-St-01	0,43	0,39	178,0	784.210	Markierung	-
460-15-St-02	0,50	0,46	207,0	493.035	Markierung	-
460-15-St-03	0,35	0,32	144,9	1.522.059	Markierung	-
460-15-St-04	0,60	0,55	248,4	258.490	Markierung	-
460-15-St-05	0,30	0,27	124,2	5.000.000	Durchläufer	-
460-15-St-06	0,40	0,37	165,6	891.354	Markierung	-



Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]
6	3,0	konstant	129	123
6	3,2	variabel	132	125

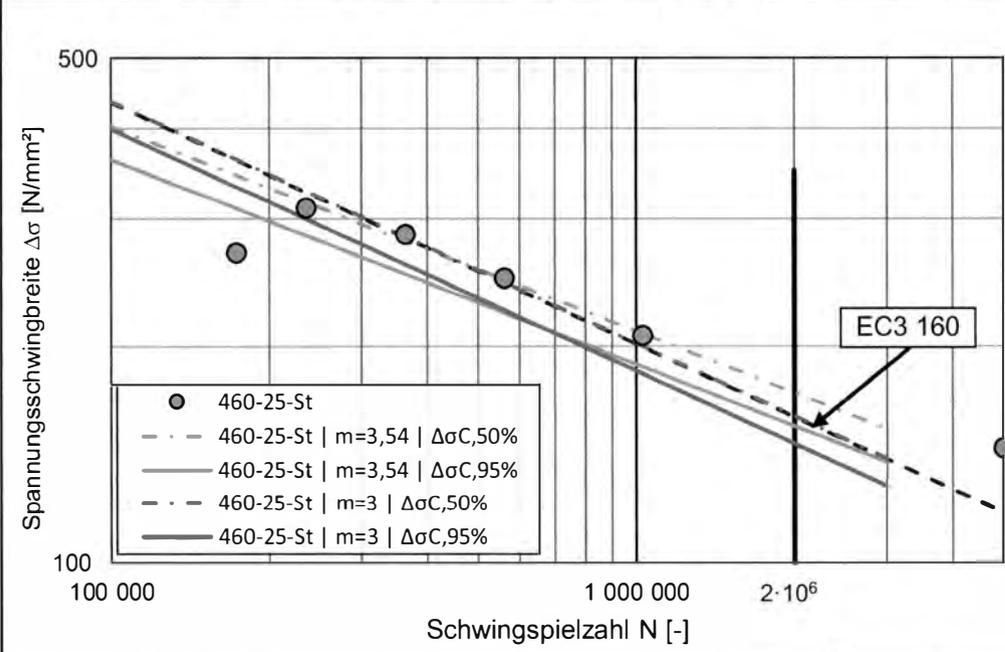
Bruchbilder Serie 460-15-St

Versuchskörper 460-15-St-03



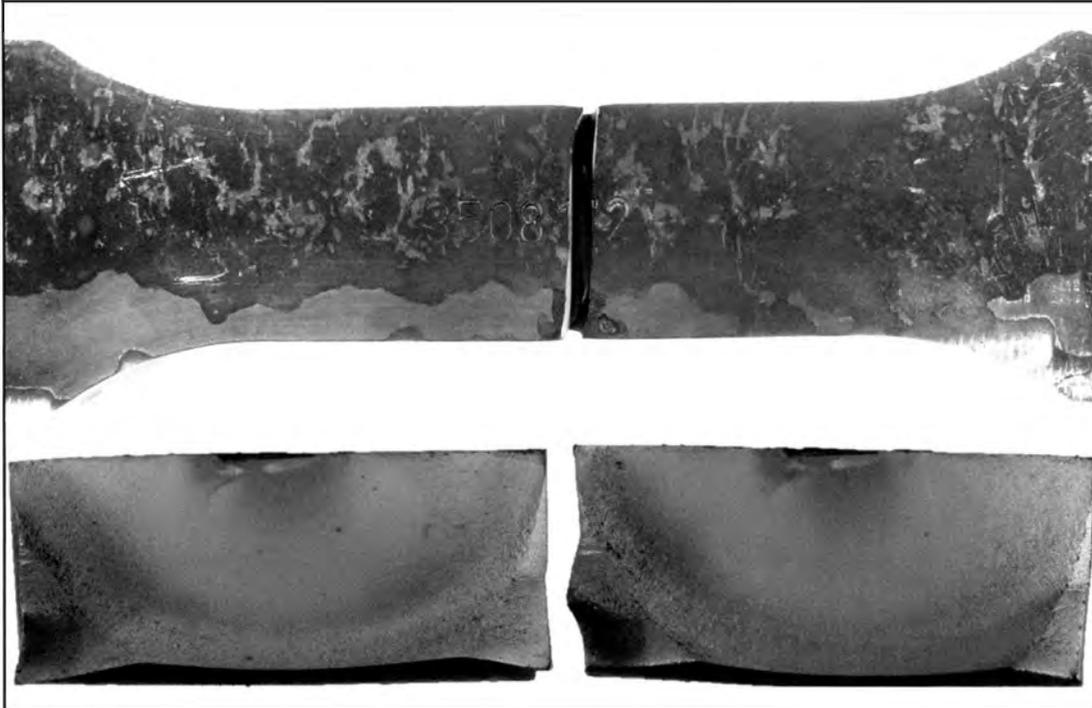
Versuchskörper 460-15-St-02



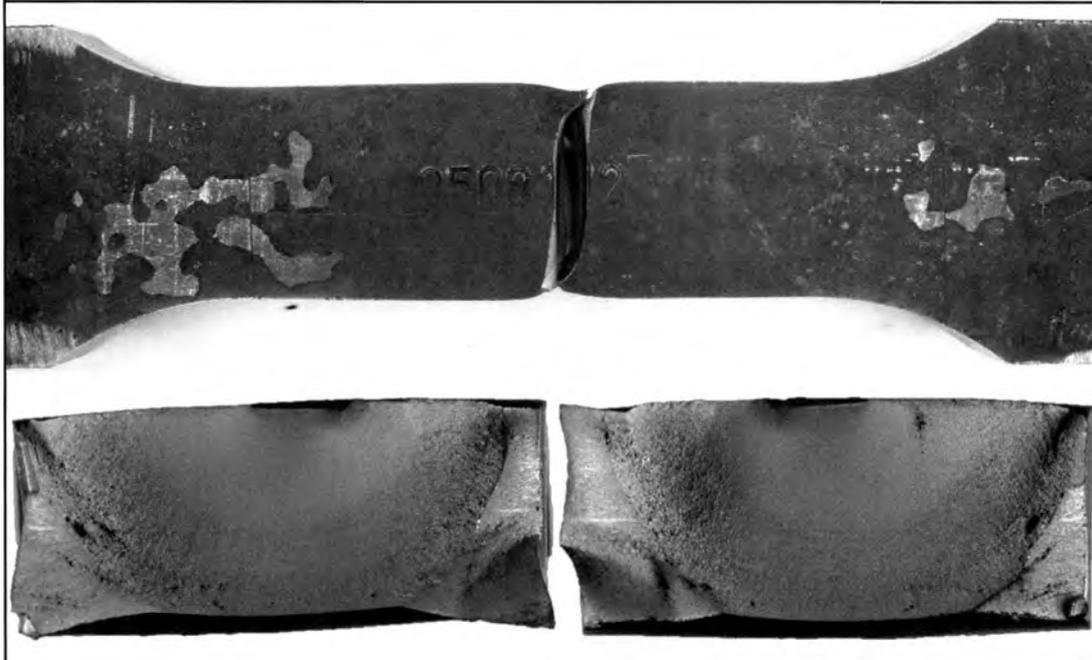
Versuchparameter Serie 460-25-St						
Kennzeichnungsmethode		Hartes Stempeln				
Blechdicke	25 mm					
Stahlsorte	S460N					
f_y	[N/mm ²] 460					
R_{eH}	[N/mm ²] 488					
R_{eM}	[N/mm ²] 588					
Prüfzeugnis	APZ 3.1					
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung			
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche						
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]		
460-25-St-01	0,35	0,33	144,9	5.000.000	Durchläufer	-
460-25-St-02	0,69	0,65	285,7	363.452	Markierung	-
460-25-St-03	0,50	0,47	207,0	1.028.608	Markierung	-
460-25-St-04	0,60	0,57	248,4	561.562	Markierung	-
460-25-St-05	0,75	0,71	310,5	235.143	Markierung	-
460-25-St-06	0,65	0,61	269,1	173.388	2 Markierungen	-
						
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$		
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]		
6	3,0	konstant	161	147		
6	3,5	variabel	173	155		

