

Zum Tragverhalten beulgefährdeter Stahlquerschnitte bei Brandeinwirkung

Doctoral Thesis

Author(s):

Knobloch, Markus

Publication date:

2007

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005335503>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Dissertation ETH Nr. 16910

**ZUM TRAGVERHALTEN BEULGEFÄHRDETER
STAHLQUERSCHNITTE BEI BRANDEINWIRKUNG**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Markus Knobloch
Diplom-Ingenieur, Technische Universität Darmstadt

geboren am 21. Juni 1976
von Frankfurt am Main, Deutschland

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. sc. techn. Mario Fontana, Referent
Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange, Korreferent

2007

Kurzfassung

Die Brandbemessung erlangt fortlaufend größere Bedeutung für die sichere und wirtschaftliche Konstruktion von Stahlbauten. Neben einer brandgerechten konstruktiven Ausbildung müssen realitätsnahe Berechnungsmodelle für die Bemessung von Stahlquerschnitten im Brandfall entwickelt werden. Das Materialverhalten bei erhöhten Temperaturen im Brandfall, das Plastifizierungsvermögen der Querschnitte bei nicht-linearem Spannungs-Dehnungsverhalten und die Stabilitätsprobleme, insbesondere das lokale Beulverhalten sind dabei besonders wichtig. Stahlbauteile besitzen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine geringe Massigkeit. Ungeschützte dünnwandige Stahlquerschnitte erwärmen sich demzufolge im Brandfall schnell. Die Festigkeit und Steifigkeit des Baustahls nehmen während der Erwärmung deutlich ab, und das Spannungs-Dehnungsverhalten wird nicht-linear. Traglaststeigerungen infolge von Plastifizierungen werden erst bei großen Dehnungen erreicht. Im Brandfall muss aufgrund der vergrößerten Stauchungen daher der traglastmindernde Einfluss des lokalen Beulens für Querschnitte mit geringerer Schlankheit berücksichtigt werden verglichen mit der Normaltemperatur.

Die bestehenden Bemessungsmodelle für lokales Beulen im Brandfall basieren auf Erfahrungen und Einschätzungen von Experten oder adaptieren die Berechnungsmethoden für Normaltemperatur und berücksichtigen vereinfachend die reduzierte Steifigkeit und Festigkeit mit Hilfe temperaturabhängiger Abminderungsfaktoren. Diese Modelle stellen praxisorientierte Vereinfachungen dar, vernachlässigen jedoch entscheidende Einflussgrößen für das Beulverhalten im Brandfall, beispielsweise das nicht-lineare Materialverhalten. Zudem sind diese Bemessungsmodelle nur für Querschnitte gültig, die bereits bei Normaltemperatur beulgefährdet sind. Berechnungsmodelle für lokales Beulen kompakter Querschnitte im Brandfall und Modelle für eine ungleichmäßige Erwärmung und thermische Zwängungen existieren bisher nicht.

Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung von Berechnungsmodellen für das Tragverhalten beulgefährdeter Querschnitte im Brandfall. Mit Hilfe dieser Modelle sollen die wesentlichen Zusammenhänge und Einflussgrößen für das Beulverhalten von Stahlquerschnitten bei einer Brandbeanspruchung aufgezeigt werden.

Das Tragverhalten beulgefährdeter Stahlquerschnitte im Brandfall kann auf das dehnungsabhängige lokale Beulen, die veränderten Materialeigenschaften von Baustahl bei erhöhten Temperaturen und die Einflüsse aus der Erwärmung zurückgeführt werden. Daher betrachtet der erste Teil dieser Forschungsarbeit das grundlegende Tragverhalten von Querschnittselementen (Kapitel 2) und die Folgen einer Erwärmung (Kapitel 3). Die Forschungsarbeit analysiert den Einfluss des Spannungs-Dehnungsverhaltens, des Verfestigungsvermögens und der Randbedingungen auf das Tragverhalten einschließlich des Tragwiderstandes mit Hilfe analytischer und numerischer Methoden. Des Weiteren werden die Folgen einer Brandbeanspruchung und die bestehenden Berechnungsmodelle einschließlich der Klassifizierung vorgestellt und diskutiert.

