

Brandschutztechnische Bemessung von Stahl- und Stahlverbundbauteilen

Neue Bemessungsmethoden verändern die Ingenieur Tätigkeit im vorbeugenden baulichen Brandschutz

Wer bei der Planung und Ausführung von Stahl- und Stahlverbundtragwerken verantwortlich handelt, stellt das Maß zur Einhaltung gesellschaftlich akzeptierter Sicherheitsniveaus nicht in Frage. In dem Bemühen, dieses Maß zu quantifizieren und in wissenschaftlich fundierte Ingenieurmethoden umzusetzen, hat der Stahlbau in Europa in den letzten Jahrzehnten einen wesentlichen Beitrag geleistet. Motivation dafür ist der Wettbewerb mit anderen Bauweisen. Die Wege, um die anerkannten Schutzziele zu erreichen, sind vielfältiger geworden: Numerische Simulationsverfahren und schutzzielorientierte Bemessungsmethoden haben die Ingenieur Tätigkeit im vorbeugenden baulichen Brandschutz grundlegend verändert. Der Beitrag beschreibt deshalb den aktuellen Stand der Ingenieurmethoden im Rahmen der neuen europäischen Normung und deren mögliche Auswirkungen auf den Stahl- und Stahlverbundbau.

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



Jahrgang 1954, Studium Bauingenieurwesen an der Ruhr-Universität Bochum, 1977 Diplom, 1984 Dr.-Ing. mit einem Promotionsthema zum baulichen Brandschutz; bis 1987 Krupp Forschungsinstitut, Essen; danach Gesellschafter/Geschäftsführer in der HRA Ingenieurgesellschaft Bochum/Leipzig; 1996 Berufung zum Univer-

sitätsprofessor und Leiter des Instituts für Stahlbau der Universität Hannover; Vorsitzender/Mitglied in zahlreichen nationalen und internationalen Verbands- und Normungsgremien auf dem Gebiet des baulichen Brandschutzes; Beratender Ingenieur im Bauwesen.

1 Einführung

Der katastrophale Einsturz der Türme des World Trade Centers hat nachdrücklich das öffentliche Interesse auf das Brandverhalten von Stahl- und Stahlverbundkonstruktionen gelenkt. Die aktuellen Untersuchungsergebnisse [1] geben Anlass zu der Vermutung, dass Mängel in der brandschutztechnischen Auslegung den Schadensverlauf beeinflusst haben könnten.

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

Bei Stahlbauteilen wird der Feuerwiderstand durch direkt am Bauteil angebrachte Brandschutzmaßnahmen oder durch Abschirmung, z.B. bei Trägern in Form von Unterdecken, erreicht. Diese Produkte sind entweder nach DIN 4102-4 [1] klassifiziert oder sie bedürfen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses oder einer Zustimmung im Einzelfall. Zu den direkt am Stahlbauteil wirkenden Brandschutzmaßnahmen gehören:

- dämmschichtbildende Anstriche (DSB),
- plattenförmige Bekleidungen und
- Putze.

Während dämmschichtbildende Anstriche vorwiegend bei geringeren Anforderungen bis etwa F 60 zu Anwendung kommen, können mit plattenförmigen Bekleidungen und Putzen leicht Feuerwiderstandsklassen bis F 120 erreicht werden. In Deutschland liegen die Kosten für diese Brandschutzmaßnahmen für übliche Hochbaukonstruktionen in der Größenordnung der Kosten für den Baustahl. Da-

bei ist der Grad der Anforderung, ob F 30 oder F 90, im Hinblick auf die Kosten nicht ausschlaggebend. Bereits die niedrigste Feuerwiderstandsklasse erfordert Aufwendungen von etwa 500 € pro t Stahlkonstruktion. Die Europäische Konvention für Stahlbau hat im Jahre 2002 eine Studie mit Beteiligung von acht europäischen Ländern durchgeführt. Dabei wurden unter anderem Kosten für Brandschutzbekleidungen durch eine Expertenbefragung erhoben. Im Ergebnis schwanken die Kosten in Europa und zwischen den verschiedenen Bekleidungen sehr stark (Abb. 1). Tendenziell lässt sich eine Zunahme der Kosten mit der Feuerwiderstandsdauer erkennen.

Neben Bekleidungen oder Beschichtungen besteht die Möglichkeit, Stahlquerschnitte mit Beton zu Verbundbauteilen zu kombinieren, die für hohe Feuerwiderstandsklassen bemessen werden können.

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

2 Berechnungsverfahren im Brandschutz

2.1 Allgemeines

Traditionell folgen die normativen Regelungen in Deutschland dem konstruktiven Brandschutzkonzept. Dies umfasst eine Unterteilung der Gebäude in Brandabschnitte und ein angemessen feuerbeständiges Tragwerk. Einen Katalog der hinsichtlich ihrer Feuerwiderstandsfähigkeit klassifizierten Bauteile beinhaltet die DIN 4102-4 [2]. Rechnerische Nachweisverfahren sind im baulichen Brandschutz relativ neu. Ausnahmen bilden hier in Bezug auf die Anforderungen die DIN 18230 [3] und DASt-Ri 019 [4]. In Bezug auf den Feuerwiderstand der Bauteile gibt es die „heißen“ Eurocodes.