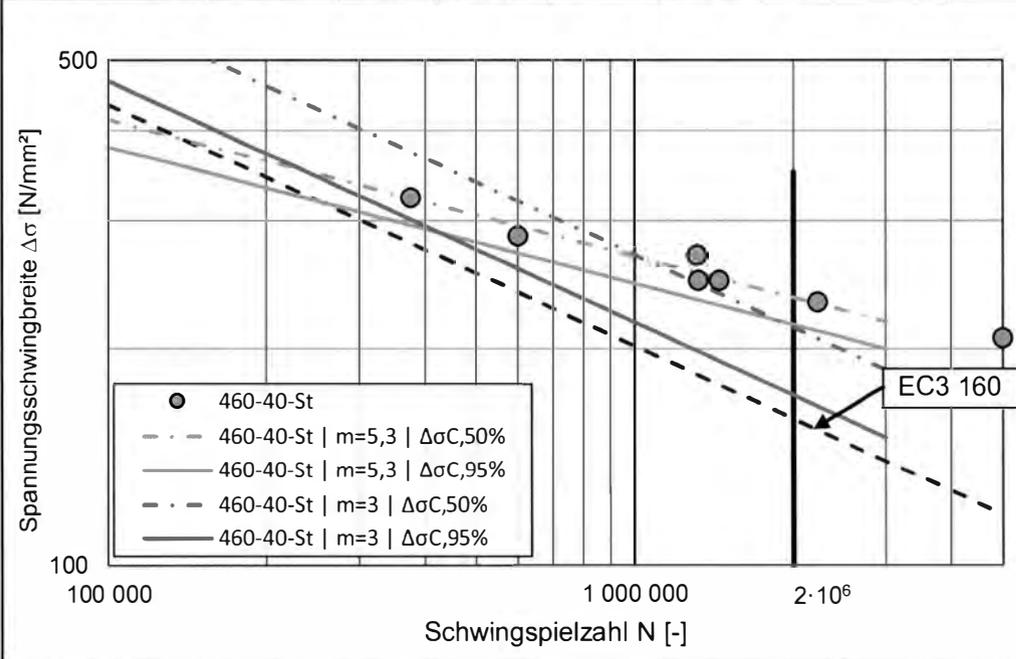
Bruchbilder Serie 460-25-St

Versuchskörper 460-25-St-03



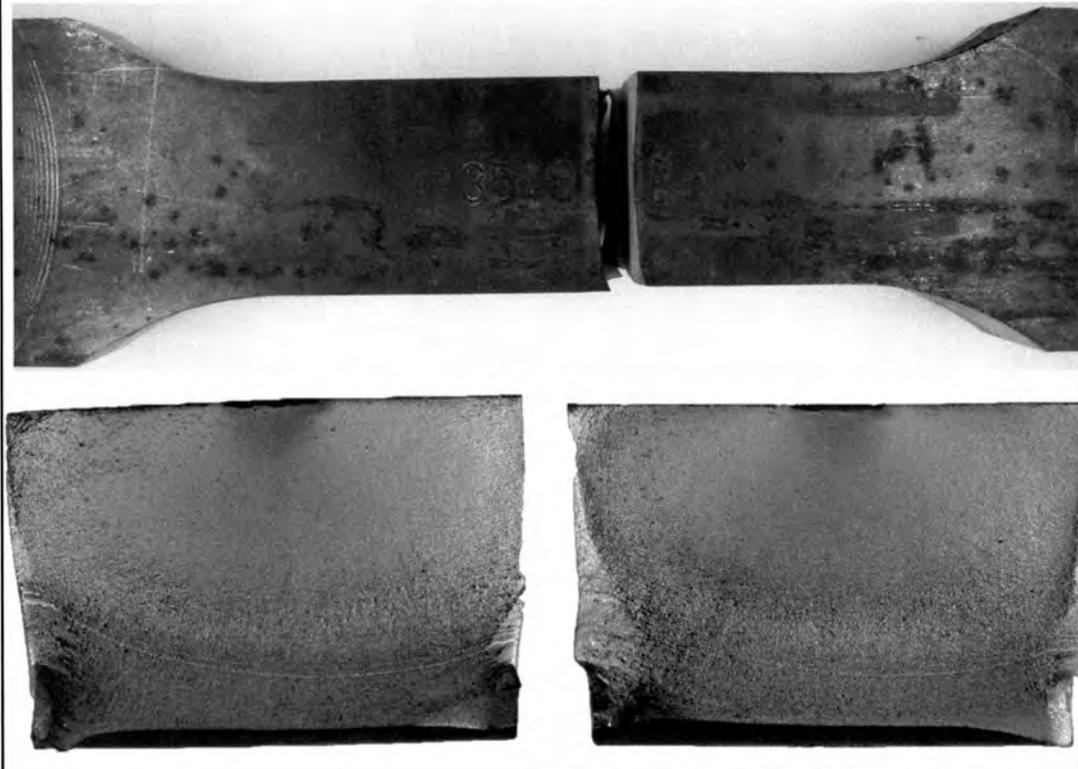
Versuchskörper 460-25-St-05



Versuchparameter Serie 460-40-St							
Kennzeichnungsmethode		Hartes Stempeln					
Blechdicke	40 mm						
Stahlsorte	S460N						
f_y	[N/mm ²]						460
R_{eH}	[N/mm ²]						530
R_{eM}	[N/mm ²]						659
Prüfzeugnis	APZ 3.1						
Spannungsverhältnis	R = 0,1	Beanspruchungsart	Zugschwellbeanspruchung				
Versuchsergebnisse Ermüdungsversuche							
Probenr.	σ_{max} / f_y	σ_{max} / R_{eH}	$\Delta\sigma$	Lastwechsel N	Bruch	Bemerkungen	
	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]			
460-40-St-01	0,69	0,60	285,7	601.368	Markierung	-	
460-40-St-02	0,60	0,52	248,4	1.320.146	Markierung	-	
460-40-St-03	0,78	0,68	322,9	376.012	Markierung	-	
460-40-St-04	0,50	0,43	207,0	5.000.000	Durchläufer	-	
460-40-St-05	0,56	0,49	231,8	2.222.464	Markierung	-	
460-40-St-06	0,65	0,56	269,1	1.313.472	Markierung	-	
460-40-St-07	0,60	0,52	248,4	1.447.193	Markierung	-	
							
Anzahl n	Neigung m		$\Delta\sigma_{c, 50\%}$	$\Delta\sigma_{c, 95\%}$			
[-]	[-]		[N/mm ²]	[N/mm ²]			
7	3,0	konstant	214	173			
7	5,3	variabel	235	216			

