

Ingenieurmethoden im Brandschutz - Chancen für den Stahlbau

Fire safety engineering – Chances for steel construction

Peter Schaumann

Kurzreferat

Im Wettbewerb mit anderen Bauweisen gewinnt der bauliche Brandschutz für den Stahlbau in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Gleichzeitig schreitet die Entwicklung von numerischen Nachweisverfahren im Brandschutz weiter fort. Der Beitrag beschreibt den aktuellen Stand der Ingenieurmethoden im Rahmen der neuen europäischen Normung und deren mögliche Auswirkungen auf die Entwicklungsmöglichkeiten im Stahlbau.

Abstract

For steel construction the meaning of fire protection measures becomes more and more important in the competition with different construction materials during the last years. In the meantime the development of numerical design tools in fire engineering makes great progress. This contribution describes the current stand of structural fire design according to the latest European codes and possible effects on the development in steel construction.

1 Einleitung

Die Brandkatastrophe am Nachmittag des 11. April 1996 am Flughafen Düsseldorf hat die Bedeutung von Brandschutzmaßnahmen insbesondere für Sonderbauten mit großen Menschenansammlungen in dramatischer Weise in den Blickpunkt des Interesses einer breiten Öffentlichkeit und auch der Medien gerückt. Sie hat nicht nur in Nordrhein-Westfalen alle an der Planung und am Bau Beteiligten in besonderem Maße für die Belange des vorbeugenden baulichen Brandschutzes sensibilisiert. Schnell wurde die Forderung nach schärferen bauaufsichtlichen Regelungen laut.

In der Tat liegt der historische Ursprung der bestehenden bauaufsichtlichen Regelungen im Hinblick auf den Brandschutz in der Reaktion auf die verheerenden Stadtbrände im letzten Jahrhundert und im letzten Weltkrieg. Einer der wesentlichen Gesichtspunkte ist daher das Abschottungsprinzip, z.B. durch die Anordnung von Abstandsflächen und Brandwänden. Die Erfahrungen haben bewiesen, daß diese Regelungen ganz wesentlich dazu beitragen, die Brandausbreitung zu behindern. Diese Maßnahmen können die Entstehung von Bränden und damit die Gefährdung von Menschen natürlich nicht verhindern.

Die vorrangig baulich konstruktiven Anforderungen schlagen sich in den Landesbauordnungen u.a. in den Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile nieder. Je nach Gefahrenpotential in den Gebäuden wird dabei zwischen mindestens feuerhemmenden und feuerbeständigen Bauteilen unterschieden. In Ermangelung anderer Beurteilungsmethoden wurden die Eigenschaften feuerhemmend und feuerbeständig an dem Verhalten der Bauteile im Normbrandversuch festgemacht. Dabei wird regelmäßig feuerhemmend der Feuerwiderstandsklasse F 30 und feuerbeständig der Feuerwiderstandsklasse F 90 zugeordnet.

Für den Stahlbau bringen Auflagen hinsichtlich der Feuerwiderstandsfähigkeit zwei wesentliche Wettbewerbsnachteile. Zum einen kann der Wunsch vieler Architekten nach sichtbaren, stählernen Tragkonstruktionen wegen nachträglich anzuordnender Brandschutzbekleidungen nicht erfüllt werden. Ästhetisch gewollte Lösungen können nicht realisiert werden. Zum zweiten führen Brandschutzmaßnahmen für die Stahlkonstruktion zu einer erheblichen Verteuerung, die den Wettbewerb zum Massivbau in manchen Marktsektoren erschwert.

Stahlbauteile haben im Vergleich zu Massivbauteilen von sich aus geringere Widerstandsfähigkeit gegen Feuer. Die Ursache hierfür sind zum einen die hohe Wärmeleitfähigkeit von Baustahl und zum zweiten die vergleichsweise geringe Massigkeit der Bauteile. Diese beiden technologischen Eigenschaften führen im Brandfall zu einer schnelleren Erwärmung und entsprechend reduzierter Tragfähigkeit von Stahlbauteilen.

Im Stahlbau fallen für die Erfüllung von Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Tragkonstruktion hohe Kosten an. Im konkurrierenden Massivbau sind diese Mehrkosten marginal.

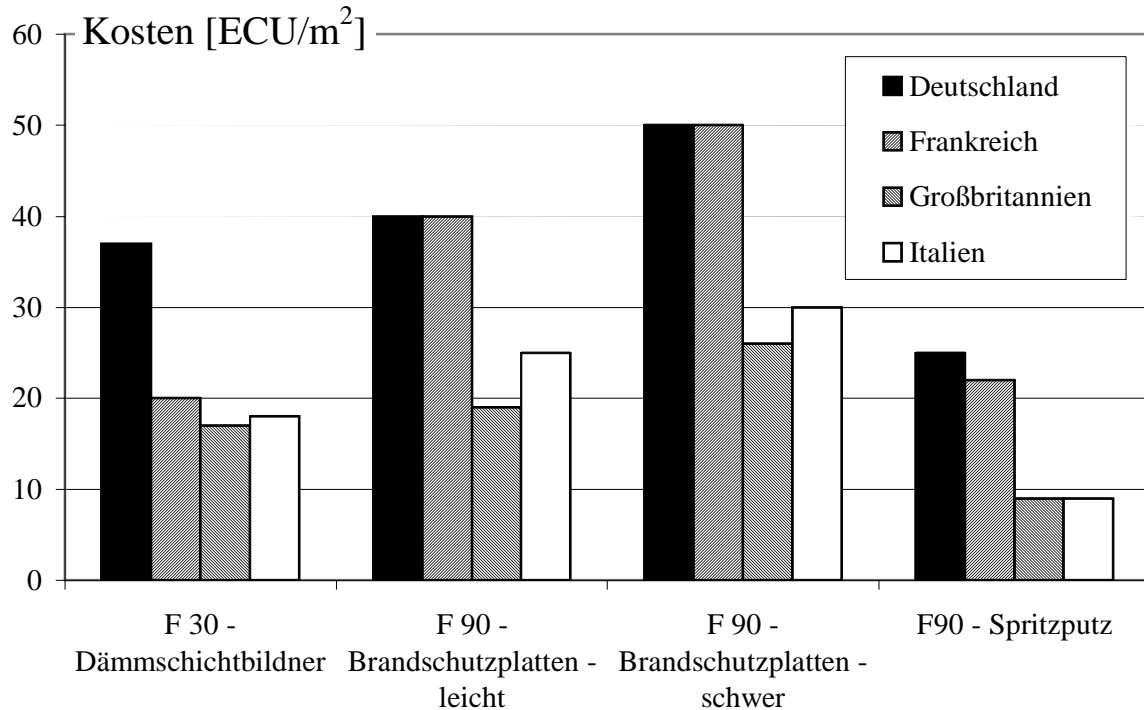


Bild 1: Ungefähre Kosten für Brandschutzmaßnahmen in ECU pro m² im europäischen Vergleich [1]

Fig. 1 Approximate costs for fire protection of steel members in ECU per m² in Europe [1]

Wie eine Kostenzusammenstellung der EKS [1] eindrucksvoll belegt, sind die Kosten für die Brandschutzmaßnahmen im europäischen Vergleich recht uneinheitlich (s. Bild 1). Auffällig ist, daß Deutschland durchweg im oberen Bereich liegt. Für übliche Hochbaukonstruktionen ergibt sich auf dieser Basis in Deutschland die Situation, daß die Kosten für den Brandschutz die reinen Baustahlkosten der Konstruktion überschreiten. Dabei ist der Grad der Anforderung, ob F 30 oder F 90, im Hinblick auf die Kosten nicht ausschlaggebend. Bereits die niedrigste Feuerwiderstandsklasse erfordert Aufwendungen in der Größenordnung von 700 ECU pro t Stahlkonstruktion (s. Bild 2).