Für Stahl- und Stahlverbundbauten im Hoch- und Ingenieurbau sind drei „heiße“ Eurocodes von Bedeutung. Die Einwirkungen im Brandfall werden in DIN V ENV 1991-2-2 [5] (kurz: EC1-2-2) geregelt, während die Regeln zur brandschutztechnischen Tragwerksbemessung für Stahl-

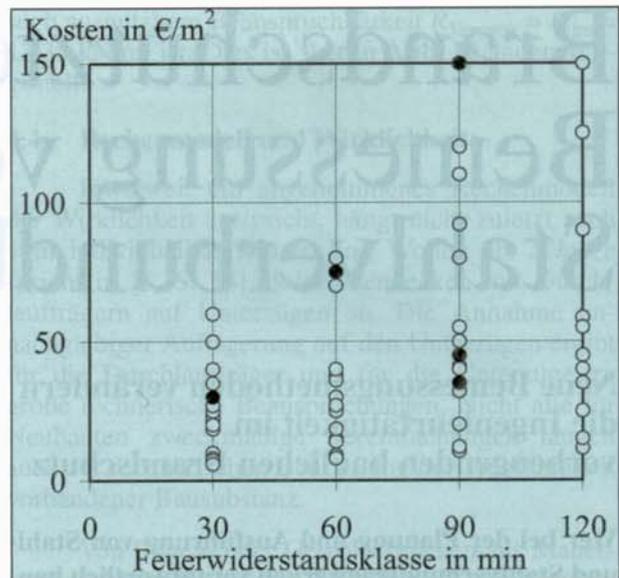


Abb. 1: Kosten für Brandschutzbekleidungen von Stahlbauteilen; Deutsche Angaben (●) Quelle: EKS 2002

bauten in DIN V ENV 1993-1-2 [6] (kurz: EC3-1-2) bzw. für Verbundtragwerke aus Stahl und Beton in DIN V ENV 1994-1-2 [7] (kurz: EC4-1-2) enthalten sind. Die zugehörigen Nationalen Anwendungsdokumente (NAD) wurden als DIN-Fachberichte veröffentlicht.

2.2 Brandgastemperatur-Zeitkurven

Im EC1-2-2 sind die Brandgastemperatur-Zeitkurven entweder als nominelle Temperaturzeitkurven, wie z.B. die aus den Brandversuchen bekannte Einheits-Temperaturzeitkurve (Abb. 2), vorgegeben oder sie können als so genannte Naturbrandkurven aus den projektspezifischen physikalischen Parametern des Gebäudes berechnet werden. Im EC1-2-2 Anhang B sind dazu recht einfach anwendbare Berechnungsformeln zur Ermittlung parametrischer Brandgastemperatur-Zeitkurven angegeben.

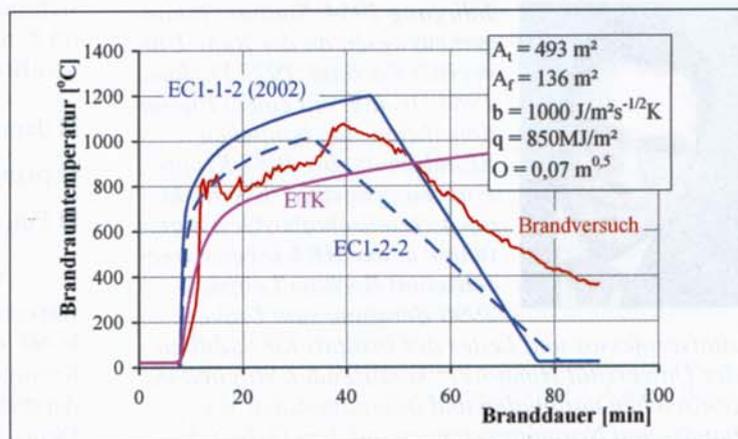


Abb. 2: Brandraum-Temperaturzeitkurven; Vergleich zwischen Versuch, ETK und parametrischen Brandkurven nach EC1

Für größere Brandabschnitte mit ggfs. lokal begrenzten Bränden sind diese einfachen Berechnungsformeln ungeeignet. Für die rechnerische Simulation von Naturbränden sind Programme entwickelt worden, die heute meist so genannte Mehrraum-Mehrzonen-Modelle verwenden. 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 ist eine Fülle von Eingangsparametern erforderlich. Diese lassen sich grob in Bauwerks- und Brandparameter 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 Brand szenarios von grundlegender Bedeutung. In den Eurocodes werden keine „Bemessungsbrandszenarien“ festgelegt. Die Anwendung von Brandsimulationsrechnungen im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren setzt daher die Vereinbarung solcher Brand szenarien im Einzelfall voraus. Dass hier erhebliche Ermessensspielräume existieren, liegt auf der Hand.

