

FEUERWIDERSTAND VON VERBUNDBAUTEILEN UNTER NATURBRANDBEANSPRUCHUNG

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Dipl.-Ing. Jens Upmeyer

Universität Hannover - Institut für Stahlbau
Appelstraße 9A, D-30167 Hannover
Internet: <http://www.stahlbau.uni-hannover.de>



Zusammenfassung

Üblicherweise basiert der Nachweis des Feuerwiderstandes von Bauteilen auf den Erkenntnissen von Brandversuchen. Tragende Bauteile werden nach ihrem Verhalten im Normbrand unter Einheits-Temperaturzeitkurve in Feuerwiderstandsklassen eingeordnet. In diesem Beitrag wird die Grenzbrandlast als neue Kenngröße für den Feuerwiderstand von Bauteilen vorgestellt. Bauteile bewahren ihre Tragfähigkeit unter Naturbrandbedingungen, wenn die Brandlast im Gebäude unterhalb dieses Grenzwertes liegt. Aufgrund zahlreicher Simulationsrechnungen wird gezeigt, dass Verbundbauteile, die nach den herkömmlichen Methoden in die Feuerwiderstandsklasse R60 einzuordnen sind, Grenzbrandlasten von mehr als 1000 MJ/m² aufweisen und daher bei realen Bränden in üblichen Gebäuden nicht versagen.

Abstract

Traditionally structural fire design complies with the conditions of fire tests. Structural members are classified to fire resistance classes in dependency of their behaviour under ISO-fire exposure. In this contribution the limit fire load density is defined as a new attribute to characterize the fire resistance of structural members. Structural members maintain their load bearing ability in natural fires, if the fire load density is below this limit value. On the basis of numerous numerical simulations it could be demonstrated that composite members, which are classified to the fire resistance class R60 following the traditional design method, have limit fire load densities higher than 1000 MJ/m² and do not fail under natural fires in general buildings.

1 Einleitung

Die Bauordnungen der Länder fordern für tragende Bauteile in mehrgeschossigen Gebäuden mindestens 90 Minuten Feuerwiderstandsdauer im Normbrandversuch (R90). Die Klassifizierung der Bauteile in Feuerwiderstandsklassen beruht auf der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK). Die ETK ist eine normierte Temperaturzeitkurve für Brandversuche; die tatsächlichen Verhältnisse bei einem Brand gibt sie nicht wieder. Naturbrände werden maßgeblich von Parametern wie der Brandlast, den Ventilationsverhältnissen und den thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile beeinflusst. In den letzten zehn Jahren wurden auf europäischer Ebene die Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung entwickelt. Im EC1-2-2 [1] sind Temperaturzeitkurven definiert, die realistische Verhältnisse bei Raumbränden wiedergeben. In Europa sind in jüngerer Zeit umfangreiche Forschungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt worden, Brandschutznachweise auf einem anforderungsgerechten und damit wirtschaftlichen Niveau zu ermöglichen ("Natural Fire Safety Concept" [3]). In Anbetracht dieser Entwicklungen wird in diesem Beitrag das Verhalten von tragenden Verbundbauteilen, die sich in die Feuerwiderstandsklasse R60 einstufen lassen, anhand rechnerischer Simulationen unter Naturbrandbedingungen gezeigt.

2 Feuerwiderstand von Verbundbauteilen im Brandfall

2.1 Allgemeines

Die Untersuchungen wurden für kammerbetonierte Verbundbauteile in üblichen mehrgeschossigen Gebäuden durchgeführt (s. Bild 1).