Bruchbilder Serie 460-40-St

Versuchskörper 460-40-St-02

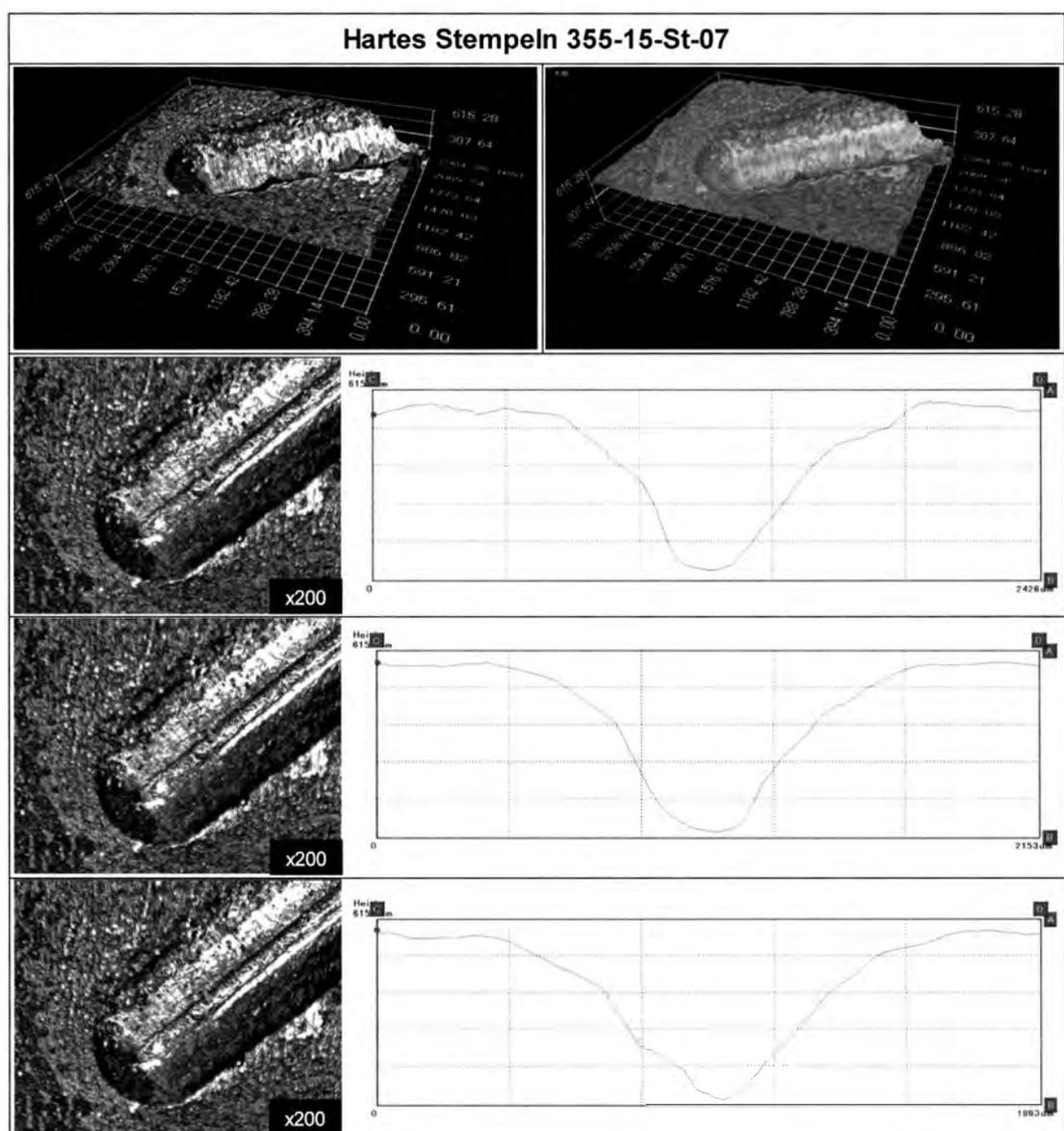


Versuchskörper 460-40-St-05

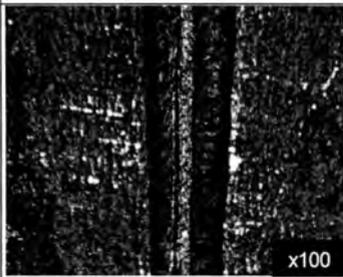
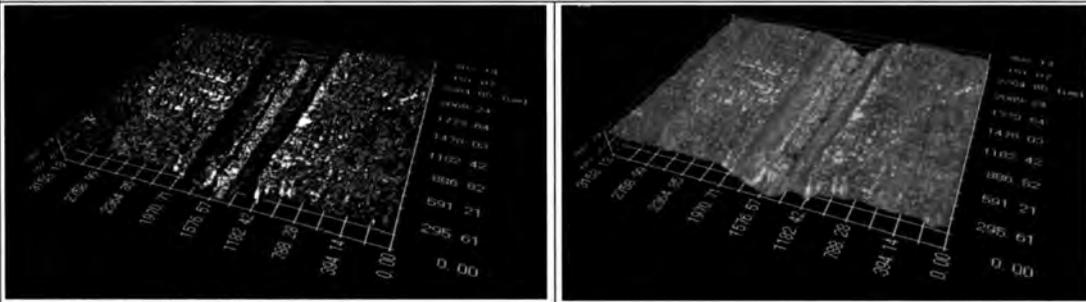


Anhang B Mikroskopie Datenblätter

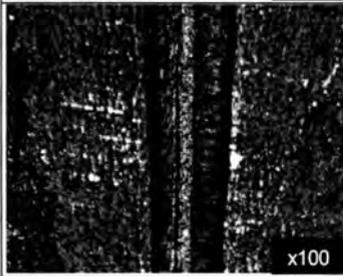
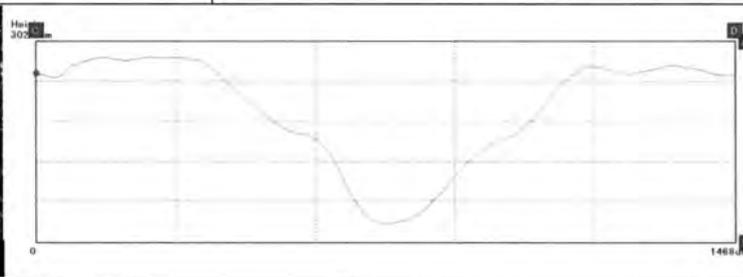
Mikroskopie Hartes Stempeln		
Blechdicken	15 / 25 / 40 mm	
Stahlsorten	S355J2 / S460N	
Markiertiefe	~ 300 - 600 µm	
Markierwerkzeug	Hilti DX 462 Stufe 4 (max.)	
		



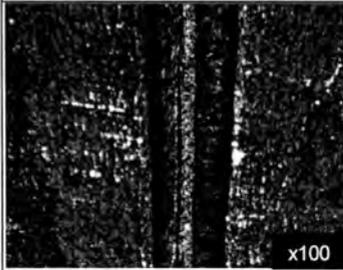
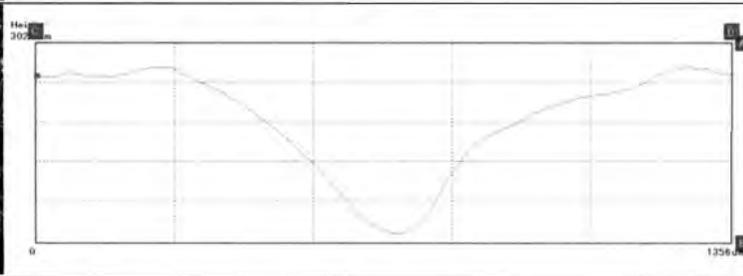
Hartes Stempeln 460-15-St-08