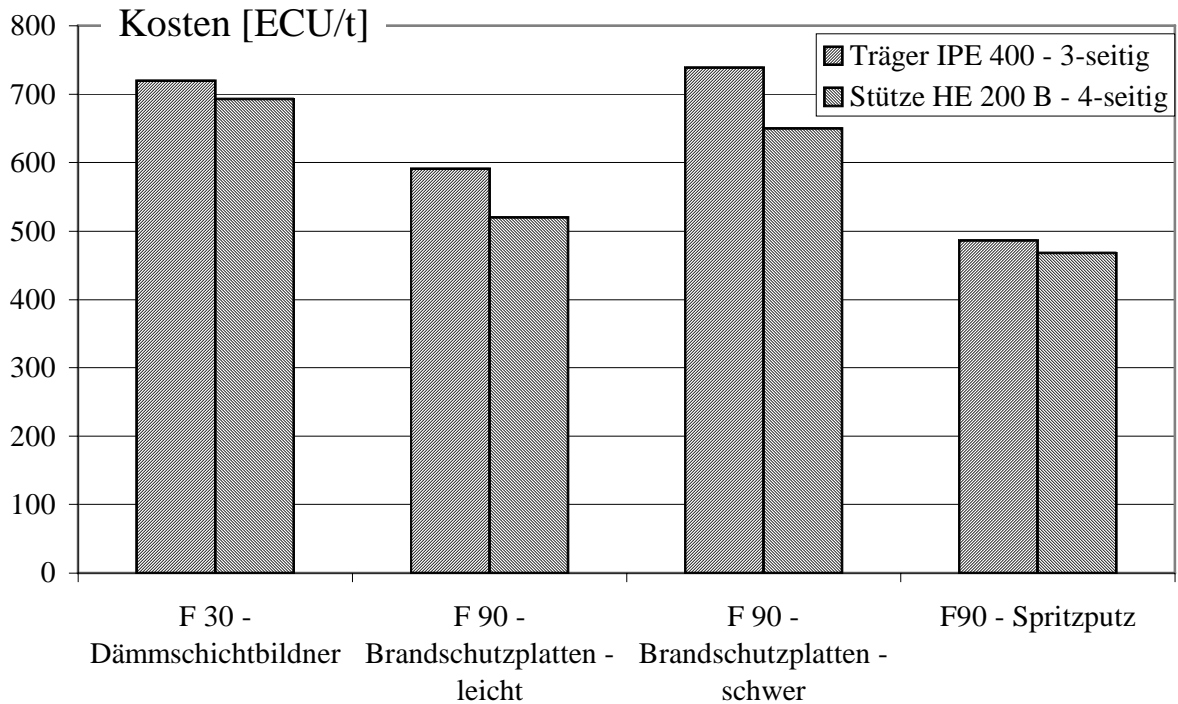


Bild 2: Ungefähre Kosten von Brandschutzmaßnahmen für Stahlbauteile in ECU pro t Stahlkonstruktion

Fig. 2 Approximate costs for fire protection of steel members in ECU per tn. steel construction

Vor diesem Hintergrund ist nach den wesentlichen Einflußgrößen zu fragen, die das Verhalten von Stahlbauteilen im Brandfall bestimmen und damit den Grad der Anforderungen und die daraus abzuleitenden Schutzmaßnahmen festlegen.

Ferner wird in diesem Beitrag beschrieben, welche Auswirkungen auf den Brandschutz im Stahlbau die Entwicklung sogenannter Ingenieurmethoden des vorbeugenden baulichen Brandschutzes erwarten lassen.

2 Tragverhalten im Brandfall

Die Sicherheitsanforderungen im Bauwesen laut Bauproduktenrichtlinie 89/106/EEC verlangen, „... daß im Fall der Entstehung eines Brandes die Tragfähigkeit der Konstruktion für eine definierte Dauer vorausgesetzt werden kann ...“. Wird die erforderliche Widerstandsdauer mit t_{requ} und die Zeit bis zum Versagen der Konstruktion mit t_u bezeichnet, so läßt sich diese Forderung vereinfacht in folgender Bedingungsgleichung ausdrücken:

$$t_u \geq t_{requ} \quad (1)$$

So einfach diese Bedingungsgleichung zunächst erscheint, so komplex wird sie bei näherem Hinsehen.

Schon bei der Frage nach der erforderlichen Dauer t_{requ} wird die Kompliziertheit deutlich. Die „definierte Dauer“, von der in der Bauproduktenrichtlinie gesprochen wird, entspricht nicht etwa den 30 oder 90 Minuten des Normbrandversuches. Es hat sich fälschlicherweise eingebürgert, an dieser Stelle sofort den Zusammenhang zu den Feuerwiderstandsklassen des Normbrandversuches herzustellen. Die Dauer t_{requ} ist im Gegenteil in keiner gesetzlichen Vorschrift, DIN-Norm oder Richtlinie quantitativ festgelegt. Sie orientiert sich an den primären Schutzzielen des Brandschutzes, die dem Personenschutz gewidmet sein müssen. Zum Beispiel daran, wieviel Zeit für Flucht oder Rettung im Gebäude befindlicher Personen oder für die Durchführung von Brandbekämpfungsmaßnahmen notwendig ist. Hier spielen zahlreiche Parameter wie z.B. die Höhe der Brandbelastung und die Art und Nutzung des Gebäudes eine Rolle. In der Bau- und insbesondere in der Genehmigungspraxis muß das Fehlen objektiver Kriterien zur Festlegung dieser erforderlichen Dauer t_{requ} immer wieder zu differierenden Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile führen, wenn im Einzelfall mit erheblichen Ermessensspielräumen agiert wird.