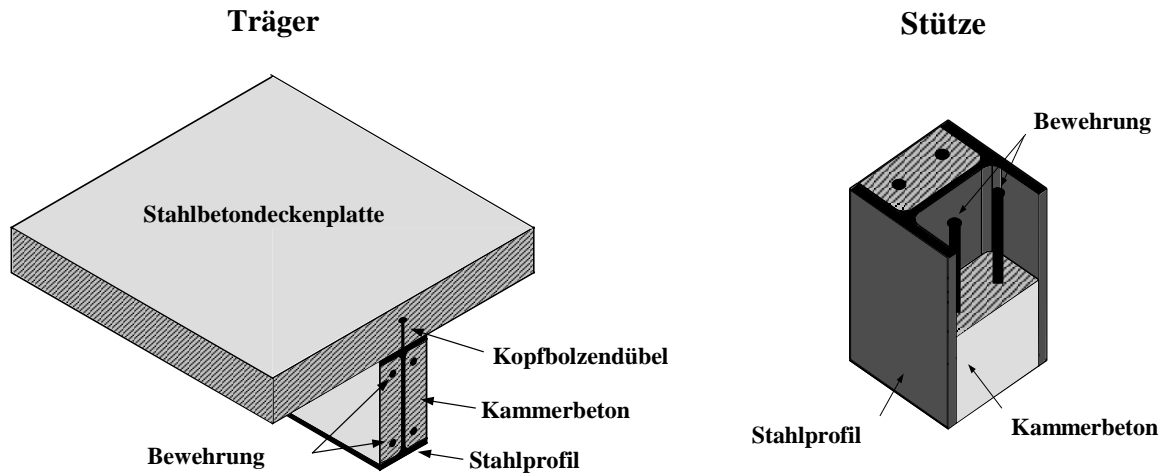


Bild 1: Kammerbetonierte Verbundbauteile
Figure 1: Typical cross section for composite members

2.2 Mechanische Einwirkungen

Nach den Eurocodes ist der Nachweis für Bauteile im Brandfall im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu führen:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (1)$$

mit

$E_{fi,d,t}$ Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall aus der Kombinationsregel für außergewöhnliche Bemessungssituationen gemäß EC1-2-2 [1]

$R_{fi,d,t}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit im Brandfall

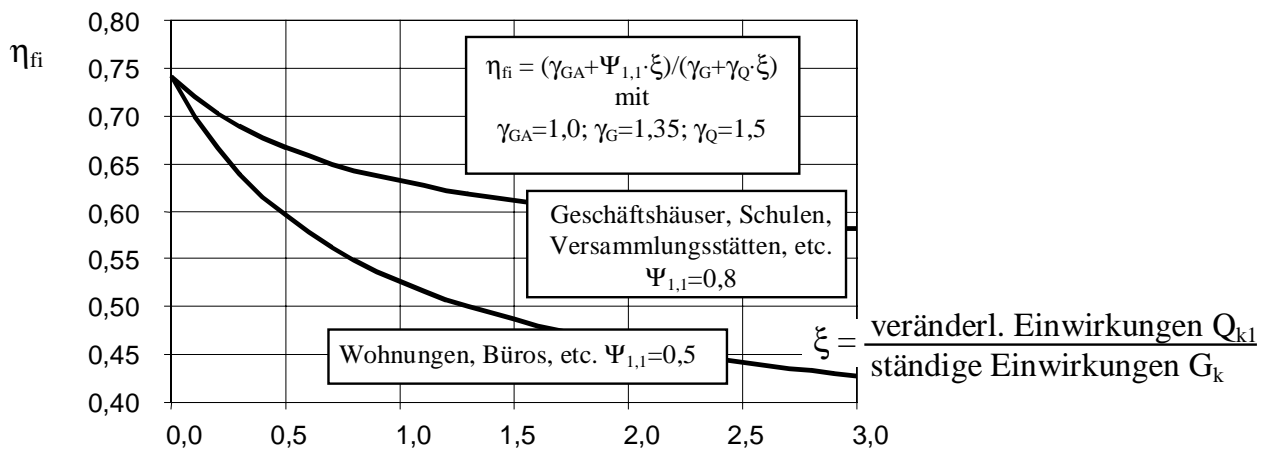


Bild 2: Variation des Reduktionsfaktors η_{fi} in Abhängigkeit von veränderlichen/ständigen Einwirkungen für unterschiedliche Kombinationsfaktoren $\Psi_{1,1}$

Figure 2: Variation of reduction factor η_{fi} as a function of variable loads/permanent loads

Näherungsweise darf der Bemessungswert der mechanischen Einwirkungen im Brandfall aus dem Bemessungswert der Einwirkungen bei Normaltemperatur ermittelt werden:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (2)$$

mit

η_{fi} Reduktionsbeiwert, abhängig von dem Verhältnis zwischen veränderlicher und ständiger Last;

E_d Bemessungswert der Beanspruchungen aus der Grundkombination für Normaltemperatur.

Für übliche Gebäude darf $\eta_{fi} = 0,6$ (NAD: $\eta_{fi} = 0,7$) angenommen werden.

2.3 Werkstoffeigenschaften

Die Werkstoffeigenschaften von Baustahl und Beton unter erhöhten Temperaturen sind in EC4-1-2 [3] definiert. In den Simulationsrechnungen werden die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien (siehe Bild 3) berücksichtigt. Bau- und Betonstahl werden durch die gleiche mathematische Formulierung beschrieben.