x100



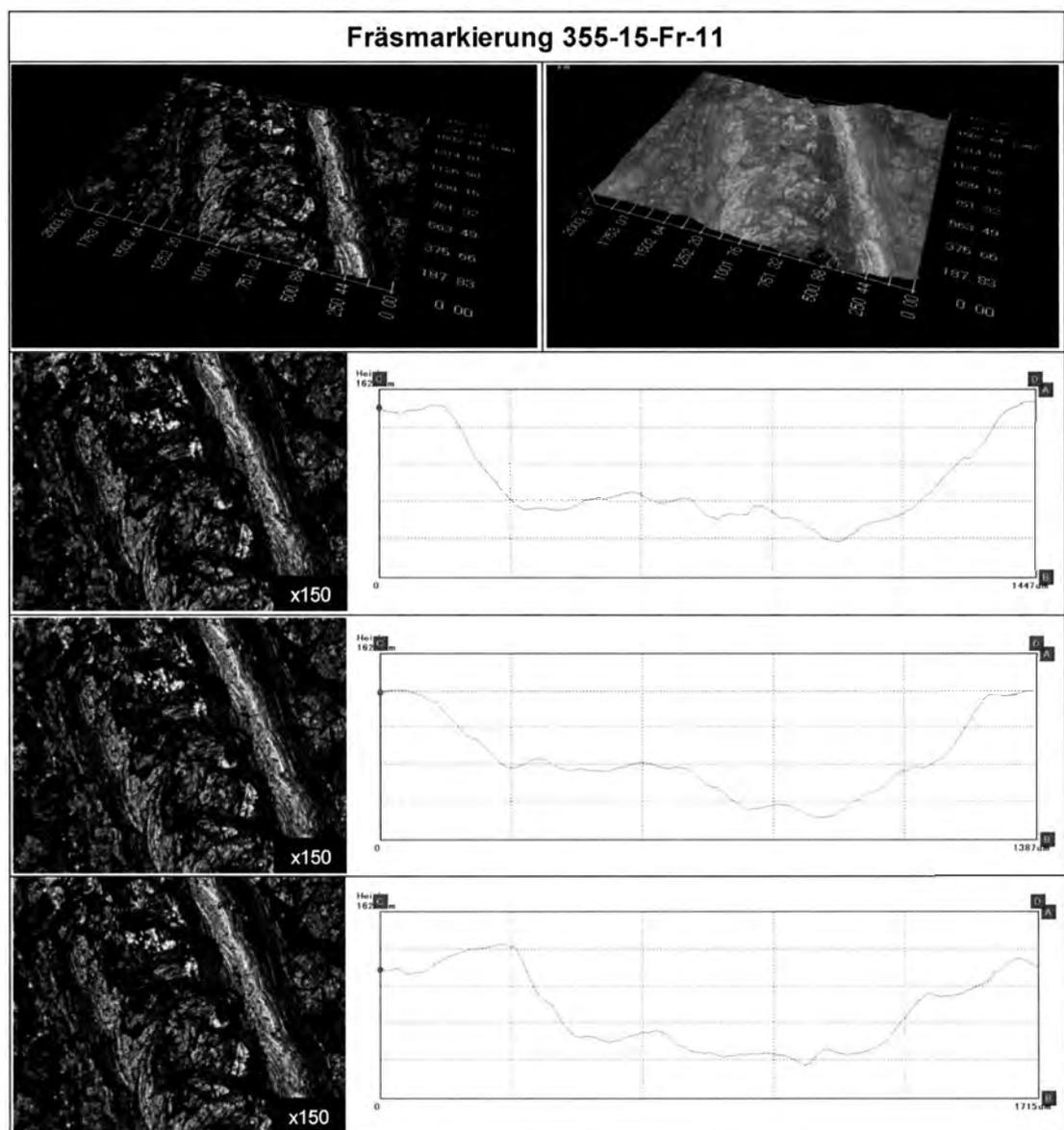
x100



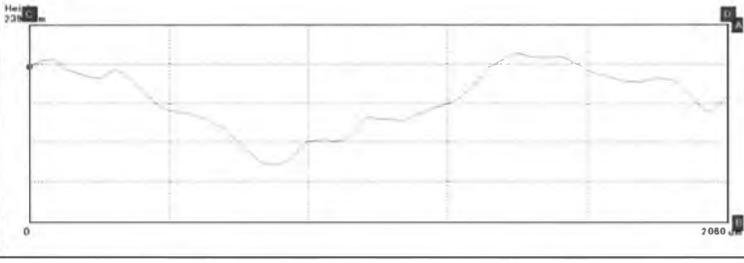
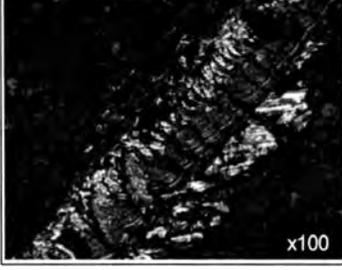
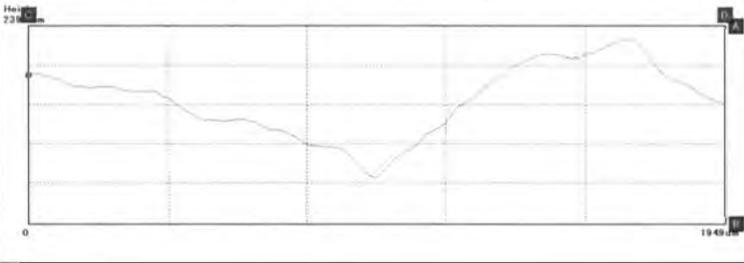
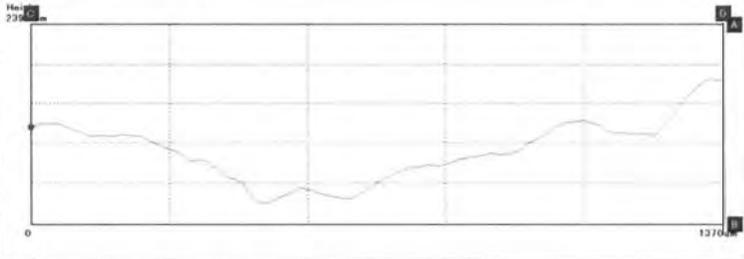
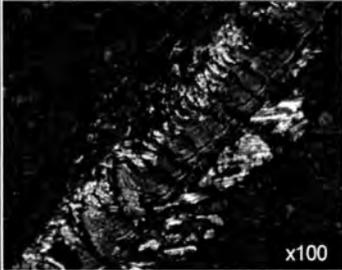
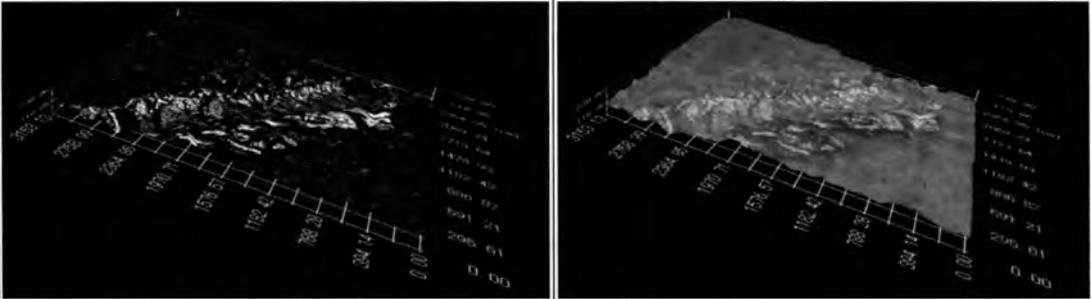
x100



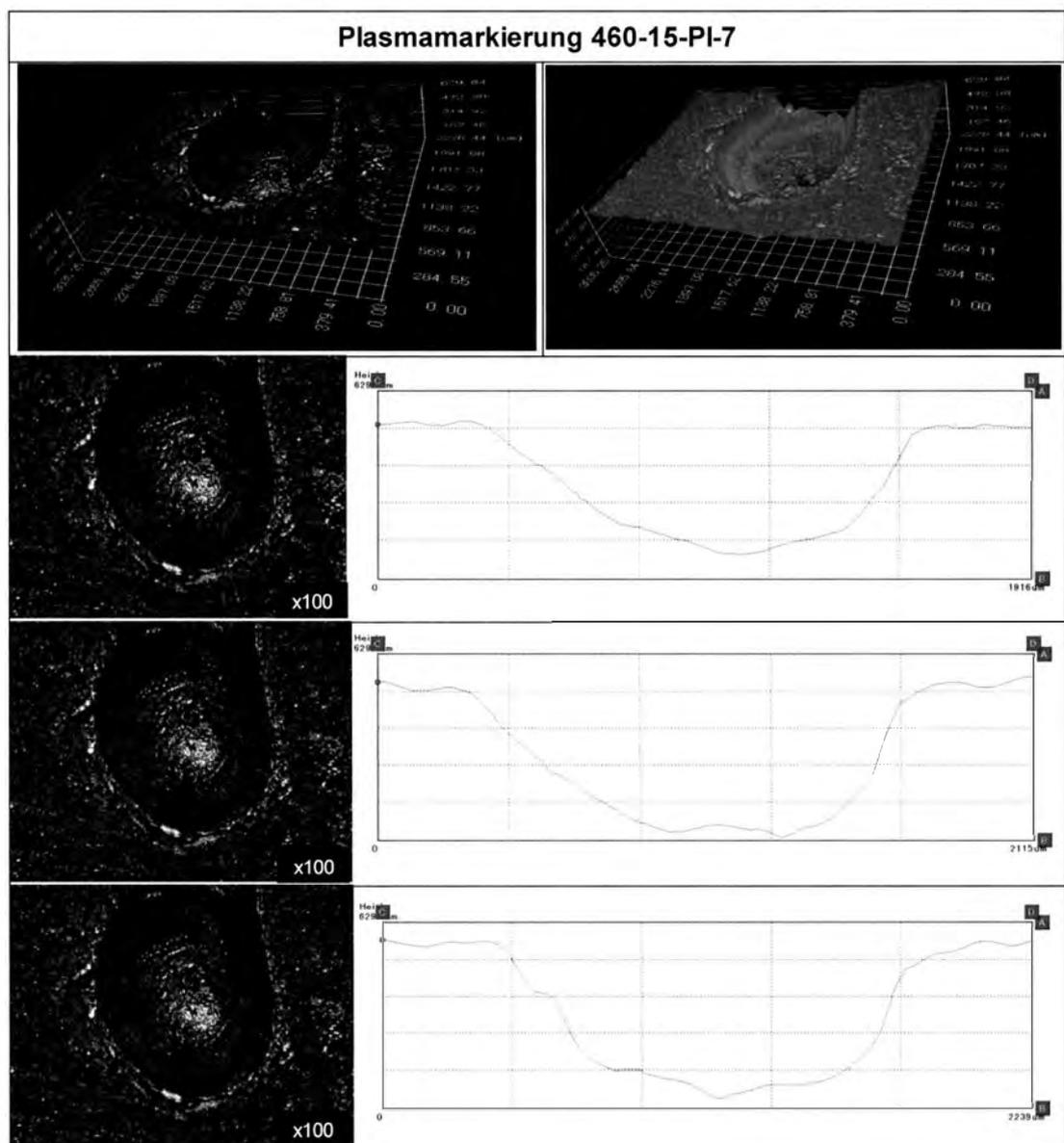
Mikroskopie Fräsmarkierung		
Blechdicken	15 / 25 / 40 mm	
Stahlsorten	S355J2 / S460N	
Markiertiefe	ca. 150-200 µm (S355) ca. 250-300 µm (S460)	
Markierwerkzeug	stationäre Einheit	
		