Einen Ausweg im Hinblick auf realistische, objektspezifische Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile bietet ein über die „definierte Dauer“ hinausgehender Ansatz. Dabei wird nicht nach der oben angesprochenen „definierten Dauer“ t_{requ} gefragt, sondern danach, welche thermische Belastung der Bauteile bei einem Brand maximal möglich ist. Die thermische Belastung drückt sich meist in Brandgastemperatur-Zeitkurven, sogenannten Naturbrandkurven, aus. Die Bedingungsgleichung (1) geht dann über in einen Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit

$$E_{\text{fi,d,t}} \leq R_{\text{fi,d,t}} \quad (2)$$

mit

$E_{\text{fi,d,t}}$ Bemessungswert der mechanischen Einwirkungen im Brandfall

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

(Indices: fi für fire; d für design; t für time)

Der Index t stellt über die Branddauer t einen Zusammenhang zu dem im Brandverlauf zur Zeit t herrschenden Temperaturfeldern her.

Die Erfüllung der Gleichung (2) stellt sicher, daß das Versagen der Konstruktion während eines Brandes nicht eintritt (s. Bild 3).

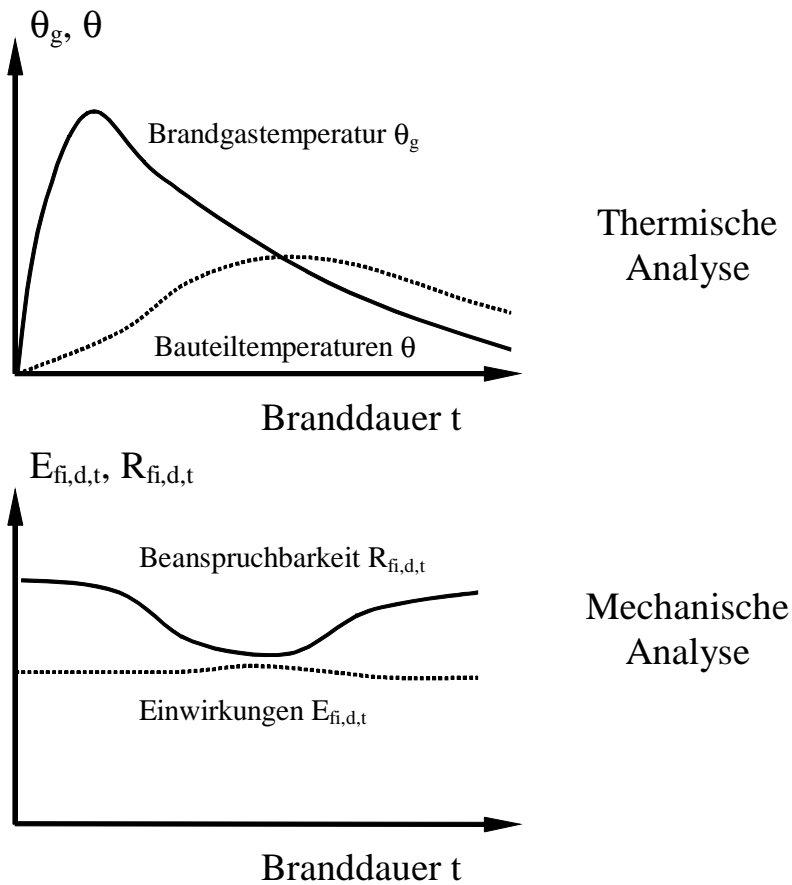


Bild 3 Tragverhalten im Brandfall

Fig. 3 Structural behaviour under fire exposure

Für die Anwendung von Berechnungsverfahren lassen sich aus Bild 3 direkt die verschiedenen Teilaufgaben ablesen:

- Berechnung der Brandgastemperatur-Zeitkurven
- Berechnung der Bauteiltemperaturen
- Ermittlung der mechanischen Lasten im Brandfall
- Berechnung der temperaturabhängigen Beanspruchbarkeit der Tragkonstruktion

Dabei umfaßt die zeitabhängige thermische Analyse die ersten beiden Teilaufgaben, während die letzten beiden Teilaufgaben der temperaturabhängigen mechanischen Analyse zuzuordnen sind. Die numerische Behandlung des Tragverhaltens im Brandfall gehört in dieser allgemeinen Formulierung zu den Simulationsverfahren, die zweifellos zu den anspruchsvollen Inge-

niurmethode n im baulichen Brandschutz zu rechnen sind. Sie haben sich als Bemessungs- und Nachweismethoden für die große Anzahl der alltäglichen Bauaufgaben bisher nicht etabliert.

Beispiele für den praktischen Nutzen dieser Simulationsverfahren sind die Ableitung des Rechenverfahrens der DIN 18230 Brandschutz im Industriebau [2, 3] mit Hilfe von Wärmebilanzrechnungen. Immerhin wird diese Norm im Zusammenhang mit der Industriebaurichtlinie [4] in einem vereinfachten Nachweis ohne Ermittlung der Brandbelastung Brandabschnitte bis 10000 m² in ungeschützter Stahlbauweise ermöglichen, wenn bestimmte Anforderungen an die brandschutztechnische Infrastruktur (Sicherheitskategorie K 4 → Sprinkleranlage) eingehalten werden.

Sicherheitskategorie Brandabschnitte ...		Feuerwiderstandsklasse der tragenden und aussteifenden Bauteile	
		F 0	F 30
K 1	... ohne besondere Maßnahmen für Brandmeldung und Brandbekämpfung	2000	3000
K 2	... mit automatischer Brandmeldeanlage	3500	4500
K 3	... mit automatischer Brandmeldeanlage in Industriebauten mit Werksfeuer- wehr in mindestens Gruppenstärke	5000	6000
K 4	... mit selbsttätiger Löschanlage	10000	10000

Tab. 1 Zulässige Größen der Brandabschnittsflächen in m² in erdgeschossigen Industriebauten –Musterindustriebaurichtlinie [4]

Table 1 Permitted areas of compartmentation [m²] in single-storey industrial buildings - Model code for industrial buildings [4]

Darüberhinaus ist die Ableitung der Tabellen in DIN 4102 Teil 4 [5] bzw. der vereinfachten Berechnungsverfahren für Verbundbauteile [6, 7, 8] mit Hilfe von allgemeinen Rechenverfahren zur Simulation des Tragverhaltens von Bauteilen unter Normbrandbedingungen zu nennen.

Ein umfassendes analytisches Verfahren für die brandschutztechnische Tragwerksbemessung muß das Verhalten des Tragwerks bei erhöhten Temperaturen und die mögliche thermische Beanspruchung, die ggfs. die günstige Wirkung der Brandbekämpfung einschließt, berücksichtigen und in ein Sicherheitskonzept eingebunden sein. Gegenwärtig ist es grundsätzlich möglich, mit numerischen Simulationsberechnungen, die die wesentlichen Einflußgrößen berücksichtigen, nachzuweisen, daß sich das Tragwerk oder Teile davon in einem tatsächlichen Schadenfeuer angemessen verhalten werden. Innerhalb der europäischen Staaten beruht

das gebräuchliche Verfahren jedoch auf den Ergebnissen von Normbrandversuchen und ist gekoppelt an ein Klassifizierungssystem in Vorschriften für Feuerwiderstandsdauern. Dabei wird regelmäßig von der Vermutung ausgegangen, daß die geforderten Feuerwiderstandsdauern die vorgenannten Einflüsse implizit erfassen. Die nachfolgend behandelten Teile 1-2 der Eurocodes Eurocodes befassen sich deshalb hauptsächlich mit der Bemessung für den Feuerwiderstand unter Normbrandbedingungen.