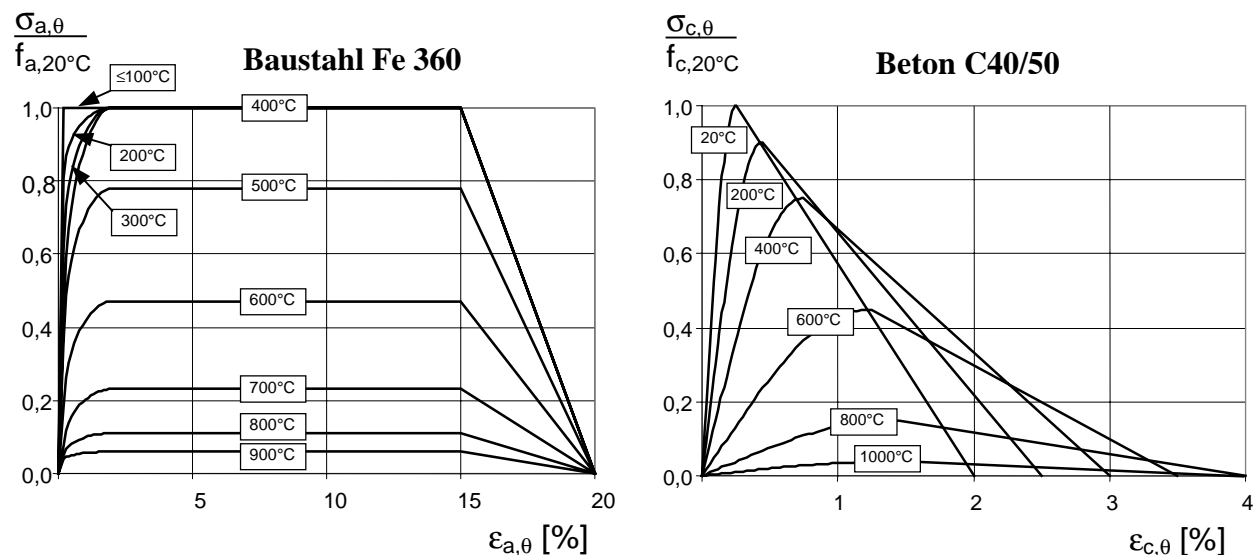


Bild 3: Spannungs-Dehnungsbeziehungen unter erhöhten Temperaturen [2]

Figure 3: Stress-strain relationships at elevated temperatures [2]

2.4 Thermische Einwirkungen

Für den Brandschutznachweis sind Verbundträger und -stützen nach den heute üblichen Methoden in Feuerwiderstandsklassen einzuordnen. Dazu muss das Bauteil seine Tragfähigkeit für eine entsprechende Branddauer unter Brandbeanspruchung nach der ETK aufrecht erhalten. Die ETK ist durch die stetig steigende, logarithmische Funktion

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t+1) \text{ in } [^\circ\text{C}], t \text{ in } [\text{min}] \quad (3)$$

gegeben. Im Gegensatz zum realen Brand hat sie keine Abkühlphase (s. Bild 4).

Zukünftig wird die Brandschutzbemessung auf Naturbrandszenarien basieren und anstelle der ETK werden Temperaturzeitkurven aus Bemessungsbränden treten. Der Brandverlauf natürli-

cher Brände ist ein sehr komplexer physikalischer Prozess, dessen mathematische und numerische Beschreibung von vielen Parametern beeinflusst wird. Die Berechnung von Temperaturzeitkurven natürlicher Brände in Gebäuden gehört daher zu den anspruchsvollsten Aufgaben im Brandschutz-Ingenieurwesen. Im EC1-2-2 [1] wird eine einfache Abschätzung des Temperaturzeitverlaufs für Vollbrände in Brandabschnitten bis zu 100 m^2 angegeben. Diese sogenannten parametrischen Temperaturzeitkurven sind neben der Branddauer abhängig von den Parametern Brandlast, Ventilationsbedingungen und Wärmeleitfähigkeit der Umfassungsbauteile (Decken und Wände).

Für die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen wurde angenommen, dass die Umfassungsbauteile aus Ziegelwänden mit Wärmedämmung und Stahlbetondecken mit Estrich bestehen. Die verschiedenen Wand- und Deckenbaustoffe werden in dem Parameter „b“ für die Wärmeleitfähigkeit der Umfassungsbauteile nach EC1-2-2 Anhang B [1] berücksichtigt. Im Vergleich zur Bedeutung der Parameter Brandlast und Ventilationsbedingungen ist der Einfluss des Parameters „b“ auf den Verlauf der Temperaturzeitkurven gering. In diesem Beitrag wird „b“ als konservative Annahme konstant zu $1100 \text{ J/m}^2\text{s}^{0,5}\text{K}$ angenommen. Damit wird eine vergleichsweise hohe thermische Isolierung angenommen, die sich erhöhend auf die Brandraumtemperaturen auswirkt. Die parametrischen Temperaturzeitkurven umfassen eine Erwärmungsphase für den vollentwickelten Brand, an die sich eine Abkühlphase anschließt. In Bild 4 wird der Einfluss der Brandlast q und der Ventilationsbedingungen (Öffnungsfaktor O) verdeutlicht.

