

Schriftenreihe des

Lehrstuhls für
Stahlbau und Leichtmetallbau
der RWTH Aachen

Heft 85 - 2019

Analyse des festigkeitsgesteuerten Tragverhaltens ungeschweißter Stahlbau- teile mit Hilfe der Schädigungsmechanik

von Simon Schaffrath

Analyse des festigkeitsgesteuerten Tragverhaltens ungeschweißter Stahlbauteile mit Hilfe der Schädigungsmechanik

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Simon Schaffrath

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann

Tag der mündlichen Prüfung: 09.11.2018

Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Gründer:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Gerhard Sedlacek

Heft 85

Simon Schaffrath

**Analyse des festigkeitsgesteuerten Tragverhaltens
ungeschweißter Stahlbauteile
mit Hilfe der Schädigungsmechanik**

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Shaker Verlag
Aachen 2019

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2018)

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6433-9

ISSN 0722-1037

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 der Herausgeber

Das in der europäischen Stahlbaunormung verankerte Grenzzustandskonzept zielt auf eine Bemessung ab, die sich an den wirklichen Tragfähigkeiten der Konstruktion orientiert. Grundlage der Widerstandsfunktionen materialfestigkeitsorientierter Bemessungsfälle (d.h. Bruch infolge Zug oder Biegezug) des Stahlbaus unter statischer Belastung sind Experimente, in denen neben dem Last-Verformungsverhalten die Grenztraglast als integrale Größe der mechanischen Belastbarkeit erfasst wird. Die Vorhersage der mechanischen Grenzbeanspruchbarkeit folgt in der Regel vereinfachenden Ingenieurmodellen. Diese gelten jedoch grundsätzlich nur näherungsweise, da ein wirkliches Verständnis des Bruchvorgangs im Material bei Annäherung an die Grenzlast indes fehlt. So wird der Bruch meistens als „Phänomen“ hingenommen, dessen Grenzlastvorhersage entweder mit der Festigkeit f_t des Zugversuchs über einfache Ingenieurmodelle näherungsweise verknüpft oder ersatzweise auf das mit der Streckgrenze f_y verbundene Fließkriterium zurückgeführt wird.

Dies hat zum einen für den Einsatz höherfester Stähle und die Ausnutzung ihrer Leistungsmerkmale deutliche Nachteile, zum anderen werden eine Prognoseverbesserung und Streuungsreduzierung, die auf konventionellen Ingenieurmodellen basieren, sehr erschwert. Diese Probleme könnten durchaus überwunden werden, wenn realistischere Methoden zur Bestimmung der Grenzzustände entwickelt werden, insbesondere unter Einbezug der Schädigungsinitiierung und -entwicklung und der damit verbundenen Beeinflussung der tatsächlichen Duktilität maßgebender Details. Hierbei kann auf neue schädigungsmechanische Ansätze zurückgegriffen werden.

Herr Dipl.-Ing. Simon Schaffrath hat sich in seiner Dissertation dieser Aufgabe angenommen und unter Verwendung geeigneter schädigungsmechanisch gestützter Modelle der Schädigungsinitiierung und des Schädigungsfortschritts einen Vorschlag zur Grenzlastvorhersage von stahlbautypischen Details (insbesondere dem gelochten Zugstab mit Flankenriss) bei Versagen im Grundwerkstoff gemacht.

Aufgrund dieser Dissertation sind entsprechende Änderungen der Eurocode 3 Regeln festigkeitskontrollierter Versagenszustände über das CEN/TC 250/SC 3 bereits vorgeschlagen worden.

Dank sei an dieser Stelle der Förderung des Projekts P1019 über die AiF und die FOSTA ausgesprochen. Auch ist Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Münstermann für die Übernahme des Korreferats herzlich zu danken.

Aachen, im November 2018

Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Feldmann

Kurzfassung

Das in den europäischen Regelwerken des Stahlbaus aufgenommene Bemessungskonzept basiert auf Tragfähigkeitsfunktionen, welche über vereinfachte Ingenieurmodelle das Bauteilverhalten beschreiben und implizit eine ausreichende Umlagerungskapazität des Werkstoffs annehmen. Der Nachweis der Werkstoffduktilität erfolgt jedoch nicht über Anforderungen an die Hochlagenzähigkeitseigenschaften, sondern über Ersatzkriterien der technischen Spannungs-Dehnungs-Linie. Die bisherige Vorgehensweise erweist sich insofern als problematisch, als dass die Tragfähigkeitsfunktionen inhärenten Streuungen unterliegen und der Gültigkeitsbereich auf das Versuchswertefeld beschränkt ist.