3 Möglichkeiten der brandschutztechnischen Bemessung nach Eurocodes

3.1 Allgemeines

Nach etwa zehnjähriger Vorarbeit auf europäischer Ebene hat das Deutsche Institut für Normung (DIN) im Jahr 1997 die europäischen Vornormen zur brandschutztechnischen Tragwerksbemessung als Baudruck in deutscher Sprache veröffentlicht. Für Stahl- und Stahlverbundkonstruktionen im Hoch- und Ingenieurbau sind die Grundlagen im Eurocode 1 Teil 2-2 [9] sowie die allgemeinen Regeln im Eurocode 3 Teil 1-2 (Stahlbauten) [10] und Eurocode 4 Teil 1-2 (Verbundtragwerke aus Stahl und Beton) [11] bedeutsam. Die grundlegenden Änderungen der Eurocodes gegenüber der DIN 4102 Teil 4 [5] sind zum einen das neue Sicherheitskonzept der Eurocodes (Teilsicherheitsbeiwerte) und zum zweiten die Tatsache, daß brandschutztechnische Nachweise auf rechnerischem Wege geführt werden können.

Die bauaufsichtliche Einführung der europäischen Bemessungsvorschriften für den Brandfall wird optimistisch Ende 1998, realistisch zu Beginn des Jahres 1999 erfolgen. Zur Anpassung an das bestehende Normengerüst und nationale bauaufsichtliche Regelungen sind die sogenannten Nationalen Anwendungsdokumente (NAD) bereits weitgehend fertiggestellt. Darin werden allerdings auch einige Einschränkungen im Hinblick auf die Anwendung allgemeiner Simulationsverfahren enthalten sein. Zum Ende des Jahres 1998 wird ein DIBt-Forschungsvorhaben „Gleichwertigkeit von Brandschutznachweisen nach den Eurocodes und nach DIN 4102-4“ abgeschlossen sein, das in einer umfangreichen Veröffentlichung eine Fülle von durchgerechneten Anwendungsbeispielen für die Baupraxis bereitstellen wird.

3.2 Brandgastemperatur-Zeitkurven

Gemäß Eurocode 1 Teil 2-2 [9] dürfen die Brandgastemperatur-Zeitkurven entweder als nominelle Temperaturzeitkurven, wie z.B. die aus den Brandversuchen bekannte Einheitstempe-

raturzeitkurve, angenommen oder aus den projektspezifischen physikalischen Parametern berechnet werden.

Im Eurocode 1 Teil 2-2 [9] Anhang B sind recht einfach anwendbare Berechnungsformeln zur Ermittlung parametrischer Brandgastemperatur-Zeitkurven angegeben. Sie gelten jedoch lediglich für einen sehr eingeschränkten Parameterbereich hinsichtlich der Raumgeometrie des Brandabschnittes nämlich für maximale Grundflächen bis 100 m^2 und maximale Raumhöhen bis 4 m . Immerhin läßt sich der Einfluß wesentlicher Parameter wie der Brandbelastung verdeutlichen (s. Bild 4).

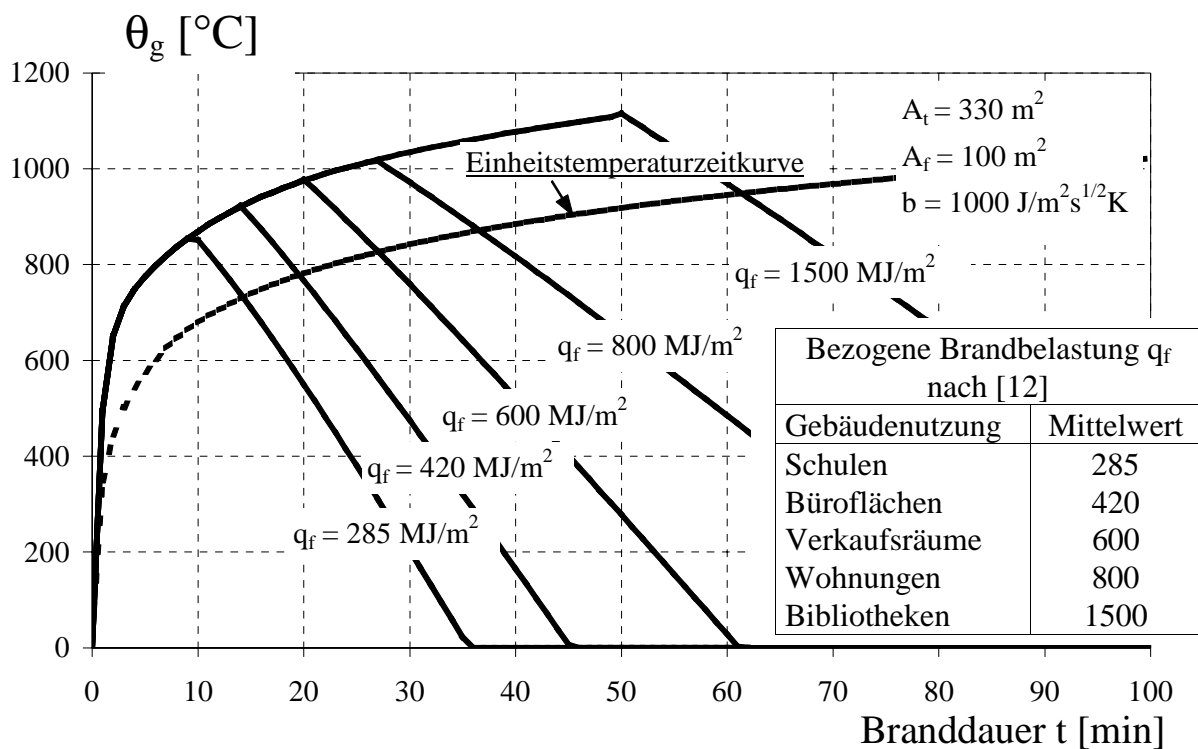


Bild 4 Parametrische Gastemperatur-Zeitkurven gemäß Eurocode 1 Teil 2-2 Anhang B

Fig. 4 Parametric gastemperature-time-curves according to Eurocode 1 Part 2-2 Annex B