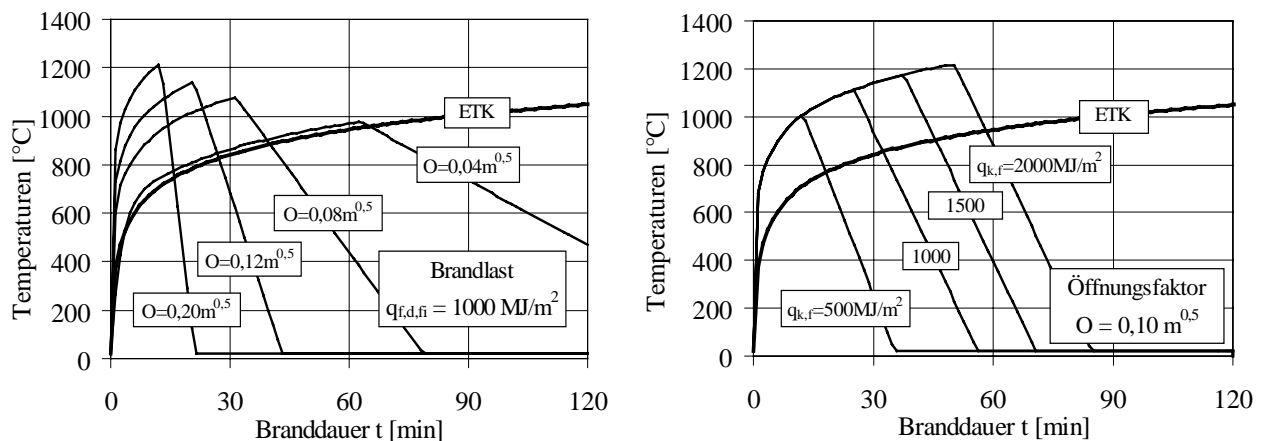


Bild 4: Parametrische Temperaturzeitkurven nach EC1-2-2 Anhang B [1]

Figure 4: Parametric fire curves according to EC1-2-2 [1]

Gebäudenutzung	Mittelwerte für Brandlasten $q_{k,f}$ in $[\text{MJ/m}^2]$		
	Deutschland [4]	Europa (NFSC) [3]	Neu Seeland [5]
Wohnungen	300 – 600	780	900
Krankenhäuser	500	230	300
Hotels	keine Angabe	310	300
Bibliotheken	2000	1500	2000
Büros	300 – 600	420	600 – 800
Schulen	300 – 600	285	300
Verkaufsstätten	600	600	keine Angabe
Theater	1500	300	300

Tabelle 1: Brandlasten in Abhängigkeit der Gebäudenutzung

Table 1: Average values of fire load densities for different use of building

Auf der Grundlage von statistischen Erhebungen darf von der Annahme ausgegangen werden, dass die Brandlast in üblichen Wohngebäuden, Büros, Schulen und Verkaufsstätten geringer als 1000 MJ/m^2 ist (s. Tabelle 1). Folgerichtig werden beispielsweise mehrgeschossige Gebäude in den Bauordnungen der Schweiz in Abhängigkeit von der Höhe Brandlast in Klassen unterschieden. Dabei gilt 1000 MJ/m^2 als Grenzwert für eine mittlere Brandlast; mehr als 1000 MJ/m^2 gilt als hohe Brandlast.

