

Brandschutznachweise für ungeschützte Stahlkonstruktionen

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Peter Schaumann,
Hannover

Näherungsformeln für die Erwärmung nach Einheitstemperatur-Zeit-Kurve

Im Wettbewerb mit anderen Bauweisen gewinnt der bauliche Brandschutz für den Stahlbau in jüngster Zeit immer mehr an Bedeutung. Durch Anwendung neuer Ingenieurmethoden sowie weiterentwickelter numerischer Verfahren kann der Brandschutznachweis im Einklang mit der europäischen Normung auch für ungeschützte Stahlkonstruktionen geführt werden.

Mit sichtbaren, stählernen Tragwerken wird ein Wunsch vieler Architekten und Bauherren nach transparenten und filigranen Konstruktionen besonders bei Dachtragwerken erfüllt. Ästhetisch gewollte Lösungen können realisiert werden, wenn die Schutzziele des baulichen Brandschutzes auch für derartige Tragwerke beachtet werden.

Da sich ungeschützte Stahlbauteile rasch erwärmen, wenn sie nach der Einheitstemperatur-Zeit-Kurve (ETK) der DIN 4102 Teil 2 beflammt werden, erreichen sie auch nur bei großer Massigkeit die Feuerwiderstandsklasse F 30.

Dennoch gelingt es in jüngster Zeit besonders bei Sonderbauten (Industriebauten, Messehallen, Sportarenen etc.) regelmäßig, die Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Stahlkonstruktion so festzulegen, dass bei der Dachkonstruktion ungeschützte Stahlbauteile zur Ausführung kommen können. Basis dieser Festlegungen sind Überlegungen und Berechnungen zur wirklichkeitsnahen Brandbeanspruchung (Naturbrände).

Stahlbauteile können dann ungeschützt ausgeführt werden, wenn die äquivalente Branddauer höchstens 15 min beträgt. Wenn gezeigt werden kann, dass die Stahlkonstruktion innerhalb dieser Zeit unterhalb der Versagenstemperatur bleibt, so ist das ein Indiz für die Feuerwiderstandsfähigkeit.

Prinzip der Berücksichtigung eines Naturbrandes

Die Anwendung ingenieurmäßiger Verfahren bei der Beurteilung des Feuerwiderstandes von Stahl- und Stahlverbundtragwerken nimmt stetig zu [1]. Dabei

wird häufig die Methode der äquivalenten Branddauer, die auch Grundlage des Berechnungsverfahrens für den baulichen Brandschutz im Industriebau (DIN 18230-1) ist, angewendet. Sie ermöglicht es, die prognostizierte Naturbrandbeanspruchung in eine Branddauer nach der Einheitstemperatur-Zeit-Kurve zu übertragen, die bezüglich der Erwärmung der Bauteile die gleiche Wirkung hat. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Erwärmungskurve (Stahltemperatur-Zeit-Funktion) ungeschützter Stahlbauteile auch unter ETK-Beflammung im Bereich unter 30 min mehr an Bedeutung.

Erwärmung der Stahlkonstruktion

Die Differentialgleichung, die das Erwärmungsverhalten beschreibt, wird im Eurocode 3 Teil 1-2 [2] angegeben. Dort sind alle Parameter festgelegt, die für die numerische Lösung erforderlich sind. Für Baustahl handelt es sich dabei speziell um die temperaturabhängige spezifische Wärme (s. Bild 1).

Auffallend ist der Anstieg der spezifischen Wärme im Bereich zwischen 680°C und 800°C. Es handelt sich dabei um den Temperaturbereich, bei dem sich das Gefüge von der ferritischen in die austenitische Gitter-