		x50 x100



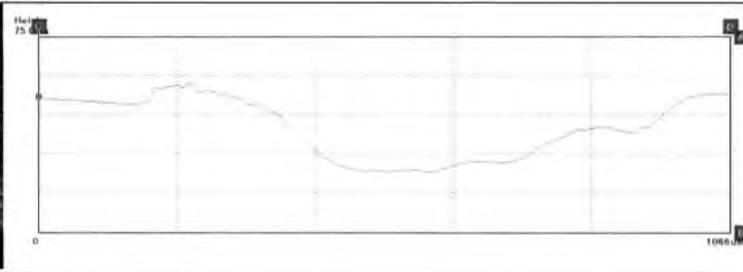
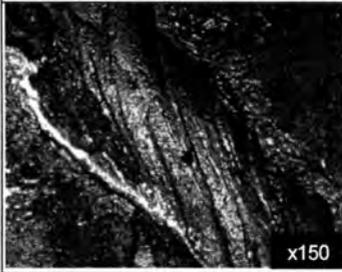
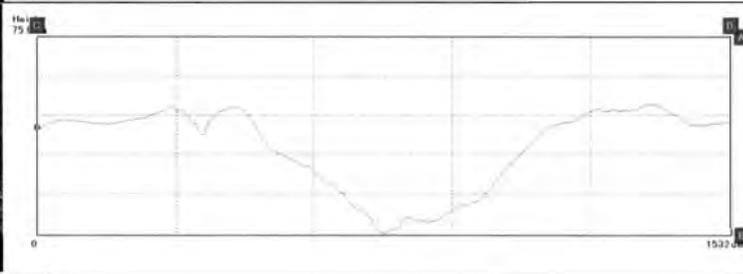
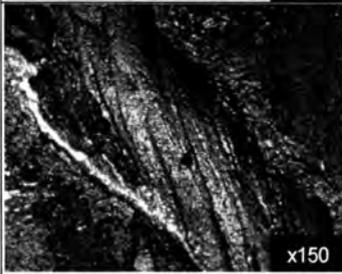
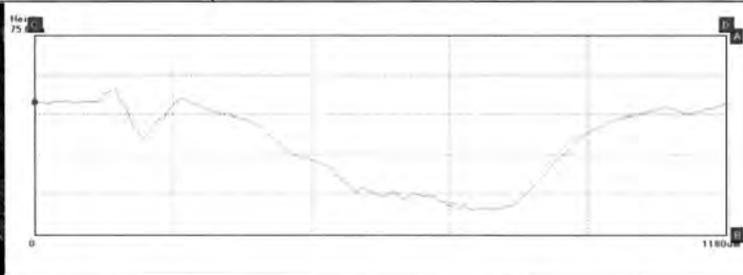
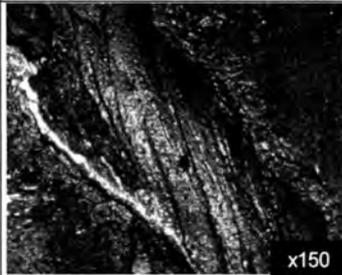
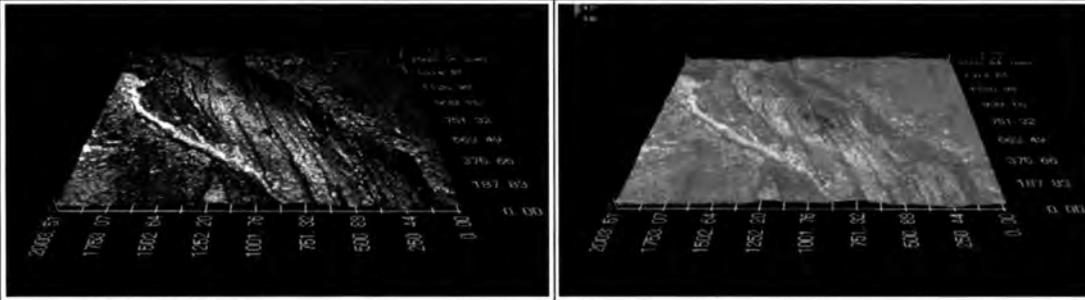
Fräsmarkierung 460-15-Fr-06

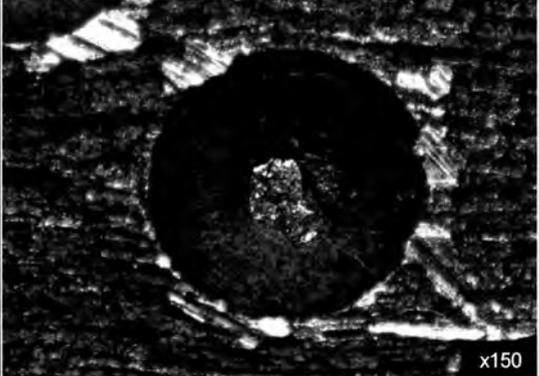


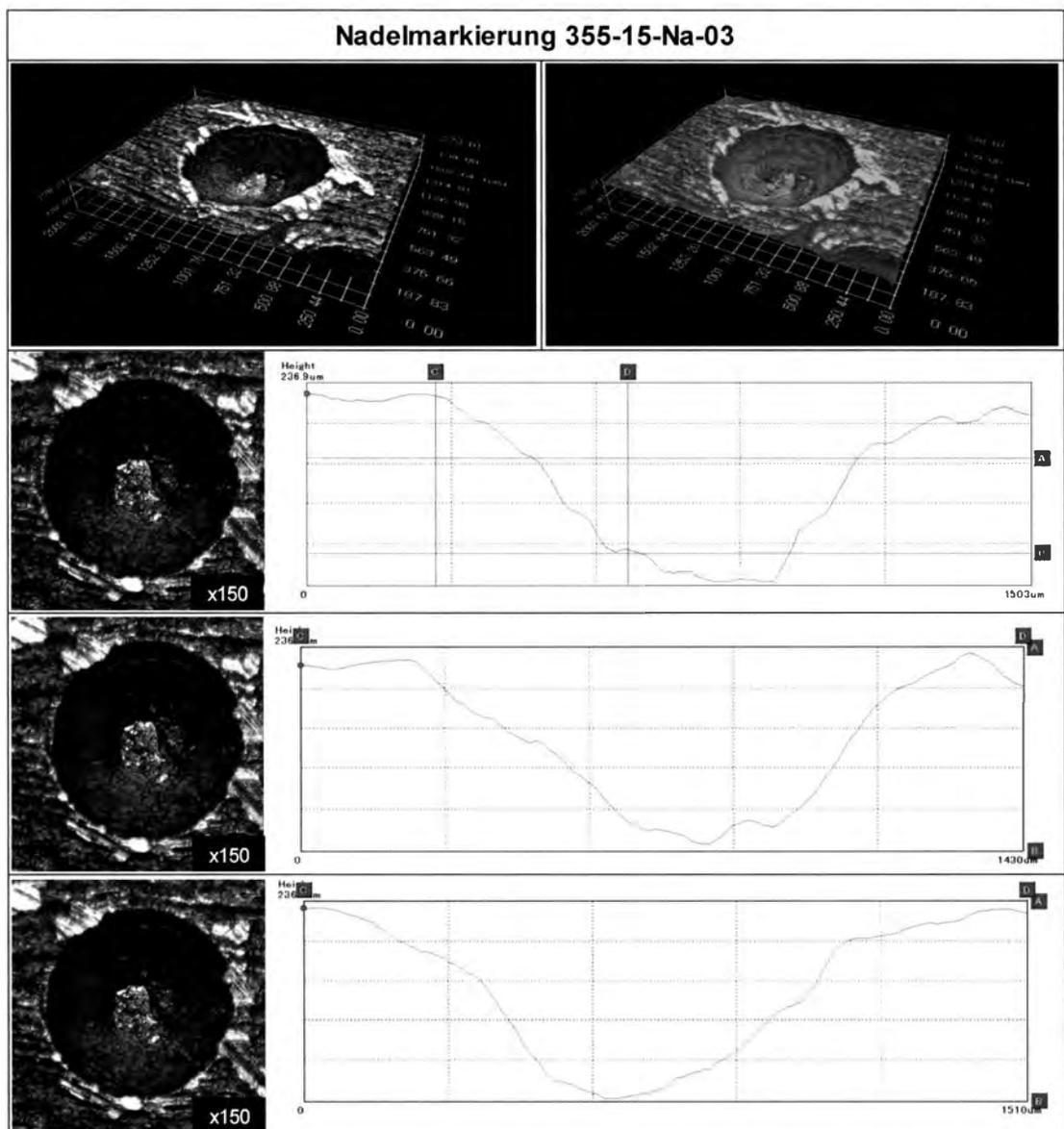
Mikroskopie Plasmamarkierung		
Blechdicken	15 / 25 / 40 mm	
Stahlsorten	S355J2 / S460N	
Markiertiefe	ca. 300-600 µm	
Markierwerkzeug	Peddinghaus Plasma-marker 10 A, 6,1 m/min	
		