2.5 Simulationsrechnungen

Die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen kann für natürliche Brandverläufe auf der Basis der allgemeinen Berechnungsverfahren nach EC4-1-2 [2] durchgeführt werden. Im Folgenden wurden die numerischen Untersuchungen mit dem transienten, nicht-linearen, inkrementellen Computerprogramm BoFire [6] vorgenommen. Das Programm enthält Berechnungsmodelle für die thermische und die mechanische Analyse. Mit der thermischen Analyse werden die zeitabhängigen Temperaturfelder in den Bauteilquerschnitten berechnet, während mit der mechanischen Analyse die Verformungen, Schnittgrößen und Steifigkeiten unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften ermittelt werden. Zu Beginn der Berechnung werden die mechanischen Lasten nach Gl.(1) bzw. (2) aufgebracht. Danach wird die thermische Einwirkung in Form von Temperaturzeitkurven inkrementell erfasst. Üblicherweise liegen die Zeitinkremente zwischen 2 und 10 Sekunden. In jedem Zeitschritt werden die Bauteiltemperaturen und die damit verbundenen Spannungs- und Dehnungsverteilungen in den Bauteilen berechnet. Tragwerksversagen kann entweder infolge Instabilität, Gleichgewichtsverlust oder Überschreiten der Materialbruchdehnung eintreten. Das Programm BOFIRE wurde durch zahlreiche Versuchssimulationen validiert.

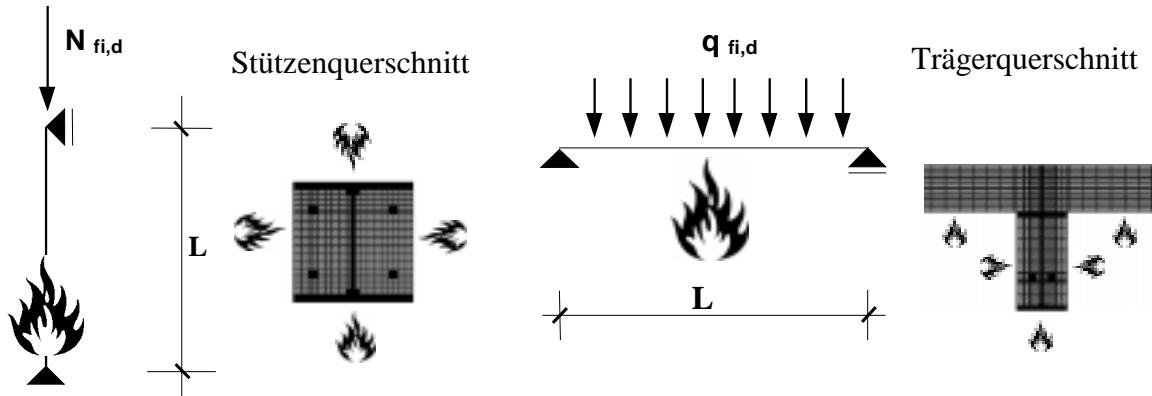


Bild 5: BOFIRE Finite-Elemente-Modell für Verbundstützen und -träger
 Figure 5: BOFIRE-FEM-Model for columns and beams

2.6 Temperaturverteilung im Querschnitt

Die typische Temperaturentwicklung in dem Querschnitt einer kammerbetonierten Verbundstütze unter Brandbeanspruchung ist in Bild 6 dargestellt. Das linke Diagramm zeigt die Temperaturentwicklung in ausgesuchten Querschnittspunkten unter einer ETK-Beanspruchung. Im rechten Diagramm ist das Bauteil einer parametrischen Temperaturzeitkurve gemäß EC1-2-2 für einen extrem heftigen Bemessungsbrand ausgesetzt.

Der Beton zwischen den Flanschen des Stahlquerschnitts verzögert die Erwärmung im Steg und in der Längsbewehrung. Unter ETK-Beanspruchung steigen die Querschnittstemperaturen

stetig, wobei die Temperaturen an der Querschnittsoberfläche schneller zunehmen als im Querschnittsinneren (Bild 6, links). Unter Naturbrandbeanspruchung sind die Verhältnisse bis zum Erreichen des Maximalwertes der Gastemperatur nach 23 Minuten ähnlich (Bild 6, rechts). Danach nehmen die Oberflächentemperaturen wieder ab, während innerhalb des Querschnitts eine Temperaturengleichung stattfindet. Daher steigen die Temperaturen in Querschnittsmitte auch noch an, wenn die Gastemperaturen außerhalb des Querschnitts bereits in der Abkühlphase sind.