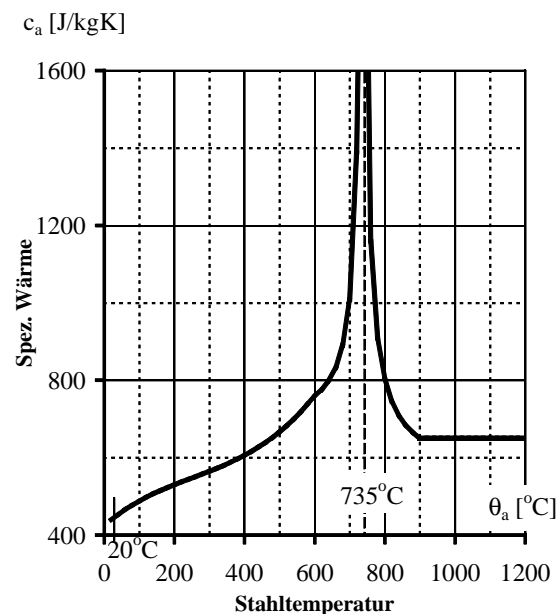


Bild 1 Spezifische Wärme von Baustahl als Funktion der Temperatur

Stahltemperaturen als Funktion der Branddauer t [min] und des Profilmfaktors A_m/V [m^{-1}] (Näherung)	
$\theta_{a,t} = \frac{c_1 \cdot c_2 + c_3 \cdot t^{c_4}}{c_2 + t^{c_4}} \text{ [}^\circ\text{C]; mit } t \text{ in min}$	
$c_1 = \theta_0 = 20^\circ\text{C}$	$c_2 = 15780 \cdot \frac{A_m^{-1,13}}{V}$
$c_3 = \frac{10000}{0,3 + 1,896 \cdot \ln\left(\frac{A_m}{V}\right)}$	$c_4 = 1,248 + 0,069 \cdot \ln\left(\frac{A_m}{V}\right)$
Gültigkeitsgrenzen: Profilmfaktor $25 \text{ m}^{-1} \leq A_m/V \leq 300 \text{ m}^{-1}$ Branddauer $t \leq 30 \text{ min}$ Stahltemperatur $\theta_a \leq 700^\circ\text{C}$	

Tabelle 1. Näherungsformeln zur Berechnung der Temperaturen ungeschützter Stahlbauteile bei Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperatur-Zeit-Kurve

struktur verändert. Dieser Vorgang ist endotherm und wird über eine Vergrößerung der spezifischen Wärmehinreichungsweise erfasst. Dieser Effekt macht sich bei der Erwärmung im Bereich von Stahltemperaturen über 700°C bemerkbar (s. Bild 2).

Wärmequelle für das Bauteil sind die umgebenden Brandgase. Der Wärmestrom von den umgebenden Brandgasen in das Bauteil setzt sich aus dem konvektiven und dem radiativen Wärmeübergang (Strahlung) zusammen, der in Eurocode 1 Teil 2-2 [3] geregelt ist. Die Gastemperatur bei Normbrandbedingungen entspricht der Einheitstemperatur-Zeit-Kurve. Die Lösung der Differentialgleichung kann ausschließlich numerisch erfolgen. Eine geschlossene Lösung existiert wegen der temperaturabhängigen Werkstoffparameter und wegen der instationären Wärmeübergangsbedingungen nicht. Daher sind bisher lediglich Lösungen in Form von Grafiken wie in Bild 2 oder Zahlentabellen bekannt.

Bei dünnwandigen Stahlbauteilen ist die Annahme einer über den Querschnitt gleichmäßigen Temperatur infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit gerechtfertigt. Für massive Bauteile, sogenannte Vollprofilquerschnitte, ergibt sich eine ungleiche Erwärmung über den Querschnitt, bei der zunächst außen höhere Temperaturen als im Querschnittsinneren auftreten. Die Massigkeit wird durch den Profilmfaktor definiert, der das Verhältnis von beflammter Oberfläche zu dem Volumen pro Längeneinheit des Bauteils wiedergibt. Je kleiner der Profilmfaktor, desto größer ist die Massigkeit.

Die Erwärmung des Stahlquerschnitts lässt sich als Funktion der Branddauer und des Profilmfaktors wie in Bild 2 als eine Bauteiltemperatur-Zeit-Kurve darstellen. Bild 2 zeigt, dass unter der Einheitstemperatur-Zeit-Kurve lediglich massive, ungeschützte Stahlbauteile so langsam erwärmt werden, dass die Stahltemperaturen bis zu 30 Minuten Branddauer unterhalb der Versagstemperaturen bleiben.

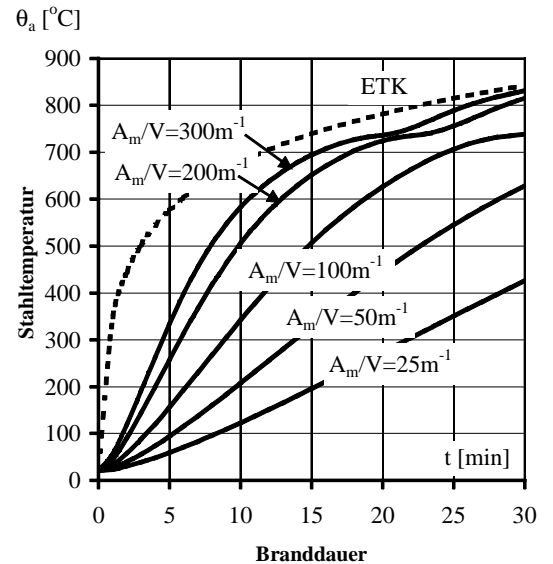


Bild 2. Erwärmungskurven ungeschützter Stahlquerschnitte unter Einheitstemperatur-Zeit-Kurve (ETK); Kurvenparameter: Profilmfaktor A_m/V [m^{-1}]