Für größere Brandabschnitte mit ggfs. lokal begrenzten Bränden sind diese einfachen Berechnungsformeln ungeeignet. Für die Simulation von Naturbränden sind Programme entwickelt worden, die heute meist sogenannte Mehrraum-Mehrzonen-Modelle verwenden [13, 14, 15]. Dabei wird der zu untersuchende Brandabschnitt in mehrere Teilräume unterteilt, die wiederum mehrere Zonen aufweisen. In den einzelnen Zonen können Temperaturen, Rauch- und Gaskonzentrationen und Druckverteilungen berechnet und damit alle wesentlichen Größen, die das Brandgeschehen beschreiben, ermittelt werden. Für die Berechnungen sind eine Fülle von Eingangsparametern erforderlich. Diese lassen sich grob in Bauwerks- und Brandpara-

meter gliedern. Zu den Bauwerksparametern gehören im wesentlichen die Gebäudegeometrie mit Zu- und Abluftöffnungen und die wärmephysikalischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile (Wände, Decken und Böden). Mit den Brandparametern werden Art, Menge und Verteilung der Brandlasten sowie Abbrandmodelle beschrieben. Hinzu kommt ggfs. die Berücksichtigung von speziellen betrieblichen Einrichtungen wie Rauch- und Wärmeabzugsanlagen und Sprinklern.

Wegen der großen Anzahl der festzulegenden Parameter ist die Berechnung eines für die Bemessung maßgebenden Schadenfeuers außerordentlich schwierig, wenn nicht unmöglich. Für die Brandsimulationsrechnungen ist die Festlegung des Brandszenarios von grundlegender Bedeutung. In den Eurocodes werden keine „Bemessungsbrandszenarien“ festgelegt. Die Anwendung von Brandsimulationsrechnungen im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren setzt daher die Vereinbarung solcher Brandszenarien im Einzelfall voraus. Daß hier erhebliche Ermessensspielräume existieren, liegt auf der Hand.

Die gelungene Definition solcher Brandszenarien im Zusammenhang mit der Norm „Brandschutz im Industriebau“ (DIN 18230 [2]) sollte jedoch ermutigen, derartige Festlegungen zukünftig auch für andere Bereiche, z.B. Büro- und Verwaltungsgebäude, zu treffen.

Für Brandschutzingenieure stellen Brandsimulationsrechnungen ein wichtiges Hilfsmittel dar, um insbesondere Vorhersagen zur wahrscheinlichen Rauchentwicklung zu ermöglichen und daraus lebenswichtige Sicherheitsmaßnahmen zu definieren. Die für die brandschutztechnische Bemessung von Stahl- und Stahlverbundbauteilen bedeutsamen Brandgastemperatur-Zeitkurven sind dabei eher ein Nebenprodukt.

3.3 Bauteiltemperaturen

Mit den Brandgastemperatur-Zeitkurven wird die Erwärmung der Bauteile meist durch numerische Lösung der *Fourier*-Differentialgleichung für die Wärmeleitung in festen Stoffen bestimmt.

$$\frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda(\theta) \frac{\delta \theta}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\lambda(\theta) \frac{\delta \theta}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\lambda(\theta) \frac{\delta \theta}{\delta z} \right) + Q = \rho c(\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

In den Eurocodes werden die dazu benötigten Werkstoffkennwerte für Baustahl und im Hinblick auf Stahlverbundbauteile auch für Normal- und Leichtbeton angegeben. Es handelt sich dabei speziell um die Annahmen bezüglich des spezifischen Gewichtes ρ und den tempera-

transportabhängigen Größen Wärmeleitfähigkeit λ und spezifische Wärmekapazität c . Transportvorgänge von verdampfendem Wasser in Verbundbauteilen werden durch modifizierte Materialkennwerte näherungsweise erfaßt. Wärmequelle für das Bauteil sind die umgebenden Brandgase. Der Wärmestrom in das Bauteil setzt sich aus dem konvektiven und dem radiativen Wärmeübergang (Strahlung) zusammen, die in Eurocode 1 Teil 2-2 geregelt sind. Die genannten Angaben basieren im wesentlichen auf den Erfahrungen an Bauteilbrandversuchen. Es wird vermutet, daß sich der Wärmeübergang unter Naturbrandbedingungen günstiger verhält.

Bei Stahlbauteilen vereinfacht sich der numerische Aufwand für die Lösung der *Fouriergleichung* durch die Annahme einer über den Stahlquerschnitt gleichmäßigen Temperatur. Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit ist diese Annahme häufig gerechtfertigt. Die Erwärmung als Funktion der Branddauer läßt sich dann wie in Bild 5 als eine Bauteiltemperatur-Zeitkurve darstellen. Bild 5 zeigt, daß unter der Einheitstemperaturzeitkurve lediglich massive, ungeschützte Stahlbauteile so langsam erwärmt werden, daß die Stahltemperaturen bis zu 30 Minuten Branddauer unterhalb der Versagenstemperaturen bleiben.

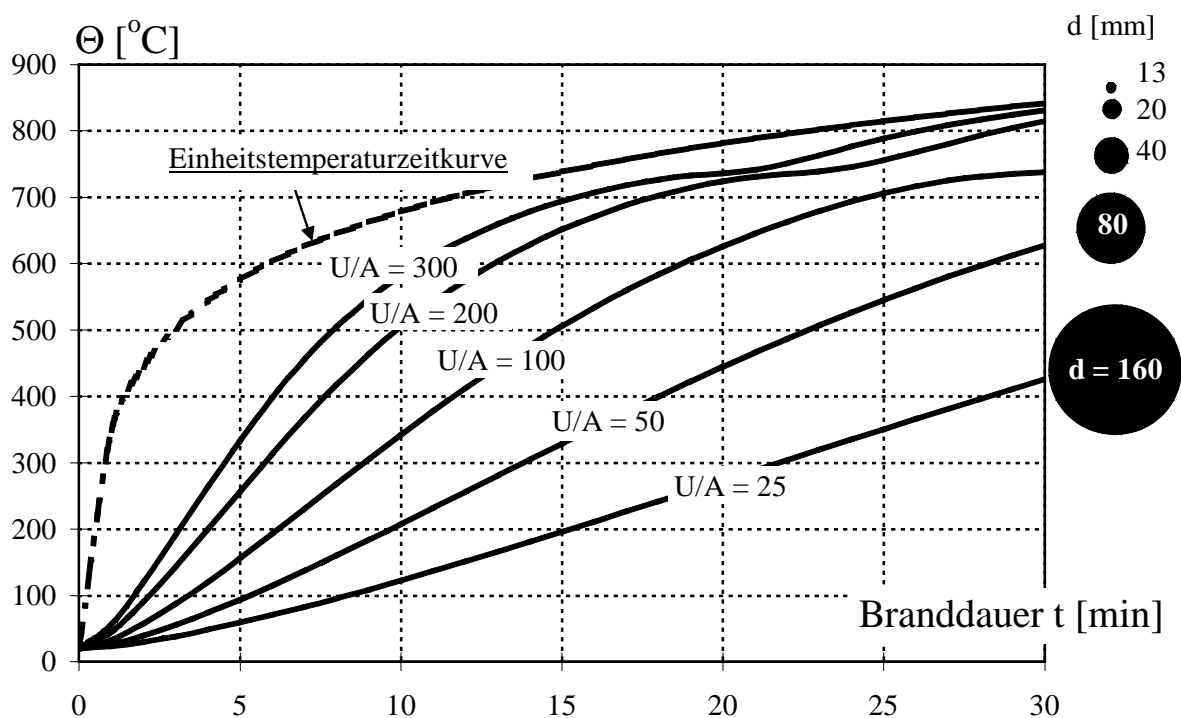


Bild 5 Erwärmungskurven ungeschützter Stahlquerschnitte unter Einheitstemperaturzeitkurve; Kurvenparameter: Profilmfaktor U/A [1/m]