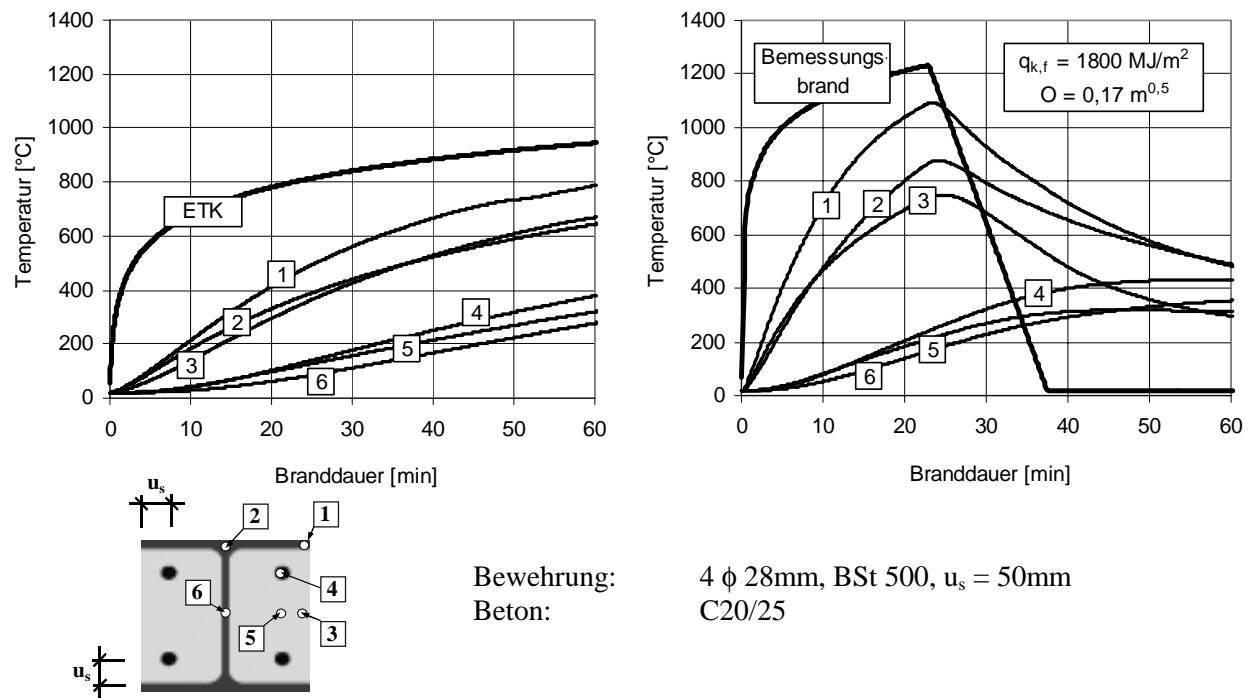


Bild 6: Temperaturentwicklung in einem kammerbetonierten Verbundstützenquerschnitt
 Figure 6: Temperature development in a cross section of composite column exposed to fire

3 Ergebnisse

3.1 Versagensbrandlasten

Die Normbrandbeanspruchung nach ETK führt immer zum Bauteilversagen, weil es lediglich von der Branddauer abhängt, bis die Querschnittstemperaturen soweit angestiegen sind, dass die Werkstoffentfestigung die Tragfähigkeit auf das Niveau der wirkenden mechanischen Beanspruchung reduziert hat. Unter Naturbrandbedingungen hingegen tritt Versagen lediglich dann ein, wenn der Brand im Hinblick auf seinen Temperaturverlauf, sein Temperaturmaximum und seine Dauer so heftig ist, dass der Feuerwiderstand des Bauteils geringer wird als die mechanische Beanspruchung. Die Kernaufgabe der hier vorgestellten Untersuchungen liegt daher in der Bestimmung eines Grenzwertes der natürlichen Brandeinwirkung, der gerade zum Bauteilversagen führt.

Diese Aufgabe wird durch folgendes Vorgehen gelöst. Für ein bestimmtes Bauteil unter mechanischer Last nach Abschnitt 2.2 wird die Brandeinwirkung über den Wert der Brandlast variiert. Zur Begrenzung der Parameter wird der Öffnungsfaktor zunächst konstant zu $O = 0,04 \text{ m}^{0,5}$ angenommen. Mit der Brandlast verändert sich die Gastemperaturzeitkurve im Brandabschnitt (vgl. Bild 4, rechts). Das typische Ergebnis einer derartigen Parameterstudie

ist in Bild 7 wiedergegeben. Darin wird die Branddauer bis zum Versagen in Abhängigkeit von der Brandlast dargestellt. Bis zu der Grenzbrandlast, in diesem Beispiel 1050 MJ/m^2 , übersteht das Bauteil den Brand ohne Versagen. Bei höheren Brandlasten tritt Versagen in der Erwärmungsphase vor oder mit dem Erreichen der maximalen Gastemperatur im Brandabschnitt ein. Da dieser Bereich der parametrischen Temperaturzeitkurve unabhängig von der Brandlast ist, ist auch die Branddauer bis zum Versagen für Brandlasten, die höher als die Grenzbrandlast sind, konstant (hier etwa 61 Minuten).