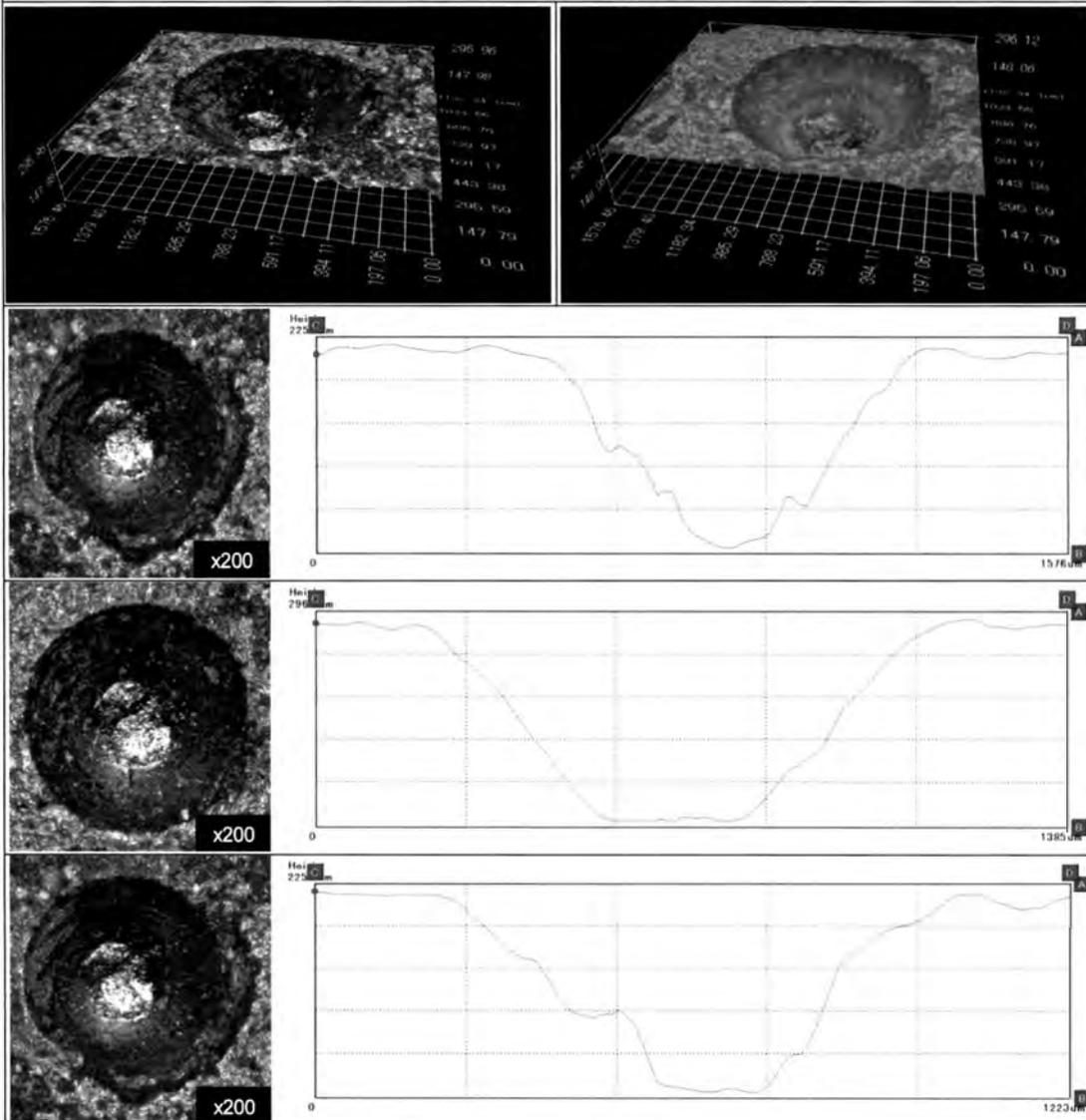
Plasmamarkierung 460-15-PI-06



Mikroskopie Nadelmarkierung		
Blehdicken	15 / 25 / 40 mm	
Stahlsorten	S355J2 / S460N	
Markiertiefe	ca. 250 - 300 µm	
Markierwerkzeug	Markator FlyMarker Pro, Doppelschlag	
		



Nadelmarkierung 460-15-Na-01



Deutscher Ausschuß für Stahlbau DAST

DAST-Richtlinien

Nr.	Titel		€
001	Richtlinien für Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (2/70)	überholt durch Zulassungsregelung	
002	Vorläufige Empfehlung zur Wahl der Stahlgütegruppen für geschweißte Stahlbauten (1/60)	ersetzt durch 009	
003	Vorläufige Richtlinie für HV-Verbindungen (1963)	ersetzt durch 010	
004	Vorläufige Empfehlungen für die Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im Stahlbau (5/62)	überholt ersetzt durch Norm-Regelung	
005	Ergänzung zu der vorläufigen Richtlinie für HV-Verbindungen für den Anwendungsbereich des Stahlhochbaus mit vorwiegend ruhender Belastung (3/67)	ersetzt durch 010	
006	Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau (1/80)	überholt durch 12/08	
006	Überschweißen von Fertigungsbeschichtungen im Stahlbau (12/08)	gültig	20,--
007	Lieferung, Verarbeitung und Anwendung wetterfester Baustähle (5/93)	gültig	23,--
008	Richtlinien zur Anwendung des Traglastverfahrens im Stahlbau (3/73)	überholt	
009	Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten (05/05)	überholt durch 05/08	
009	Stahlsortenauswahl für geschweißte Stahlbauten (05/08)	gültig	20,--
010	Anwendung hochfester Schrauben im Stahlbau (6/76)	überholt durch DIN 18800 Nov. 90	
011	Hochfeste schweißgeeignete Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenzenwerten von 460 und 690 N/mm ² - Anwendung für Stahlbauten (2/88)	gültig	18,--

Nr.	Titel		€
012	Beulsicherheitsnachweise für Platten zusammen mit Kommentar zur DASt-Richtlinie 012 - , DIN Grundlagen-Erläuterungen-Beispiele (10/78)	gilt nur in *) Verbindung mit DIN 18800, Teil 1, 3.81	43,--
013	Beulsicherheitsnachweise für Schalen (7/80)	Ersetzt durch DIN 18800, Teil 4/1990	
014	Empfehlungen zum Vermeiden von Terrassenbrüchen in geschweißten Konstruktionen aus Baustahl (1/81)	gültig	17,50
015	Träger mit schlanken Stegen (7/90), DIN	gültig	33,50
016	Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen (2/92)	gültig	37,--
017	Beulsicherheitsnachweise für Schalen - spezielle Fälle (Entwurf 10/92)	gültig	26,50
018	Hammerschrauben (11/01)	gültig	10,--
019	Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden (11/01)	gültig	18,--
020	Bemessung schlanker stählerner windbelasteter Kreiszyinderschalen (05/08)	gültig	25,--
021	Schraubenverbindungen aus feuerverzinkten Garnituren M 39 bis M 64 entsprechend DIN 6914, DIN 6915, DIN 6916 (08/06)	gültig	19,--
022	Feuerverzinken von tragenden Stahlbauteilen	gültig	20,--
023	Langlochverbindungen mit Schrauben	gültig	10,--
103	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1993 Teil 1-1, (11/93)	gültig	13,50
104	Nationales Anwendungsdokument (NAD) für DIN V ENV 1994 Teil 1-1, (2/94)	gültig	11,50

*) Das heißt z.T. im Stahlbrückenbau und im Stahlverbundbau

Forschungsberichte

Nr.	Titel	€
2/1997	Bemessungshilfen für den Nachweis von Stabquerschnitten im plastischen Zustand nach DIN 18 800, November 1990	26,--
3/1997	Trapezstegträger mit Steg-Gurt-Verbindung mit mechanischen Verbindungsmitteln	32,--
4/1997	10. DAST-Forschungskolloquium Stahlbau	23,--
1/1999	Tragverhalten von Dächern mit Rippen- oder Rippenrostgespärre	23,--
2/1999	Trägerverbund im Industriebau unter nicht ruhender Belastung bei Verwendung von Profilblechen	23,--
3/1999	Ausnutzung der Tragfähigkeit bei konzentrierter Normalkrafteinleitung	23,--
4/1999	11. DAST-Forschungskolloquium Stahlbau	23,--
5/1999	Zum Nachweis der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Stahlträger mit schlanken Stegen	23,--
1/2000	Ermüdung von Beleuchtungs- und Signalmasten durch den böigen Wind	43,50
2/2000	12. DAST-Forschungskolloquium Stahlbau	23,--
3/2000	Flachdecken mit integrierten Stahlträgern	23,--
4/2000	Dimensionierung und Nachweis von instabilitätsgefährdeten gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt (rechnerische und experimentelle Untersuchungen)	23,--
5/2000	Plastische Bemessung von Stirnplatten-Anschlüssen mit 4 Schrauben in einer Reihe	23,--
1/2001	Stützen mit dünnwandigen Querschnittsteilen (im Bereich geringer Schlankheiten)	32,--
2/2001	Optimale Ausnutzung von Verbund-Durchlaufträgern unter besonderer Berücksichtigung nachgiebiger, teiltragfähiger Verbindungen	32,--
3/2001	Bemessung hallenbautypischer Verbindungen	35,--
4/2001	Verformungsverhalten der Komponenten von wirtschaftlichen steifenlosen Anschlusskonstruktionen für die Anwendung plastischer Bemessungskonzepte im Stahlbau	32,--
5/2001	Anziehen von 8.8-Schrauben	20,50

