

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2014-2

Christian Ludwig

**Plastische Querschnittstragfähigkeit von
doppelsymmetrischen I-Querschnitten –
Tragfähigkeitsbedingungen, Genauigkeit,
Nebeneffekte**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Bochum, Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2811-9

ISSN 1614-4384

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2009 bis 2013 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für konstruktiven Ingenieurbau - Lehrstuhl für Stahl-, Holz- und Leichtbau - der Ruhr-Universität Bochum. Sie wurde von der dortigen Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Kindmann für die Betreuung und Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit sowie die Übernahme des Referates.

Herr Prof. Dr.-Ing. R. Stroetmann danke ich recht herzlich für die Übernahme des Koreferates.

Weiterhin gilt mein Dank allen meinen Kollegen, die durch ihre Diskussionsbereitschaft zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben. Dabei ist besonders Rebekka Ebel für ihre wertvollen Anregungen bei der Durchsicht des Manuskripts zu nennen.

Schließlich danke ich meiner Familie und insbesondere meiner Frau Christiane für ihre verständnisvolle Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

März 2014

Christian Ludwig

Doktorarbeit eingereicht am: 23.08.2013

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2013

Berichter:

Prof. Dr.-Ing. R. Kindmann, Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr.-Ing. R. Stroetmann, Technische Universität Dresden

für Christiane

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Stand der Forschung	6
1.3	Bezeichnungen	9
1.4	Annahmen und Voraussetzungen	11
1.4.1	Grundlagen	11
1.4.2	Materialverhalten	13
2	Grundlagen	15
2.1	Vorbemerkungen	15
2.2	Spannungsermittlung	15
2.3	Querschnittsklassen	17
2.4	Spannungsnachweise (Elastizitätstheorie)	19
2.5	Nachweise nach der Plastizitätstheorie	20
2.6	Klassifizierung der plastischen Querschnittstragfähigkeit	22
3	Methoden zur Ermittlung der plastischen Querschnittstragfähigkeit	23
3.1	Vorbemerkungen	23
3.2	Experimentelle Untersuchungen	23
3.3	Dehnungsiteration	23
3.4	Optimierungsverfahren	24
3.4.1	Allgemeines	24
3.4.2	Berechnungsprogramm <i>LILOBEC</i>	25
3.5	Berechnungen nach Fließzonentheorie	30
4	Rechteckquerschnitt	31
4.1	Vorbemerkungen	31
4.2	Grenzschnittgrößen für den Rechteckquerschnitt	31
4.2.1	Grundlagen	31
4.2.2	Plastische Grenzschnittgröße $M_{pl, xp}$	32
4.2.3	Plastische Grenzschnittgröße $M_{pl, \omega}$	39
4.3	Schnittgrößenkombinationen beim Rechteckquerschnitt	42
4.3.1	Vorbemerkungen	42
4.3.2	Schnittgrößen N und M	42
4.3.3	Schnittgrößen N , M_y und M_z mit unplanmäßiger Torsion	44
4.3.4	Schnittgrößen N , M_y und M_z ohne unplanmäßige Torsion	47
4.3.5	Schnittgrößen V und M_{xp}	51

5	Ausrundungsflächen	56
5.1	Vorbemerkungen	56
5.2	Gleichschenklige, rechtwinklige Dreiecke	56
5.3	Ausrundungen	58
6	Doppelsymmetrische geschweißte I-Profile	63
6.1	Vorbemerkungen	63
6.2	Grenzschnittgrößen	63
6.2.1	Grundlagen	63
6.2.2	Plastische Grenzschnittgrößen N_{pl} , $M_{pl,y}$, $M_{pl,z}$, $V_{pl,z}$ und $V_{pl,y}$	64
6.2.3	Plastische Grenzschnittgröße $M_{pl,xp}$	65
6.2.4	Plastische Grenzschnittgröße $M_{pl,\omega}$	69
6.3	Schnittgrößenkombinationen	71
6.3.1	Vorbemerkungen	71
6.3.2	Grundlagen	72
6.3.3	Schnittgrößen N und M_y	73
6.3.4	Schnittgrößen N und M_z	77
6.3.5	Schnittgrößen M_y und M_z	80
6.3.6	Schnittgrößen N , M_y und M_z ohne unplanmäßige Torsion	87
6.3.7	Schnittgrößen N , M_y , M_z und M_ω	92
6.3.8	Sonderfall Schnittgrößen N , M_y und M_z mit unplanmäßiger Torsion	98
6.3.9	Gleichzeitige Wirkung von σ - und τ -Schnittgrößen	103
7	Doppelsymmetrische gewalzte I-Profile	110
7.1	Vorbemerkungen	110
7.2	Grenzschnittgrößen	110
7.2.1	Grundlagen	110
7.2.2	Plastische Grenzschnittgrößen N_{pl} , $M_{pl,y}$, $M_{pl,z}$, $V_{pl,z}$ und $V_{pl,y}$	111
7.2.3	Plastische Grenzschnittgröße $M_{pl,xp}$	113
7.2.4	Plastische Grenzschnittgröße $M_{pl,\omega}$	116
7.3	Schnittgrößenkombinationen	119
7.3.1	Vorbemerkungen	119
7.3.2	Schnittgrößen N und M_y	119
7.3.3	Schnittgrößen N und M_z	123
7.3.4	Schnittgrößen M_y und M_z	125
7.3.5	Schnittgrößen N , M_y und M_z ohne unplanmäßige Torsion	127
7.3.6	Schnittgrößen N , M_y , M_z und M_ω	128
7.3.7	Sonderfall Schnittgrößen N , M_y und M_z mit unplanmäßiger Torsion	129
7.3.8	Gleichzeitige Wirkung von σ - und τ -Schnittgrößen	132

8	Nichtlineare Berechnungen und experimentelle Untersuchungen	133
8.1	Vorbemerkungen	133
8.2	Nichtlineare Berechnungen nach der Fließzonentheorie	133
8.2.1	Grundlagen	133
8.2.2	Querschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Normalkraft	136
8.2.3	Querschnitte mit Torsionsbeanspruchung	143
8.3	Experimentelle Untersuchungen	151
9	Zusammenfassung	154
Literaturverzeichnis		159

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die plastische Querschnittstragfähigkeit von doppelsymmetrischen I-Querschnitten untersucht. Dabei stehen die Entwicklung von Tragfähigkeitsbedingungen, ihre Genauigkeit und die Identifikation von ungewollten Nebeneffekten im Vordergrund. Bekannte Methoden zur Ermittlung der plastischen Querschnittstragfähigkeit werden weiterentwickelt und die bisherigen Annahmen kritisch überprüft.

Ein Schwerpunkt der Arbeit ist die Entwicklung von genauen bzw. baupraktisch genauen Interaktionsbeziehungen für häufig vorkommende Anwendungsfälle. Für Standardanwendungsfälle von doppelsymmetrischen geschweißten I-Profilen können die exakten Lösungen der Interaktionsbeziehungen angegeben werden. Ferner wird eine Methode zur Berücksichtigung der Abrundungen von doppelsymmetrischen gewalzten I-Profilen vorgestellt. Es erfolgt die Überprüfung und Bewertung der Nachweisbedingungen in nationalen und internationalen Regelwerken bezüglich ihrer Genauigkeit.