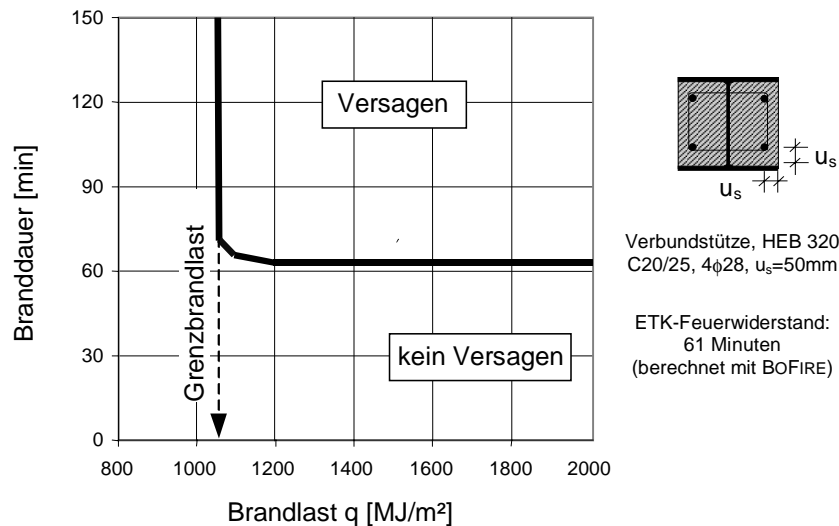


Bild 7: Grenzkurve der Versagensbrandlasten für eine kammerbetonierte Verbundstütze bei einem Öffnungsfaktor von $O = 0,04 \text{ m}^{0,5}$

Figure 7: Typical limit fire load density curve of a composite column

3.2 Einfluss des Öffnungsfaktors

Typische Öffnungsfaktoren in üblichen Büro- oder Wohngebäuden liegen zwischen $0,08$ und $0,12 \text{ m}^{0,5}$. Um den Einfluss auf die Grenzbrandlasten gemäß Bild 7 auf kammerbetonierte Verbundträger und -stützen zu demonstrieren, wurde der Öffnungsfaktor zwischen $0,04$ und $0,20 \text{ m}^{0,5}$ variiert. Für jeden Öffnungsfaktor wird die in Abschn. 3.1 beschriebene Grenzbrandlast berechnet. Die Abhängigkeit der Grenzbrandlast von dem Öffnungsfaktor wird in Bild 8 für Stützen und in Bild 9 für Träger dargestellt.

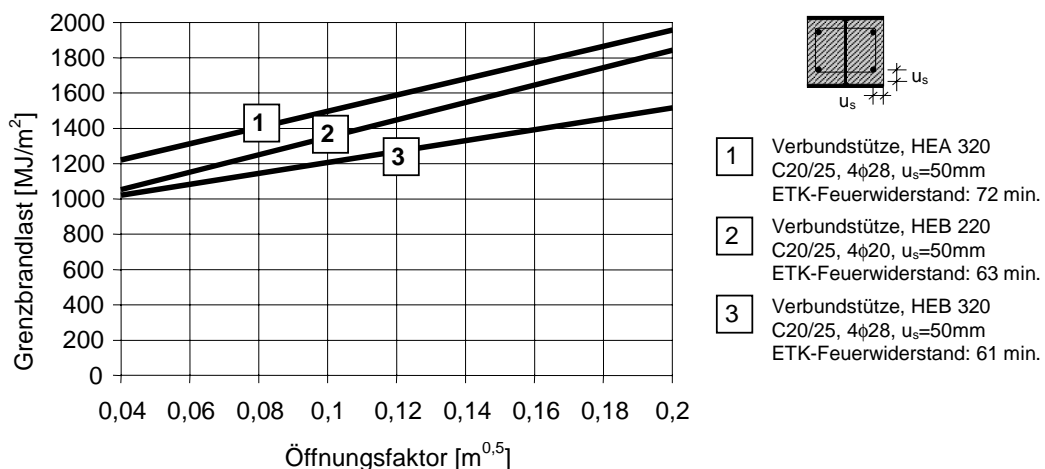


Bild 8: Grenzbrandlasten für Verbundstützen in Abhängigkeit des Öffnungsfaktors

Figure 8: Limit fire load densities of columns depending on openings

Die Bauteile sind nach der klassischen Brandschutzbemessung in die Feuerwiderstandsklasse R 60 einzuordnen. Hier ergibt sich, dass die Grenzbrandlast mindestens 1000 MJ/m^2 beträgt, wobei größere Öffnungsfaktoren mit höheren Grenzbrandlasten verbunden sind. Größere Öffnungsfaktoren führen zu einem rascheren Brandverlauf mit vergleichsweise hohen Temperaturen (s. Bild 4, links). Verbundbauteile reagieren im Brandfall z.B. relativ zu ungeschützten Stahlbauteilen träge, so dass sich große Öffnungsfaktoren bei Verbundbauteilen günstig auf das Brandverhalten auswirken.