Näherungslösung

Bisher fehlte eine geschlossene, mathematische Funktion zur Beschreibung der Lösung, die eine schnelle Berechnung der Stahltemperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer mit dem Taschenrechner oder mit einem Tabellenkalkulationsprogramm (z.B. Excel®) ermöglicht. Diese Lücke wird mit den in Tabelle 1 angegebenen Näherungsformeln geschlossen.

Nach Wahl einer geeigneten Ansatzfunktion wurden die Koeffizienten über die Minimierung der Fehlerquadrate bestimmt. Die Näherungsformeln gelten für die Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperatur-Zeit-Kurve.

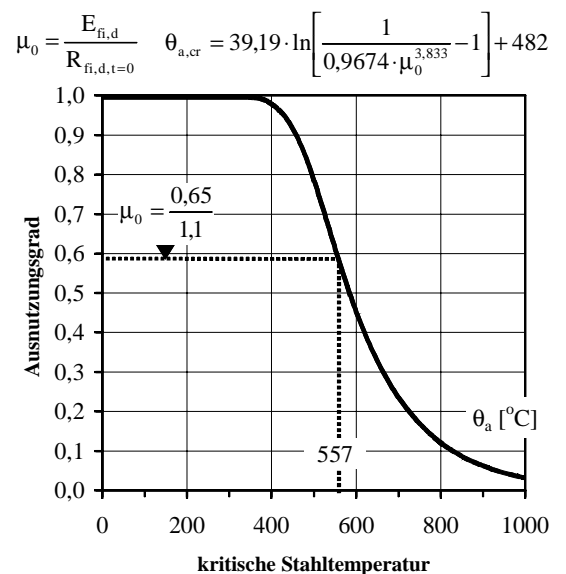


Bild 3. Kritische Stahltemperatur in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad

Dank

Meinem Mitarbeiter Herrn cand.-Ing. F. Wilke danke ich für die Unterstützung bei der Erarbeitung der Näherungsformeln in Tabelle 1.

Nachweis der Tragfähigkeit

Von tragenden Bauteilen wird gefordert, dass ihre Tragfähigkeit im Brandfall erhalten bleibt. Bei der Ermittlung der mechanischen Beanspruchungen darf berücksichtigt werden, dass die gleichzeitige Brandbeanspruchung eine außergewöhnliche Einwirkungskombination darstellt. Nach den Eurocodes darf bei Stahlbauten für hochbauübliche Lastkombinationen pauschal eine Reduktion der Bemessungswerte der mechanischen Einwirkungen bei Normaltemperatur um den Faktor 0,65 angesetzt werden.

Im Eurocode 3 Teil 1-2 wird die kritische Stahltemperatur in Funktion des Ausnutzungsgrades angegeben (s. Bild 3). Für überwiegend auf Biegung oder Zug beanspruchte Bauteile lässt sich daraus direkt ablesen, dass die kritische Stahltemperatur oberhalb von 557°C liegt.

Liegt aus realistischen Betrachtungen zum Brandverlauf eine äquivalente Branddauer vor, so lässt sich die Stahltemperatur nach Bild 2 oder mit den Formeln nach Tabelle 1 ermitteln. Der Vergleich mit den kritischen Stahltemperaturen nach Bild 3 ergibt eine Aussage über die Tragfähigkeit der Stahlkonstruktion im Brandfall.

Professor Schaumann ist Ordinarius am Institut für Stahlbau der Universität Hannover und Vorsitzender des Arbeitsausschusses Brandschutz beim Deutschen Stahlbau-Verband.

Literatur

- [1] Schaumann, P.: Ingenieurmethoden im Brandschutz – Chancen für den Stahlbau, Deutscher Stahlbautag 1998, Fachsitzung I, Neues aus Forschung, Entwicklung und Normung, Bauen mit Stahl, Dokumentation 651, 1998
- [2] DIN V ENV 1993-1-2 Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1993-1-2 : 1995, Mai 1997, Beuth Verlag, Berlin
- [3] DIN V ENV 1991-2-2 Eurocode 1 - Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke - Einwirkungen im Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1991-2-2 : 1995, Mai 1997, Beuth Verlag, Berlin