Eine Weiterentwicklung des Bemessungskonzeptes erfordert die genauere Betrachtung des Bauteilverhaltens im Grenzzustand. Hierfür bieten sich prinzipiell bruchmechanische und schädigungsmechanische Konzepte an, welche im Gegensatz zu Bauteilversuchen ermöglichen, die geometrie- und werkstoffabhängigen Einflüsse auf das festigkeitsgesteuerte Traglastverhalten individuell zu untersuchen.

In dieser Arbeit wird zunächst das Verformungs- und Bruchverhalten von Stahl diskutiert. Dies beinhaltet die temperaturabhängig auftretenden Bruchmechanismen Spaltbruch und Gleitbruch sowie das Phänomen der plastischen Instabilität. Anschließend folgt eine umfassende Erläuterung der Hintergründe zur Auslegung von Stahlkonstruktionen im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Neben dem Sicherheitskonzept wird dabei insbesondere auf den Tragfähigkeitsnachweis und die zähigkeitsbasierte Stahlgütewahl eingegangen.

Darüber hinaus werden experimentelle Untersuchungen an Großzugproben aus S355 bis S960 vorgestellt. Hierbei werden sowohl Löcher als auch scharfe Anrisse als typische Querschnittsschwächungen berücksichtigt. Bei den Versuchen auf Bauteilskala zeigt sich, dass die Traglast gelochter Probekörper von der plastischen Instabilität gesteuert wird. Im Gegensatz dazu tritt bei Proben mit scharfem Anriss bereits im global elastischen Verhalten eine Rissbildung im Kerbgrund auf, was in Abhängigkeit vom Verfestigungsverhalten und den Zähigkeitseigenschaften zu einer Reduzierung der Tragfähigkeit führt.

Anschließend wird die Möglichkeit einer zähigkeitsbasierten Tragfähigkeitsanalyse in der Hochlage anhand von bruchmechanischen Berechnungen geprüft. Die bruchmechanischen Ansätze sind generell sehr effizient, jedoch ist der Anwendbarkeit und der Ergebnisgüte aufgrund der Geometrieabhängigkeit der Widerstandsgrößen sowie der Voraussetzung einer rissähnlichen Fehlstelle Grenzen gesetzt. In Kombination mit der ausgeprägten Streuung der Korrelationsfunktionen ergeben die Berechnungen unrealistisch hohe Zähigkeitsanforderungen, welche sich experimentell nicht belegen lassen.

In einem weiteren Schritt wird eine zähigkeitsbasierte Tragfähigkeitsanalyse auf Basis schädigungsmechanischer Konzepte eruiert. Hierzu werden die Schädigungsmodelle nach GURSON-TVERGAARD-NEEDLEMAN (GTN), JOHNSON-COOK (JC) und BAI-WIERZBICKI (BW) zur numerischen Vorhersage duktilen Werk-

stoffversagens vorgestellt und diskutiert. Zusätzlich werden verschiedene Möglichkeiten aufgewiesen, um sowohl die erforderlichen Fließkurven als auch die Schädigungsparameter auf Basis tatsächlicher oder synthetischer Materialeigenschaften zu bestimmen.

Die zähigkeitsbasierte Tragfähigkeitsanalyse erfolgt auf Basis der Grenzdehnungskurve nach BAI-WIERZBICKI, wobei die Schädigungsparameter über Einheitszellberechnungen mit dem mikromechanisch motivierten GTN-Modell abgeleitet und anschließend an die Elementgröße der Bauteilsimulationen angepasst werden. Unabhängig von der Stahlsorte kann somit eine sehr gute Übereinstimmung bei der Gegenüberstellung mit den experimentellen Ergebnissen erzielt werden.

Im Anschluss daran werden zähigkeitsbasierte Duktilitätsanforderungen über die Ermittlung zulässiger Kombinationen aus Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften abgeleitet. Hierbei zeigt sich, dass höherfeste Stähle aufgrund des geringeren Verfestigungsverhaltens weniger Werkstoffduktilitäten benötigen als dies für niederfeste Baustähle der Fall ist.