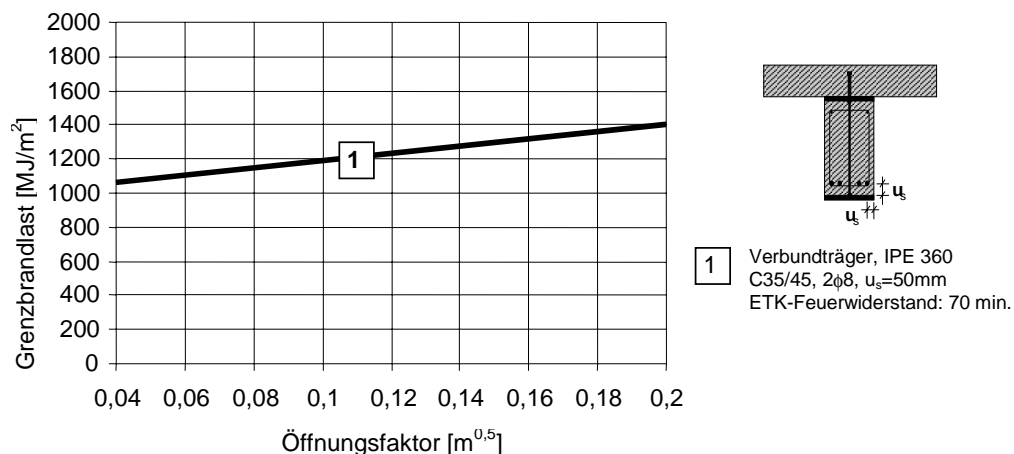


Bild 9: Grenzbrandlasten für Verbundträger in Abhängigkeit des Öffnungsfaktors
 Figure 9: Limit fire load densities of a beam depending on openings

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird die Grenzbrandlast als neue bauteilbezogene Kenngröße zur Beschreibung des Feuerwiderstandes von Verbundbauteilen unter Naturbrandbelastung vorgestellt. Die Grenzbrandlast ermöglicht nunmehr eine brandschutztechnische Bemessung auf dem Wege, dass Bauteile, deren Grenzbrandlast höher ist als die für ein konkretes Gebäude anzusetzenden Bemessungsbrandlasten, im Brandfall ihre Tragfähigkeit unabhängig von jeder Branddauer behalten. Die Methode basiert auf einer Vielzahl von numerischen Simulationsrechnungen für kammerbetonierte Verbundstützen und -träger. Es wird gezeigt, dass Verbundbauteile, die nach der herkömmlichen Brandschutzbemessung in die Feuerwiderstandsklasse R 60 einzuordnen sind, Grenzbrandlasten von mindestens 1000 MJ/m^2 aufweisen und damit in üblichen Gebäuden feuerbeständig sind. Die vorgestellte Methodik ist grundsätzlich geeignet, für die zukünftige brandschutztechnische Bemessung auf der Basis von Naturbränden einen Bezug zwischen den traditionellen Feuerwiderstandsklassen und Naturbrandszenarios herzustellen. Hierfür sind allerdings noch eine Fülle von Beispielrechnungen und einige Brandversuche unter Naturbrandbeanspruchung durchzuführen.

5 Literatur

- [1] 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
- [2] DIN V ENV 1994-1-2 Eurocode 4 - Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall, Juni 1997
- [3] PROFIL ARBED, Centre de Recherches: "Competitive Buildings through Natural Fire Safety Concept, Research Report", Part 1 (Main Text), Luxembourg, March 1999
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen – BMVBW: "Brand-schutzleitfaden für Gebäude besonderer Art und Nutzung", Internet: <http://www.BauNetz.de/arch/bmvbw/>, November 1998
- [5] Buchanan, A. H.: "Fire Engineering Design Guide", Center for Advanced Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1999
- [6] BOFIRE: Computerprogramm zur numerischen Simulation von Stahl- und Verbundtragwerken unter Brandbeanspruchung, Institut für Stahlbau, Universität Hannover
- [7] Schaumann, P.; Upmeyer, J.: Behavior of Composite Structures exposed to Natural Fires, The 6th. ASCCS International Conference - Steel-Concrete Composite Structures, Los Angeles, USA, March 2000