Nr.	Titel	€
5/2001	Anziehen von 8.8-Schrauben	20,50
1/2002	Weiterentwicklung der Produktschnittstelle Stahlbau für die Anforderungen im Komplettbau	39,--
2/2002	Kontaktstöße mit Gurtlaschen	32,--
1/2003	14. DAST-Forschungskolloquium	20,--
2/2003	Experimentelle und analytische Untersuchungen an neuartigen Glas-Stahl-Verbindungen im Hinblick auf zukünftige Einsatzgebiete und Bemessungskonzepte	42,--
3/2003	Entwicklung eines Verfahrens zur Konformitätsprüfung der Produktschnittstelle Stahlbau	25,--
4/2003	Wirtschaftliche Aussteifung von Stahlkonstruktionen mit Glas zur Schubübertragung und zur Erhöhung der Filigranität der Konstruktion	48,--
1/2004	Ankerplatten und Einbaudetails zur Kraftübertragung im Stahlbau	58,--
2/2004	15. DAST-Forschungskolloquium	20,--
1/2005	Entwicklung und Anwendung von Planungssoftware zur brandschutztechnischen Optimierung von Stahlgeschossbauten	95,--
2/2005	Entwicklung von Abreißverbindungen von Stahlkonstruktionen an Brandwänden	42,80
3/2005	Mittragende Betongurtbreite niedriger Verbundträger	45,--
4/2005	Bemessung stabilitätsgefährdeter, gevouteter Kragträger mit T-förmigen Querschnitt und Stegausschnitten aus ferritischem Stahl und gevouteten Kragträgern mit T-förmigem Querschnitt aus austenitischen nichtrostenden Stählen (Edelstahl Rostfrei)	35,--
5/2005	Korrelationsbedingter Flächeneffekt der Windersatzlasten und die Auswirkung auf die Tragwerksreaktionen	45,--
6/2005	Ermüdungsverhalten von Betondübeln	35,--
1/2006	16. DAST-Kolloquium	30,--
2/2006	Realitätsnahe Bestimmung der Tragfähigkeit beul- und biegedrillknick-Gefährdeter dünnwandiger Stahlquerschnitte	60,--
3/2006	Einsatz überlanger Schrauben zur Verbundsicherung bei Verbundträgern aus Normal- und Leichtbeton	60,--
4/2006	Werkstoffwahl im Stahlbrückenbau	99,--

Nr.	Titel	€
1/2007	Abgrenzung des Anwendungsbereiches von Dächern nach DIN 18234	21,--
2/2007	Stahl-Glas-Verbindungen im Hinblick auf die Normung	109,--
3/2007	Einsatz von hochfesten Stählen und Betonen bei Hohlprofil-Verbundstützen	35,--
4/2007	Feststellung zulässiger Restspalte beim Schweißen	89,--
5/2007	Kranbahnträger – Wirtschaftliche Bemessung und Konstruktion robuster Radlasteinleitungen	80,--
1/2008	Entwicklung und Aufbereitung wirtschaftlicher Bemessungsregeln für Stahl- und Verbundträger mit schlanken Stegblechen im Hoch- und Brückenbau	80,--
2/2008	Duktilitätskriterien für Typisierte Stirnplattenverbindungen	50,--
1/2009	Effiziente Nachweisführung von biegeknickgefährdeten, dünnwandigen Stahlquerschnitten	80,--
3/2009	Entwicklung eines Bemessungsmodells für geschraubte, momententragfähige Kopfplattenverbindungen mit 4 Schrauben in einer Schraubenreihe auf der Grundlage der prEN 1993-1-8:2003	80,--
1/2010	Tragende Scheiben-Elemente aus Stahl-Glas-Verbund	35,--
4/2010	Gelenkige Sekundärträgeranschlüsse mit langen Fahnenblechen im Verbundbau	80,--
2/2015	Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile	80,--

Herausgeber:

Deutscher Ausschuß für Stahlbau DASt

Vertrieb:

Stahlbau Verlags- und Service GmbH,
Postfach 10 51 45, D-40042 Düsseldorf
Tel.: 0211/67078-01 - Fax: 0211/67078-21

Forschungsberichte 240812

e-mail: contact@deutscherstahlbau.de
Internet: www.deutscherstahlbau.de

Berichte von 1973 - 2004

Titel	Berichtsheft / Autor	Erläuterungen
<p>Abschlußberichte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Versuche zur Kippsicherheit von durchlaufenden Pfetten mit leichter Dacheindeckung • Traglastversuch an durchlaufenden U-Pfetten mit Aluminium-Trapezblechen als Dacheindeckung • Traglastversuch an durchlaufenden Pfetten mit Leichtbetonplatten als Dacheindeckung • Das Stabilitätsproblem des in Höhe des oberen Flansches wirklichkeitsnah belasteten I-Trägers • Traglastversuche im überkritischen Bereich zur Entwicklung eines wirklichkeitsnäheren Berechnungsverfahrens für Leichtmetall-Vollwandträger • Versuche zur Feststellung des Einflusses verschiedener Zwischenanstriche auf den Berührungsflächen von Nietverbindungen aus St 52 • Regelanschlüsse im Stahlhochbau - Teil I: Traglastversuche an durch Querkraft beanspruchte Winkelanschlüsse mit rohen Schrauben • Einfluß der exzentrischen Lage von Wendeln auf die Tragfähigkeit von Kopfbolzendübeln • Dauerversuche mit einseitig geschweißter Stumpfnah in V-Form auf Keramik-Unterlage • Dauerfestigkeitsversuche mit stumpfgestoßenen, in Normalgüte CO₂-geschweißten Stäben • Statische Versuche mit Verbindungen von Aluminium-Konstruktionen 	<p>1/1973</p> <p>Pelikan</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Oxford / Hildenbrand</p> <p>Fischer</p> <p>Steinhardt</p> <p>Hoffmann</p> <p>Oxford</p> <p>Roik / Lindner</p> <p>Hoffmann</p> <p>Hoffmann</p> <p>Seinhardt / Valtinat</p>	

Abschlußberichte	2/1975	
<ul style="list-style-type: none"> • Dauerfestigkeitsversuche mit brenngeschnittenen Proben aus St 52-3 • Stabilitätsverhalten gedrückter Gurte von Blechträgern • Traglasten von auf Biegung und Torsion beanspruchten Stäben unter Berücksichtigung des plastischen Werkstoffverhaltens • Untersuchung der Tragfähigkeit von Stahlkonstruktionen mit ebenen, scheibenartig beanspruchten Blechen mittels wirklichkeitsnaher Großversuche (Plattenbeulprogramm) • Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgern <ul style="list-style-type: none"> Sicherheitsbetrachtung beim Beulen von Kastenträgern Kurzreferate und Inhaltsangaben zu den Vorträgen der Fachsitzung I, Deutscher Stahlbautag 1974 Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger Aus der Arbeit des DAST-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“ • Ermittlung des Reibungswertes μ zwischen Betonfertigteilen und Stahlunterlage • Zur Sprödbruchsicherheit von verzinkten und unverzinkten Stahlbauteilen mit gestanzten Löchern • Abwürgeversuche an feuerverzinkten und schwarzen HV-Schrauben • Verbindungen mit Schließringbolzen im Anwendungsbereich des Stahlhochbaues mit vorwiegend ruhender Belastung • Tragverhalten von Schließringbolzenverbindungen in schwingend beanspruchten Stahlkonstruktionen • Biegesteife HV-Kopfplattenverbindungen (Regelanschlüsse im Stahlhochbau Teil I) • Verbindungen hochfester Stähle mit hochfesten Schrauben • Dauerfestigkeit von querbeanspruchten Stumpfnähten mit kreuzenden Strichraupen • Zusammenwirken von Stumpfnähten mit HV-Schrauben und Nieten bei ruhender und bei Dauerbelastung 	<p>Hoffmann Barbré Roik / Lindner</p> <p>Barbré / Jungbluth / Roik / Scheer / Steinhardt</p> <p>Dubas</p> <p>Roik Godfrey</p> <p>Massonnet</p> <p>Steinhardt Scheer</p> <p>Roik</p> <p>Martin</p> <p>Steinhardt / Valtinat Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Steinhardt / Valtinat</p> <p>Hoffmann</p> <p>Aurnhammer / Hoffmann</p>	

<p>Beiträge zum Beulproblem bei Kastenträgerbrücken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Einführung • Folgerungen aus den Schadensfällen im In- und Ausland • Der Merrison-Bericht und weiterführende Untersuchungen in Großbritannien • Neue Erkenntnisse und Theorien aus europäischen Forschungsarbeiten • Berechnungsmodelle für ausgesteifte Kastenträger • Aus der Arbeit des DASt-Unterausschusses „Stabilität“ und seiner Arbeitsgruppe „Plattenbeulen“ 	<p>3/1975,</p> <p>Hoffmann Roik Godfrey</p> <p>Massonet</p> <p>Steinhardt Nölke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages Hamburg 1974 Leitung: Roik</p>
<p>Beiträge zum Tragverhalten und zur Sicherheit von Stahlkonstruktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorwort und Einführung • Zur Berechnung und Konstruktion druckbeanspruchter Schalen aus Stahl • Zum Stabilitätsverhalten von Trägern im Stahlhochbau • Zum Tragverhalten und Einsatz von Trapezprofilblechscheiben • Der wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekt der Bauwerkssicherheit im Stahlbau • Grundgedanken zur Bemessung stählerner Eisenbahnbrücken auf Betriebsfestigkeit vor wahrscheinlichkeitstheoretischem Hintergrund 	<p>4/1977</p> <p>Jungbluth Bornscheuer</p> <p>Oxford Fischer Petersen</p> <p>Siebke</p>	<p>Vorträge aus der Fachsitzung II des Deutschen Stahlbautages Stuttgart 1976</p>
<p>Rohrsandwichbrücken aus Stahl Ein neuer Brückentyp für mittlere Spannweiten</p>	<p>5/1977 Jungbluth, Bode</p>	<p>Berichte aus dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, und dem Institut für Statik und Stahlbau, Technische Hochschule Darmstadt</p>

