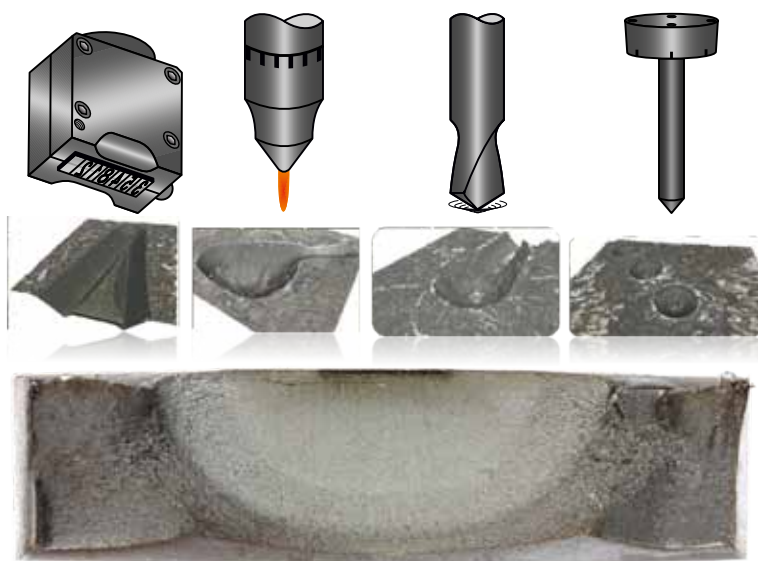


Dominik Jungbluth



**Einfluss dauerhafter Kennzeichnungsmethoden
auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen**

Einfluss dauerhafter Kennzeichnungsmethoden auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften,
der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dominik Jungbluth M. Sc.

aus Düsseldorf

Referentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Korreferentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Eingereicht: 18.08.2017

Mündliche Prüfung: 13.03.2018

Abteilung Bauwissenschaften der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Institut für Metall- und Leichtbau

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Schriftenreihe Institut für Metall- und Leichtbau
Universität Duisburg-Essen
herausgegeben von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Band 5

Dominik Jungbluth

**Einfluss dauerhafter Kennzeichnungsmethoden
auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6191-8

ISSN 1867-6782

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen.

Mein erster und ganz besonderer Dank geht an meine Doktormutter Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner, die mich während meiner Promotion immer geführt und gefördert hat und mit ihrer Energie und Akribie zum Gelingen dieser Promotion beigetragen hat. Im Speziellen möchte ich mich für den immer sehr herzlichen und familiären und zugleich direkten und professionellen Umgang bedanken.

Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Frau Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Weiterhin geht mein Dank an Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Carolin Birk und Herrn Prof. Dr.-Ing. André Niemann, die als Prüfer meine Disputation begleitet haben.

Den Mitarbeitern des Institut für Metall- und Leichtbau danke ich für den freundschaftlichen und kollegialen Umgang. Es ist immer eine Freude in diesem Umfeld arbeiten zu dürfen.

Nicht zuletzt geht mein Dank an meine Familie, insbesondere an meine Eltern, die mich bis hierher begleitet, gefördert und geprägt haben.

Meiner Frau Cora gilt ein großer Dank für ihre grenzenlose Unterstützung und ihren unerschütterlichen Glauben an mich.

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 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, in denen die Markierung keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat.

Eine Forderung nach dauerhaften Kennzeichnungsmethoden impliziert die Widerstandsfähigkeit der Markierungen gegenüber nachgeschalteten Fertigungsprozessen 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 Produkte 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 prinzipiell nicht möglich ist.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, eine Einschätzung des Einflusses praxisüblicher dauerhafter Kennzeichnungsmethoden auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen zu erlangen, mit deren Hilfe sich die Schwere der ermüdungswirksamen Schädigung der Kennzeichnungsmethoden abbilden lässt.

Hierzu werden die durch die untersuchten Kennzeichnungsmethoden installierten Oberflächenkerben charakterisiert und spezifische Eigenschaften herausgearbeitet. Darüber hinaus werden Ermüdungsversuche an Prüfkörpern vorgestellt und interpretiert. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen umfassen Versuchsserien mit Prüfkörpern aus der im Brückenbau üblichen Stahlsorte S355J2

sowie der Stahlsorte S460N zur Abdeckung eines höheren Festigkeitsbereiches. Zur Überprüfung eines möglichen Blechdickeneffektes wurden drei verschiedene Blechdicken 15, 25 und 40 mm untersucht.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften der Kerben werden die vorgestellten Kennzeichnungsmethoden anhand von Finite Elemente Simulationen eingeordnet und bewertet. Mithilfe aller erarbeiteten Versuchsdaten werden Empfehlungen zur Einarbeitung der Ergebnisse in die Normung vorgestellt.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass das Ermüdungsverhalten durch aufgebrauchte Kennzeichnungen negativ beeinflusst wird. Die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit lässt sich für die meisten Kennzeichnungsmethoden 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 Kerbfallkatalogs 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. EN 1090-2 specifies 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 hard stamping, scribing, 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 details are not covered within the detail categories of EN 1993-1-9.