Der zweite Teil der Arbeit analysiert das Beulverhalten von Stahlquerschnitten im Brandfall mit Hilfe einer dehnungsabhängigen Berechnungsmethode (Kapitel 4). Die entwickelten Berechnungsmodelle verwenden dehnungsabhängige Traglastkurven für drei- und vierseitig gelagerte Querschnittselemente. Die Traglastkurven basieren auf der Fließlinientheorie und den Ergebnissen

Kurzfassung

numerischer Berechnungen. Die neue Methode vermeidet eine Klassifizierung. Sie berücksichtigt Plastifizierungen, das nicht-lineare Materialverhalten, ungleichmäßige Temperaturverteilungen sowie thermische Zwängungen.

Diese Forschungsarbeit zeigt den maßgeblichen Einfluss des nicht-linearen Materialverhaltens von Baustahl bei erhöhten Temperaturen, der vergrößerten Stauchungen im Brandfall und der thermischen Zwangskräfte für das Beulverhalten von Stahlquerschnitten auf.

Abstract

Fire design has become an important factor in the safe and economical design of steel structures and has attracted worldwide attention during recent years. In addition to sound construction practice for steel structures in fire, it is necessary to have safe, economical, and easy applicable design models for steel members subjected to fire, especially in case of stability failure. Under fire conditions, thin-walled steel members without fire protection heat up quickly, primarily due to their typically high surface-to-volume ratio and the high thermal conductivity of steel. At elevated temperatures, the strength and stiffness of steel decreases, and the typical linear-elastic ideal-plastic stress-strain relationship becomes distinctly nonlinear. As a result, large strains are required to activate an increase in cross-sectional capacity resulting from plastification. Therefore, local buckling in fire needs to be considered for a wider range of cross-sectional slenderness than in ambient temperature design. Normally, simplified calculation methods are used to analyse fire resistance of steel cross-sections subjected to fire. These methods adopt the ambient temperature stress-based approach – including the *effective width method* – for fire conditions. Resistance at elevated temperature is determined using the same equations as for ambient temperature design; but the material properties at elevated temperatures used for fire design are calculated using reduction factors. This simplification neglects the fact that the calculation methods to consider local buckling were developed for elastic reversible strains and the material behaviour of steel at ambient temperatures. As the stress-strain relationship of steel at elevated temperatures is distinctly nonlinear, using the effective widths taken from ambient temperature design may generate unreliable results. In addition, calculation models for local buckling of compact sections in fire as well as models for nonuniform heating and thermal restraints are inexistent.

It is thus the aim of the present study to review the current design procedure for ambient and elevated temperatures and to develop new calculation models for steel members subjected to fire, taking into account local buckling. These models are supposed to give a realistic description of local buckling in fire.

The load-carrying capacity of steel cross-sections in fire is mainly determined by the local buckling behaviour, the nonlinear stress-strain relationship of steel at elevated temperatures and the influence of heating. The study first describes the fundamental local buckling behaviour of stiffened and unstiffened elements with linear-elastic, linear-elastic ideal-plastic, and elastic nonlinear-plastic stress-strain relationship (chapter 2). The thesis analyses the influence of the stress-strain relationship, the strain hardening capacity, and the boundary conditions on the load-carrying capacity including ultimate capacity using analytical and numerical calculations. The *plastic mechanism analysis* is used to describe the load-carrying capacity in the post-ultimate range. Next, the study analyses the effects of heating of steel sections in fire, and then commonly used stress-based design models and classification for steel members subjected to local buckling and fire are reviewed (chapter 3). The thesis shows that a new classification for the stress-based design methods is necessary. This classification shall consider the reduced proportional limit, the large strains required to reach yield stress, and the nonlinear stress-strain relationship of carbon steel at elevated temperatures. Stress-based design models have difficulty describing local buckling behaviour under fire con-

ditions. Therefore, the research work develops a novel strain-based approach (chapter 4). This novel approach uses strain-based capacity curves for calculating the entire load-shortening behaviour including ultimate capacity of stiffened and unstiffened elements subjected to fire. The capacity curves for unstiffened elements are based on the *plastic mechanism analysis*; the curves for stiffened elements are based on numerical studies using the finite element approach. The novel strain-based approach avoids using classification for fire design. This approach considers plastification effects, the nonlinear material behaviour of steel at elevated temperatures, nonuniform temperature distributions and heating as well as thermal restraint effects.

In a parametric study using the novel strain-based calculation method and the finite element approach, the study shows the decisive influence of the nonlinear material behaviour of steel at elevated temperatures, the enlarged strains in fire, and thermal restraints on the local buckling behaviour of steel sections.