Abschließend erfolgt die Übertragung des schädigungsmechanischen Modellierungskonzepts auf abweichende Geometrien. Wie die Simulationsergebnisse verdeutlichen, spiegelt das im EC3 aufgenommene Ingenieurmodell zur Bestimmung der Nettoquerschnittstragfähigkeit das tatsächliche Bauteilverhalten nur unzureichend wider. In der Regel ergibt sich eine konservative Abschätzung, jedoch führen gewisse Konstellationen aus Geometrie und Werkstoffeigenschaften zu einer Unterschreitung der geforderten Traglast.

Abstract

The design concept included in EN 1993 is based on resistance functions, which describe the component behaviour by means of simplified engineering models and implicitly assume sufficient redistribution capacity of the material. The assessment of material ductility, however, is not based on upper-shelf toughness requirements, but on replacement criteria of the technical stress-strain curve. The current approach proves to be problematic as the resistance functions are subject to inherent variations and the range of validity is limited to the experimental database.

An advancement of the design concept requires a more precise knowledge of the component behaviour at ultimate limit state. In principle, fracture mechanics and damage mechanics approaches are suitable for this purpose. These methods, in contrast to component tests, enable to individually examine the geometric and material-dependent influences on the strength-controlled bearing behaviour.

Within this work, the deformation and fracture behaviour of steel is discussed first. This includes the temperature-dependent fracture mechanisms of brittle and ductile fracture as well as the phenomenon of plastic instability. This is followed by a comprehensive explanation of the background to the design rules of steel structures in the ultimate limit state. In addition to the safety concept, particular attention is paid to the proof of bearing capacity and the toughness based choice of steel material.

In addition, experimental investigations on wide-plate specimens made of S355 to S960 are presented. Both, holes and sharp cracks are taken into account as typical cross-sectional weaknesses. The tests on component scale show that the bearing capacity of specimens with holes is controlled by plastic instability. In contrast, in case of specimens with sharp cracks the crack propagation already occurs in the globally elastic behaviour. This leads to a reduction in the bearing capacity depending on the hardening behaviour and the toughness properties.

Subsequently, the possibility of a toughness-based analysis in the upper-shelf is tested using fracture mechanics. The fracture mechanics approaches are generally very efficient, but there are limits to the usability and the quality of the results due to the geometry dependence of the resistance parameters and the prerequisite of a crack-like flaw. In combination with the pronounced scatter of the correlation functions, the calculations result in unrealistically high toughness requirements, which cannot be proven experimentally.

In a further step, a toughness-based analysis utilising damage mechanics concepts is determined. The damage models according to GURSON-TVERGAARD-NEEDLEMAN (GTN), JOHNSON-COOK (JC) and BAI-WIERZBICKI (BW) for numerical prediction of ductile material failure are introduced and discussed. In addition, various possibilities to derive both the required flow curves and the damage parameters related to actual or synthetic material properties are presented.

For the toughness-based damage mechanics analysis the fracture locus concept according to BAI-WIERZBICKI is applied, whereby the damage parameters are determined with the micromechanically motivated GTN-model via unit-cell calculations and subsequent adaptations to the element size of the component simulations. Independently of the steel grade, a very good agreement can thus be achieved in the comparison with the experimental results.

Subsequently, toughness-based ductility requirements are derived by identifying permissible combinations of strength and toughness properties. It turns out that higher-strength steels require less material ductility due to the lower hardening behaviour than low-strength steels grades.

Finally, the damage mechanics concept is transferred to deviating geometries. As the simulation results clearly show, the engineering model used in EN 1993 to determine the net cross-sectional bearing capacity does not adequately reflect the actual component behaviour. Mostly, this results in a conservative estimate, but certain constellations of geometry and material properties do not reach the required bearing capacity.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Motivation	2
1.3	Konzept und Aufbau der Arbeit	3
2	Verformungs- und Bruchverhalten von Stahlbauteilen unter Zugbeanspruchung	6
2.1	Allgemeines	6
2.2	Bruchmechanismen	9
2.2.1	Spaltbruchvorgänge	11
2.2.2	Gleitbruchvorgänge	12
2.3	Plastische Instabilität	15
2.3.1	Uniaxialer Zug	16
2.3.2	Biaxialer Zug	18
2.3.3	Einschnürungsmechanismen	18
2.4	Kombiniertes Auftreten von plastischer Instabilität und Gleitbruchvorgängen	21
3	Hintergrund zur Auslegung von Stahlkonstruktionen im Grenzzustand der Tragfähigkeit	22
3.1	Grundlagen und Bemessungskonzept	22
3.2	Tragfähigkeitsnachweis	25
3.2.1	Einführung	25
3.2.2	Querschnittsnachweise unter monotoner Beanspruchung	27
3.2.3	Bemessung bei seismischer Beanspruchung	32
3.3	Zähigkeitsbasierte Stahlgütewahl	33
3.3.1	Allgemeines	33
3.3.2	Stahlgütewahl in der Tieflage	34
3.3.3	Stahlgütewahl in der Hochlage	38
3.3.4	Fazit	43
4	Experimentelle Untersuchungen an Großzugproben	45
4.1	Probekörper und Werkstoffe	45
4.2	Versuchsdurchführung und Messtechnik	51
4.3	Ergebnisse der Großzugprobenversuche	53
4.3.1	Analyse des Tragverhaltens	53