Fig. 5 Heating curves of unprotected steel sections exposed to ISO-fire-curve; parameter: section factor U/A [1/m]

Brandschutzmaßnahmen werden im Stahlbau häufig durch Bekleidungen und Beschichtungen nachträglich appliziert. Sie unterliegen traditionell Zulassungen durch Prüfung in autorisierten Prüfanstalten. Die Angaben der Hersteller sind daher exklusiv für ihr Produkt und beziehen sich regelmäßig auf Mindestdicken zugeordnet zu den Feuerwiderstandsklassen im Normbrandversuch. Daher ist auch verständlich, daß im Eurocode 3 Teil 1-2 keine Materialkennwerte für Bekleidungen oder Beschichtungen geregelt werden. Die Folge davon ist, daß Erwärmungskurven geschützter Stahlbauteile nach Eurocode z.Zt. nicht rechnerisch ermittelt werden können. Auf die Hersteller kommt die Aufgabe zu, solche Materialkennwerte aus ihren Prüfergebnissen zu ermitteln und bereitzustellen. Das Verfahren für die Ermittlung ist auf europäischer Ebene bereits beschrieben [16]. Bis dahin muß mit vereinzelt Angaben in der Literatur z.B. in [17] vorlieb genommen werden.

3.4 Mechanische Lasten im Brandfall

Für den Brandfall gelten die Kombinationsregeln für außergewöhnliche Einwirkungen gemäß Eurocode 1 [9]

$$S_{dA} = S \left[\sum \gamma_{GA} \cdot G_k + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) \right] \quad (4)$$

Dabei ist für den Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in der außergewöhnlichen Situation $\gamma_{GA} = 1,0$ zu setzen. Die Kombinationsbeiwerte ψ_1 und ψ_2 für die veränderlichen Lasten ergeben sich aus Tabelle 2.

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Verkehrslast auf Decken			
- Wohnräume; Büroräume; Verkaufsräume bis 50m ² ; Flure, Balkone und Räume in Krankenhäusern	0,7	0,5	0,3
- Versammlungsräume, Garagen und Parkhäuser; Tribünen; Flure in Lehrgebäuden; Büchereien; Archive	0,8	0,8	0,5
- Ausstellungs- und Verkaufsräume; Geschäfts- und Warenhäuser	0,8	0,8	0,8
Windlasten	0,6	0,5	0,0
Schneelasten	0,7	0,2	0,0
alle anderen Einwirkungen	0,8	0,7	0,5

Tab. 2 Kombinationsbeiwerte gemäß DAST-Ri 104 [18]

Table 2 Combination-factors according to DAST-Ri 104 [18]

Der Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall $E_{fi,d,t}$ darf vereinfachend aus dem entsprechenden Wert aus der Bemessung bei Normaltemperatur ermittelt werden:

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (5)$$

Dabei ergibt sich der Reduktionsfaktor η_{fi} aus Bild 6; für hochbauübliche Lastzusammensetzungen ergeben sich Werte um $\eta_{fi} = 0,6$.

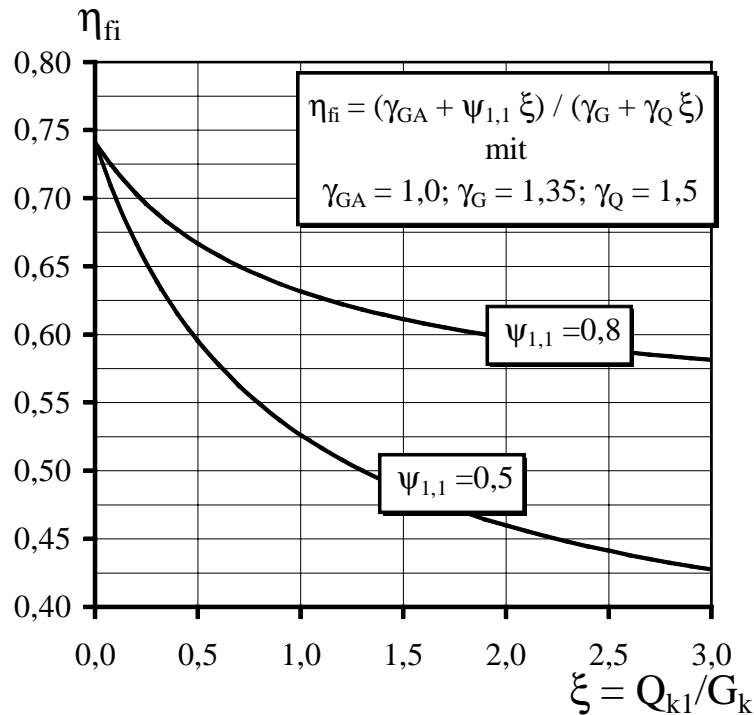


Bild 6 Reduktionsfaktor η_{fi} in Abhängigkeit vom Verhältnis Verkehrslast zu ständiger Last

Fig 6 Reductionfactor η_{fi} depending on the ratio flexible load/permanent load

3.5 Beanspruchbarkeit der Tragkonstruktion

Von tragenden Bauteilen wird gefordert, daß ihre Tragfähigkeit im Brandfall unter Gebrauchslasten für eine anforderungsgemäße Branddauer aufrechterhalten bleibt. Dieses Traglast-Kriterium wird in den Eurocode-Teilen 1-2 entsprechend der Feuerwiderstandsdauer unter Normbrandbedingungen durch die Klassen R 30, R 60, R 90, R 120, R 180 und R 240 ausgedrückt. Die Werkstoff-Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{m,fi}$ dürfen im Brandfall bei der Berechnung der Beanspruchbarkeiten einheitlich für die Werkstoffe Bau-, Betonstahl und Beton zu 1,0 angenommen werden.

Allgemein stehen für den Nachweis des Feuerwiderstands tragender Bauteile neben dem Brandversuch folgende Nachweisebenen zur Verfügung:

- Ebene 1 Klassifizierung der Bauteile mit Hilfe von Tabellen

- Ebene 2 Nachweis mit vereinfachten Berechnungsverfahren
Diese Nachweisform der brandschutztechnischen Bemessung geht von geeigneten vereinfachten und vereinfachenden Annahmen - meist in Form einer temperaturbedingten Reduzierung der Querschnitte - aus. Bemessungswert ist meist eine Traglast des Bauteils zugehörig zu der geforderten Feuerwiderstandsdauer.