Beiträge zur Berechnung und Ausführung von Stahlkonstruktionen	6/1979 Scheer, Schumann, Ahrens, Kröplin, Schmidt, Peil, Beyer, Grassl, Langhoff, Rabe, Hering, Koch, Kanning, Koep, Born, Maier, Twelmeier, Griebenow, Harbord, Duddeck, Vollstedt	Vorträge zum 70. Geburtstag von Prof. Barbré 25.8.1977
Beiträge zur Normung Hochfeste Baustähle und Stabilität von Stahlbauteilen	7/1979 Jungbluth, Degenkolbe, Haneke, Schlüter, Seeger, Minner, Schönherr, Vogel, Scheer,	Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages in Düsseldorf 1978
Stahlprofilblech-Beton-Verbundplatten Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Tragverhalten	8/1979 Jungbluth, Schäfer, Gräfe	
Klärung des Tragverhaltens durch Bauteilversuche	9/1980 Scheer	Sonderdruck Vorträge aus der Fachsitzung I des Deutschen Stahlbautages Berlin 1980
Biegedrillknicken - Erläuterungen, Versuche, Beispiele	10/1980 Lindner, Gietzelt	
Kommentar zu DIN 18 800, Teil 2 (Gelbdruck) - Stabilitätsfälle im Stahlbau - Knicken von Stäben und Stabwerken	11/1981 Vogel, Lindner	
Plattenbeulen -8 Großversuche mit längs- und querausgesteiften Blechfeldern	12/1982 Roik, Kindmann, Schaumann	
Beiträge zu Berechnung und Konstruktion <ul style="list-style-type: none"> • Vereinfachte Stabilitätsnachweise von Stäben und Systemen • Aspekte der Gebrauchstüchtigkeit von Stahlbauten • Hohe Bauwerke aus Stahl - Statische und konstruktive Lösungen • Zukunftsaufgaben des Stahlbaues - Aufgaben für Forschung und Entwicklung 	13/1984 Roik Sedlacek Scheer Bärsch	
Bedarflasten unversteifter Stahlbleche unter Berücksichtigung von Vorverformungen und Eigenspannungen	14/1985 Jungbluth, Friemann, Kubsch	

Beiträge zu Berechnung und Konstruktion	15/1986 Lindner, Valtinat, Baehre, Krämer	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Hamburg 1986 Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	16/1988 Baehre, Bode, Lindner, Vogel	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Karlsruhe 1988
Bericht aus Forschung, Entwicklung und Normung	17/1990 Nather, Hosser, Petersen, Degenkolbe, Kalla, Schönherr	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Nürnberg 1990
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	18/1992 Scheer, Schmidt, Sedlacek, Lietz, Dahl, Mang, Brandes, Valtinat	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Berlin 1992
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	19/1994 Sedlacek, Blank, Güsgen, Hanswille, Ehm, Fischer, Eggert	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Bonn 1994
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	20/1996 Bossenmayer, Schmidt, Peil, Hubo, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Bremen 1996
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Dokumentation 651 Bossenmayer, Hanswille, Graße, Katzung, Schaumann, Bode, Valtinat, Haydrich, Grotmann, Pasternak, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Leipzig 1998
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Dokumentation 654 Bossenmayer, Lindner, Schleich, Böhme, Bschorr, Nentwig, Cierpinski, Huber, Kuhlmann, Kühnemund, Günther, Sedlacek Laufs, Wellershof, Bohmann, Kathage	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Stuttgart 2000

Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Dokumentation 657 Bohmann, Heinemeyer, Höhler, Keitel, Kühn, Lange, Langenberg, Lindner, Mangerig, Müller, Sedlacek, Schulz, Stötzel	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Hamburg 2002
Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung	Tagungsdokumentation zur Fachtagung anlässlich des Deutschen Stahlbautages Berlin 2004 Fontana, Hanswille, Keitel, Peil, Sedlacek	Vorträge der Fachsitzung I Deutscher Stahlbautag Berlin 2004

dast/berichte/beranl4

Berichte von 1915 - 1969

Titel	Jahr	
Der Einfluß der Nietlöcher auf die Längenänderung von Zugstäben und die Spannungsverteilung in ihnen	Ausgabe A, Heft 1, 1915 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Zur Einführung - Bisherige Versuche	Ausgabe B, Heft 1, 1915 Kögler	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
Versuche zur Prüfung und Abnahme der 3000 t-Maschine	Ausgabe A, Heft 2, 1920 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 2	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche mit Anschlüssen steifer Stäbe	Ausgabe A, Heft 3, 1921 Rudeloff	Berichte des Ausschusses für Versuche im Eisenbau
	Ausgabe B, Heft 3	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
	Ausgabe A, Heft 4	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche zur Ermittlung der Knickspannungen für verschiedene Baustähle	Ausgabe B, Heft 4, 1930 Rein	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 5	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Dauerversuche mit Nietverbindungen	Ausgabe B, Heft 5, 1935 Graf	Berichte des Ausschusses für Versuche im Stahlbau
	Ausgabe A, Heft 6	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen über die Knickfestigkeit von gestoßenen Stützen mit plangefrästen Stoßflächen und nur teilweiser Stoßdeckung (Kontaktstöße) bei mittlerer und außermittiger Belastung	Ausgabe B, Heft 6, 1936 Bierett, Grüning	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 7	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Über das Verhalten geschweißter Träger bei Dauerbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung der Schweißspannungen	Ausgabe B, Heft 7, 1937 Bierett	Berichte des DAST

	Ausgabe A, Heft 8	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche über den Einfluß der Gestalt der Enden von aufgeschweißten Laschen in Zuggliedern und von aufgeschweißten Gurtverstärkungen an Trägern	Ausgabe B, Heft 8, 1937 Graf	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 9	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Aus Untersuchungen mit Leichtfahrbahndecken zu Straßenbrücken	Ausgabe B, Heft 9, 1938 Graf	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 10	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Untersuchungen zur Ermittlung günstiger Herstellungsbedingungen für die Baustellengröße geschweißter Brückenträger	Ausgabe B, Heft 10, 1940 Bierett	Berichte des DAST
	Ausgabe A, Heft 11	In der DAST-Geschäftsstelle nicht vorhanden.
Versuche und Feststellungen zur Entwicklung der geschweißten Brücken	Ausgabe B, Heft 11, 1940 Graf	Berichte des DAST
Versuche mit Nietverbindungen	Heft 12, 1941	Berichte des DAST
Einfluß der Nahtform und der Schweißausführung auf die Querverspannung beim Schweißen unter Einspannung	Heft 13, Albers	Berichte des DAST
Versuche über das Verhalten von geschweißten Trägern unter oftmals wiederholter Belastung	Heft 14, 1942 Graf	Berichte des DAST
Versuche mit geschweißten Trägern zur Beurteilung der Eignung der verwendeten Werkstoffe und der Art der Herstellung der Träger. Prüfung der Werkstoffe mit dem Nutzschweißbiegeversuche und mit dem Kerbschlagbiegeversuch	Heft 15, 1943 Graf	Berichte des DAST
Versuche mit Schraubverbindungen	Heft 16, 1951 Graf	Berichte des DAST
Versuche über die Widerstandsfähigkeit von geschweißten Querträgeranschlüssen bei oftmals wiederholter Biegebelastung	Heft 17, 1952 Graf / Munzinger	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	1. Teil, Heft 18, 1954 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Versuche an Verbundträgern	Heft 19, 1956 Graf / Brenner	Berichte des DAST
Thermodynamik des Sprödbruches und ihre Anwendung im Stahlbau	Heft 20, 1957 Kuntze	Berichte des DAST

Thermodynamik des Sprödbruches und ihre Anwendung im Stahlbau	2. Teil, Heft 20a, 1959 Kuntze	Berichte des DAST
Der Feuerschutz im Stahlhochbau insbesondere von Stahlstützen	Heft 21, 1959 Boué	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben	II. Teil, Heft 22, 1959 Steinhardt , Möhler	Berichte des DAST
Untersuchungen zur Anwendung der elektrischen Widerstandspunktschweißung im allgemeinen Stahlbau	1. Teil, Heft 23, 1960, Bierett, Steinhardt	Berichte des DAST
HV-verschraubte Kopfplattenverbindungen bei biegefesten Stabwerken	Vorabdruck aus Heft 24 1961 Steinhardt, Schlaginhaufen	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	III. Teil, Heft 24, 1962 Steinhardt, Möhler	Berichte des DAST
Versuche zur Anwendung vorgespannter Schrauben im Stahlbau	IV. Teil, Heft 25, 1969 Steinhardt, Möhler, Valtinat	Berichte des DAST

DAST/Berichte/Anlage für Berichte 1915-1969