For this reason, in the frame of this thesis, notches installed by the mentioned durable marking methods are characterized and specific geometrical properties are identified by three-dimensional models achieved with microscopic focus-variation technology. Furthermore, experimental fatigue tests with specimens of two different steel grades S355J2 and S460N are presented and evaluated. Three different plate thicknesses 15, 25 and 40 mm were examined to evaluate whether a size effect can be observed.

Based on the experimental investigations concerning the geometrical properties, the examined durable marking methods are classified and reviewed using finite element simulations. Regarding the results of the experimental and numerical investigations, the achieved insights are used to formulate recommendations for considering and dealing with durable marking methods.

As expected, the fatigue behaviour is influenced by the markings with a decrease of the fatigue life. The influence of markings on the fatigue life depends for most methods on the geometry and the surface conditions of the notch. Nevertheless, the achieved fatigue strengths lead into relatively high FAT classes according to EN 1993-1-9.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Zusammenfassender Überblick	4
2 Stand der Technik und Wissenschaft zu Oberflächenkerben infolge Kennzeichnungen und unplanmäßigen Ungängen	7
2.1 Grundlagen / Einführung	7
2.2 Kennzeichnungsmethoden im Stahlbau	8
2.2.1 Temporäre Kennzeichnungen	8
2.2.2 Dauerhafte Kennzeichnungen	12
2.3 Oberflächenkerben infolge unplanmäßiger Ungängen	22
2.4 Ermüdungsfestigkeit gekennzeichnete Bauteile	22
2.4.1 Allgemeines	22
2.4.2 Rissentstehung und Risswachstum	23
2.4.3 Ermüdungsversuch	26
2.5 Oberflächenkerben: Stand der Technik	28
2.5.1 Stand der Normung	28
2.5.2 Untersuchungen zur Ermüdung gekennzeichnete Bauteile	31
2.6 Zusammenfassung	38
3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeiten infolge dauerhafter Kennzeichnungen	41
3.1 Allgemeines	41
3.2 Herstellung und Charakterisierung der Prüfkörper	44
3.2.1 Voruntersuchungen	44
3.2.2 Hauptuntersuchungen	45
3.3 Versuchsbeschreibung	50

3.4	V Versuchsergebnisse durchgeführter Ermüdungsversuche an markierten Probekörpern	51
3.4.1	Allgemeines	51
3.4.2	Hartes Stempeln	53
3.4.3	Fräsen	59
3.4.4	Plasmamarkieren	64
3.4.5	Nadeln	73
3.5	Zusammenfassende Erläuterungen	75
4	Mikroskopische Untersuchungen zur Charakterisierung dauerhafter Kennzeichnungskerben	79
4.1	Allgemeines	79
4.2	Geometrische Parameter auf Basis fokusvariiierender Mikroskopie	79
4.3	Charakterisierung typischer Kennzeichnungskerben	81
4.3.1	Hartes Stempeln	81
4.3.2	Fräsen	84
4.3.3	Plasmamarkieren	91
4.3.4	Nadeln	97
4.4	Validierung der Messwerte anhand von Referenzmessungen . . .	98
4.5	Zusammenfassende Erläuterungen	104
5	Einordnung geometrischer Einflüsse von Oberflächenkerben anhand numerischer Parameterstudien	109
5.1	Allgemeines	109
5.2	Definition des Kerbspannungsfaktors	110
5.3	Idealisierung der Oberflächenkerben zur Modellbildung	111
5.4	FE-Modellierung	113
5.4.1	Modellaufbau und -parameter	113
5.4.2	Konvergenz	115
5.5	Kerbspannungsfaktoren	122
5.5.1	Allgemeines	122
5.5.2	Einfluss des Öffnungswinkels	123
5.5.3	Einfluss der Blechdicke	124
5.5.4	Einfluss der Länge der Kerbe	127
5.5.5	Nadelmarkierungen	128
5.5.6	Einfluss der Kerbtiefe und des Kerbradius	129

5.6	Berücksichtigung von nichtlinearem Materialverhalten	133
5.6.1	Allgemeines	133
5.6.2	Materialgesetz	133
5.6.3	Stützwirkung	134
5.7	Kerbwirkungszahlen	138
5.8	Zusammenfassende Erläuterungen	144
6	Einordnung der experimentellen und numerischen Untersuchungen im Hinblick auf eine Weiterentwicklung der EN 1090-2 und der EN 1993-1-9	147
6.1	Allgemeines	147
6.2	Diskussion aller vorhandenen Versuchsdaten	147
6.2.1	Einfluss der Kennzeichnungsmethode	147
6.2.2	Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl und Ermüdungsfestigkeit	158
6.2.3	Einfluss der Blechdicke	159
6.2.4	Einfluss der Streckgrenze	160
6.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Normung	161
6.3.1	Allgemeines	161
6.3.2	Empfehlung zur Überarbeitung der EN 1090-2	161
6.3.3	Einordnung der Ergebnisse in Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9	164
6.4	Zusammenfassende Erläuterungen	165
7	Zusammenfassung und Ausblick	167
	Literatur	175
	Anhänge	
A	Typische geometrische Parameter von Kerben infolge dauerhafter Kennzeichnungen	181
B	Datenblätter einzelner Versuchsserien	187
C	Kerbwirkungszahlen	211