- Ebene 3 Nachweis mit allgemeinen Berechnungsverfahren
Dieser Nachweis beinhaltet die vollständige thermische und mechanische Analyse in einem numerischen Simulationsmodell. Diese Nachweismethode darf nach den Eurocodes auf Bauteile, Tragwerksteile und Gesamtkonstruktionen angewendet werden.

Für den Stahlbau werden im Eurocode Nachweisverfahren auf der Ebene 2 für den Verbundbau auf der Ebene 1 und 2 angegeben. Eine Übersicht dazu ist in [19] enthalten.

Als wertvolle Berechnungsgrundlage für Nachweise auf der Ebene 3 werden in den Eurocodes die Rechenwertannahmen für die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Bau- und Bewehrungsstahl sowie Normal- und Leichtbeton festgelegt. Damit wird eine wichtige Basis für die Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens einzelner Bauteile bis hin zu Gesamtkonstruktionen im Brandfall gegeben.

Exemplarisch werden hier die berechneten positiven Biegemomententragfähigkeiten zweier Verbundträger unter einer Brandbeanspruchung gemäß Einheitstemperaturzeitkurve vorgestellt (s. Bild 7). Die Trägerquerschnitte unterscheiden sich dadurch, daß als Brandschutzmaßnahme das Stahlprofil in einem Fall mit Kammerbeton versehen ist, im anderen Fall ist eine kastenförmige Bekleidung mit Gipskartonplatten vorgesehen. Der Kammerbeton enthält hier keine zusätzliche Betonstahlbewehrung. Mit zunehmender Branddauer t wird die Querschnittstragfähigkeit geringer. Die Tragfähigkeiten sind als bezogene Werte dargestellt, wobei der Ausgangswert der Momententragfähigkeit zum Zeitpunkt $t=0$ entspricht, bei dem die Tragfähigkeiten beider Träger gleich sind.

Mit zunehmender Branddauer verhalten sich die beiden Träger ganz unterschiedlich. Der ungeschützte Untergurt des kammerbetonierten Stahlprofils verliert schnell einen Großteil seiner Festigkeit. Die Kurve zeigt einen rapiden Abfall der Tragfähigkeit im Bereich zwischen 20 und 30 min Branddauer. Danach nimmt die Tragfähigkeit wesentlich langsamer ab. Die

Tragfähigkeit des Trägers mit der kastenförmigen Bekleidung bleibt bis etwa 70 min voll erhalten und nimmt dann rasch ab.

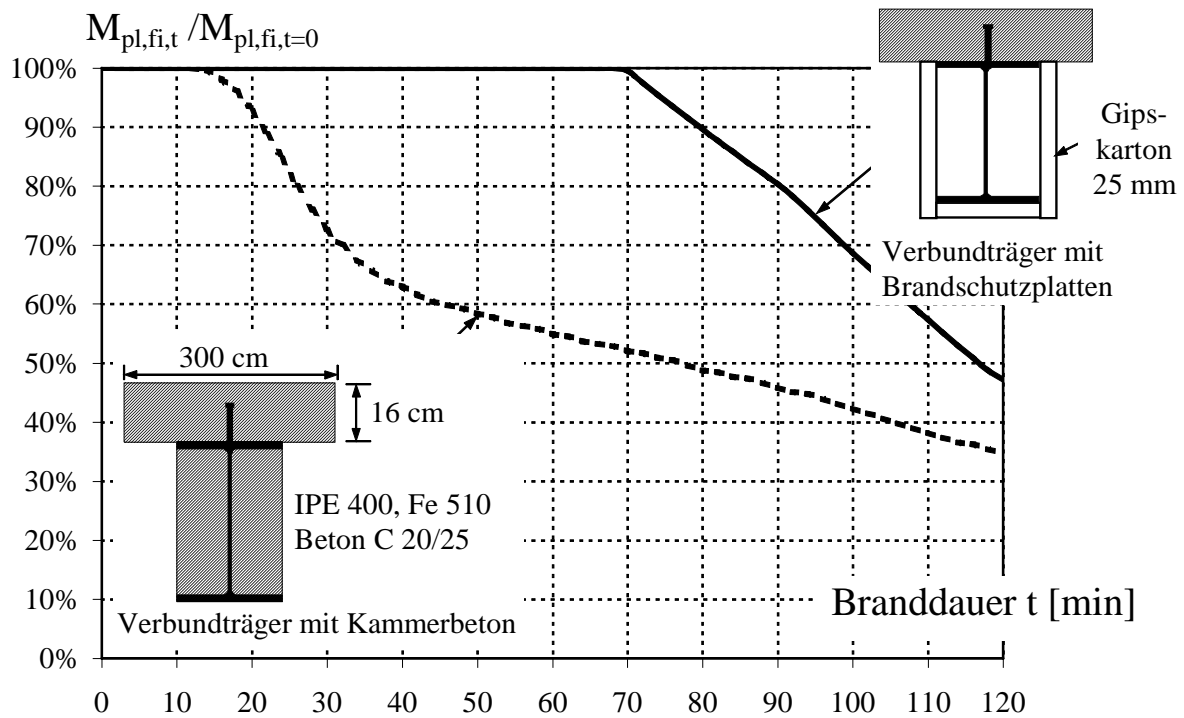


Bild 7 Momententragfähigkeit von Verbundträgern in Abhängigkeit von der Branddauer

Fig. 7 Bending moment capacity of composite beams depending on fire duration

Die Neigung der Kurven im Bereich von etwa 60% der Kalttragfähigkeit ($M_{pl,fi,t}/M_{pl,fi,t=0} = 60\%$) ist sehr unterschiedlich. Daraus folgt, daß beim kammerbetonierten Verbundträger in diesem Lastausnutzungsbereich eine geringe Abminderung der Beanspruchungen mit einer vergleichsweise großen Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer verbunden ist, während sich eine solche Lastreduzierung beim Stahlquerschnitt mit kastenförmiger Bekleidung lediglich geringfügig auswirkt.

Das Beispiel belegt, daß rechnerische Simulationsverfahren den Kenntnisstand in einem Maße vertiefen, wie er selbst durch eine große Zahl von Brandversuchen nicht erreicht werden könnte. Damit werden Grundlagen für ein unter Brandschutzaspekten optimiertes Design verfügbar. Ergebnis solcher rechnerischen Untersuchungen sind beispielsweise spezielle Stahlträgerquerschnitte für Slim-Floor-Decken.