4.3.2	Analyse der Bruchflächen	58
4.4	Vergleich der Versuchsergebnisse mit EC3	61
5	Bruchmechanische Berechnungen zur zähigkeitsbasierten Tragfähigkeitsanalyse	64
5.1	Grundlagen der Bruchmechanik	64
5.1.1	Einführung	64
5.1.2	Linear-elastische Bruchmechanik	65
5.1.3	Elastisch-plastische Bruchmechanik	67
5.1.4	Temperaturabhängigkeit bruchmechanischer Kennwerte	69
5.2	Abgleich der Tieflagen- und Hochlagenanforderungen zugbeanspruchter Bauteile	71
5.2.1	Bruchmechanisches Sicherheitskonzept	71
5.2.2	Eingangsgrößen der Untersuchung	73
5.2.3	Gegenüberstellung der ermittelten Anforderungen	75
5.3	Bruchmechanische Tragfähigkeitsanalyse in der Hochlage	79
5.3.1	Hochlagenanforderungen zugbeanspruchter Bauteile	80
5.3.2	Tragfähigkeitsanalyse über Risswiderstandskurven	84
5.4	Bewertung der bruchmechanischen Ansätze	88
6	Schädigungsmechanische Konzepte zur zähigkeitsbasierten Tragfähigkeitsanalyse	90
6.1	Grundlagen der Schädigungsmechanik	90
6.1.1	Übersicht und Einteilung	90
6.1.2	Beschreibung des Spannungszustands	92
6.1.3	Begriff der Schädigung in der Schädigungsmechanik	94
6.2	Schädigungsmechanische Konzepte für duktiles Versagen unter monotoner Beanspruchung	95
6.2.1	Gurson-Tvergaard-Needleman-Modell	95
6.2.2	Johnson-Cook-Modell	98
6.2.3	Bai-Wierzbicki-Modell	100
6.3	Charakterisierung des plastischen Werkstoffverhaltens für monotone Beanspruchungen	101
6.3.1	Allgemeines zum plastischen Werkstoffverhalten	101
6.3.2	Fließkurven auf Basis experimenteller Ergebnisse	103
6.3.3	Ableitung synthetischer Fließkurven	104
6.4	Ableitung schädigungsmechanischer Modellparameter	107
6.4.1	Herkömmliche Bestimmung der Modellparameter	107

6.4.2	Verknüpfung mikromechanischer und phänomenologischer Schädigungsmodelle	108
6.4.3	Bestimmung synthetischer Schädigungsparameter	110
7	Schädigungsmechanische Berechnungen zur zähigkeitsbasierten Tragfähigkeitsanalyse	111
7.1	Grundlagen zur Umsetzung	111
7.1.1	Verwendetes Modellierungskonzept	111
7.1.2	Definition der Modellparameter	113
7.2	Validierung der schädigungsmechanischen Modelle	116
7.2.1	Aufbau der Simulationsmodelle	116
7.2.2	Netzgrößeneinfluss der Modellparameter	117
7.2.3	Vergleich mit experimentellen Ergebnissen	122
7.2.4	Analyse der Umlagerungseffekte	125
7.3	Ableitung zähigkeitsbasierter Duktilitätsanforderungen	127
7.3.1	Methodische Vorgehensweise	127
7.3.2	Ergebnisse der Untersuchung	129
7.4	Übertragung des schädigungsmechanischen Konzepts auf abweichende Geometrien	132
7.4.1	Methodische Vorgehensweise	132
7.4.2	Ergebnisse der Untersuchung	135
7.5	Abschließende Bewertung des schädigungsmechanischen Modellierungskonzepts	144
8	Zusammenfassung und Ausblick	146
8.1	Zusammenfassung	146
8.2	Ausblick	149
9	Literaturverzeichnis	151