In den Eurocodes wird auch die Gesamttragwerksberechnung als Methode für den Tragsicherheitsnachweis im Brandfall eingeführt. Die Brandversuche an mehrgeschossigen Stahlrahmentragwerken in Cardington [20, 21] haben eindrucksvoll belegt, daß der Versagenszustand

sowohl von Trägern als auch von Stützen sich signifikant von dem Versagenszustand im Normbrandversuch unterscheidet. Bei dem Zusammenwirken in der räumlichen Struktur kommt dem Tragverhalten der Decken besondere Bedeutung zu [22]. In der räumlichen Interaktion trat trotz Bauteiltemperaturen in den unbekleideten Stahlträgern von über 1000°C kein Systemversagen auf. *Robinson* leitet in [23] daraus die kühne These ab, daß „moderne Stahlrahmenkonstruktionen so konstruiert werden können, daß sie einem Feuer mit ungeschützten Trägern standhalten können“.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die brandschutztechnischen Nachweise im Stahl- und Verbundbau erfahren durch die Eurocodes Teile 1-2 gegenüber der DIN 4102 eine wesentliche Erweiterung. Die Erfüllung des langgehegten Wunsches, die Brandbeanspruchung von Bauteilen als „Lastfall Brand“ berechenbar zu machen, rückt in greifbare Nähe. Die Ingenieurtätigkeit verändert sich von der passiven Eingliederung der Bauteile in ein Klassifizierungssystem zu einer Entwurfs- und Bemessungsaufgabe.

Bei aller Euphorie können Ingenieurmethoden nur dann eine spürbare Wirkung auf die Marktentwicklung speziell des Stahlbaus haben, wenn sie entweder verallgemeinerbare Lösungen hervorbringen oder aber als Methode selbst einer großen (Ingenieur-)Gemeinschaft zugänglich sind. Letzteres setzt voraus, daß der Aufwand für die Qualifizierung in einem vertretbaren Verhältnis zum Nutzen für die Anwender steht.

Wegen der Eingangs gezeigten wirtschaftlichen Nachteile muß der Stahlbau das Ziel verfolgen, die erforderlichen Brandschutzmaßnahmen durch maßgerechte Anforderungen und Ausnutzung aller Tragreserven im Brandfall zu reduzieren.

Die vom Stahlbau initiierte Forschung und Entwicklung der letzten 20 Jahre hat mit der Anwendung brandschutztechnischer Ingenieurmethoden vorzeigbare Erfolge erreicht. Neben der Entwicklung des Verbundbaus sind die Anpassung der Anforderungen für offene Parkhäuser (GarVO) und für den Industriebau (IndBauR) richtungsweisend.

Notwendige Basis für die zukünftige Entwicklung ist die zügige Aufnahme der Brandschutz-Eurocodes in die Liste der Technischen Baubestimmungen, um rechnerische Nachweisverfahren bei der brandschutztechnischen Bemessung im Baugenehmigungsverfahren zu etablieren.

5 Literatur

- [1] EKS N°82 Fire Design Information Sheets, EKS, Brüssel
- [2] DIN 18230-1, Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Beuth Verlag, Berlin, 05.1998
- [3] Becker, W.; Hagen, H.; Halfkann, K.; Max, U.; Mehl, F.; Schaub, W.; Schneider, U.: Baulicher Brandschutz im Industriebau, Kommentar zur DIN 18230, Beuth Verlag, Berlin, 1996
- [4] Temme, H.-G.: Industriebaurichtlinie – Stand der Fortschreibung der Muster-Industriebaurichtlinie, in Unterlagen zum Lehrgang „Baulicher Brandschutz – Gefahren durch Rauch und Wärme, Brandschutzkonzepte für ausgedehnte Gebäude“, Technische Akademie Esslingen, Februar 1998
- [5] DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Ausgabe 03.94
- [6] Dorn, T., Hosser, D., Muess, J., Schaumann, P.: Ein rechnerisches Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von kammerbetonierten Verbundträgern, Teil 1: Einfeldträger, Stahlbau 59 (1990), Heft 12
- [7] Dorn, T., Hosser, D., El-Nesr, O.: Ein rechnerisches Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von kammerbetonierten Verbundträgern, Teil 2: Durchlaufträger, Stahlbau 63 (1994), Heft 8
- [8] Dorn, T., Hosser, D., El-Nesr, O.: Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen, Stahlbau 63 (1994), Heft 3 und 4
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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, Deutsche Fassung ENV 1994-1-2 : 1994, Juni 1997, Beuth Verlag, Berlin
- [12] Schleich, J.-B.: Globales Brandsicherheitskonzept, Stahlbau 67, Heft 2, S. 81 bis 96, 1998
- [13] Max, U.: Zur Berechnung der Ausbreitung von Feuer und Rauch in komplexen Gebäuden, Dissertation, Gesamthochschule Kassel, 1990
- [14] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit: Referenzhandbuch für MRFC (Multi Room Fire Code), Version 2.5, Bruchsal/Wien, Dezember 1997
- [15] Peacock, R.D.; Forney, G.P.; Reneke, P.A. ; Portier, R.M.; Jones, W.W.: CFAST, the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, NIST Technical Note 1299, Gaithersburg, February 1993 (<http://fast.nist.gov/cfasthom.html>)

- [16] EKS N°92, Explanatory Document for ECCS N°89 „Euro-Nomogramm“ Fire Resistance of Steel Structures, Brüssel, 1996
- [17] Fontana, M.: Das Euronomogramm – ein praktisches Hilfsmittel zur Berechnung des Feuerwiderstandes von Bauteilen aus Stahl nach Eurocode 3, Stahlbau 65, Heft 2, S. 57 bis 59, 1996
- [18] DASt-Richtlinie 104 - Nationales Anwendungsdokument (NAD), Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1994 Teil 1-1, Deutscher Ausschuß für Stahlbau, 1994
- [19] Schaumann, P.: Tragwerksbemessung für den Brandfall nach Eurocodes, in Tagungsband 718 – BFT 227 »Brand- und Korrosionsschutz von Stahlbauten und -konstruktionen«, 4./5.02.1998, Berlin, Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, 1998
- [20] O’Connor, M.A.; Martin, D.M.: Behaviour of a Multi-storey Steel Framed Building subjected to Fire Attack, Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper No. 169
- [21] Allam, A.M.; Green, M.G.; Burgess, I.W.; Plank, R.J.: Fire Engineering Design of Steel-Framed Structures-Integration of Design and Research, Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper No. 170
- [22] Rose, P.S.; Bailey, C.G.; Burgess, I.W.; Plank, R.J.: The Influence of Floor Slabs on the Structural Performance of the Cardington Frame in Fire, Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper No. 181
- [23] Robinson, J. : Fire – A technical Challenge and a Market Opportunity, Journal of Constructional Steel Research, 1998, 46:1-3, Paper No. 179

Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schaumann
Institut für Stahlbau
Universität Hannover
Appelstraße 9A
30167 Hannover
Tel.: +49-511-7623781
Fax.: +49-511-7622991
E-Mail: schaumann@mbox.stahl.uni-hannover.de