Über das NAD wird im Zusammenhang mit den „heißen“ Eurocodes lediglich der rechnerische Nachweis mit den nominellen Temperaturzeitkurven (z.B. ETK) allgemein zugelassen.

2.3 Bauteiltemperaturen

Mit den Brandgastemperatur-Zeitkurven wird die Erwärmung der Bauteile meist durch numerische Verfahren bestimmt. Die dafür erforderlichen thermischen Werkstoffkennwerte sind in den Eurocodes festgelegt.

Bei Stahlbauteilen vereinfacht sich der numerische Aufwand durch die Annahme einer über den Stahlquerschnitt gleichmäßigen Temperatur. Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit ist diese Annahme meist gerechtfertigt. Die Erwärmung als Funktion der

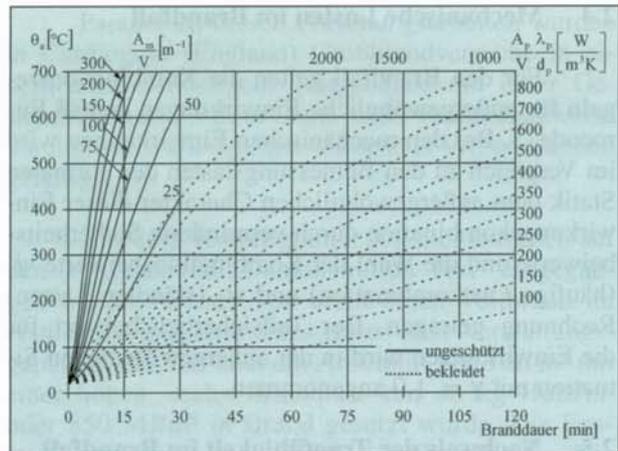


Abb. 3: Erwärmungsfunktionen von Stahlbauteilen als Funktion der Branddauer unter Einheits-Temperaturzeitkurve; Kurvenparameter: Profilfaktor A_m/V [1/m] bzw. $A_p \lambda_p / V d_p$ [W/m²K]

Branddauer lässt sich dann wie in Bild 3 aus [8] als eine Bauteiltemperatur-Zeitkurve darstellen. **Abb. 3** zeigt, dass unter der Einheits-Temperaturzeitkurve lediglich massive, ungeschützte Stahlbauteile so langsam erwärmt werden, dass die Stahltemperaturen bis zu 30 Minuten Branddauer unterhalb der Versagens-temperaturen bleiben, die im Bereich von ca. 450 bis 650 °C liegen. Im Regelfall sind daher bei Anforderungen an die Feuerwiderstandsklasse Brandschutz-bekleidungen vorzusehen.

Die modernen numerischen Verfahren bieten darüber hinaus die Möglichkeit, auch komplexere Temperaturfelder unter Brandbeanspruchung zu berechnen. 2D- oder 3D-Modelle können beispielsweise für Stahlverbundquerschnitte (**Abb. 4**) oder auch Anschlusssituationen angewendet werden.

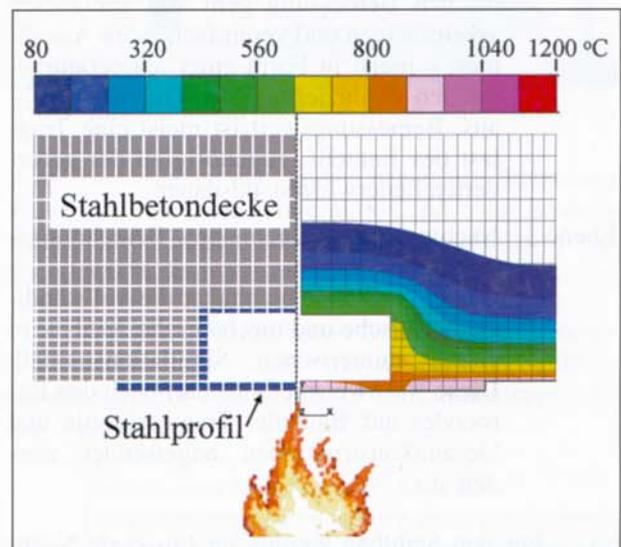


Abb. 4: FEM-Netz und Temperaturprofil nach 90 min ETK-Beflammung bei einem Stahlverbundquerschnitt

2.4 Mechanische Lasten im Brandfall

Für den Brandfall gelten die Kombinationsregeln für außergewöhnliche Einwirkungen gemäß Eurocode 1. Bei den mechanischen Einwirkungen wird im Vergleich zu den Bemessungslasten der normalen Statik dem außergewöhnlichen Charakter dieser Einwirkungskombination durch verminderte Sicherheitsbeiwerte und die Wahl der Kombinationsbeiwerte ψ_1 (häufige Lastkombination) und ψ_2 (ständige Lasten) Rechnung getragen. Der Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen wird in der außergewöhnlichen Situation mit $\gamma = 1,0$ angenommen.

2.5 Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall

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 ... etc. 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.

In den Eurocodes stehen für den Nachweis des Feuerwiderstands tragender Bauteile 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 Gesamtstrukturen angewendet werden.

Für den Stahlbau werden im Eurocode Nachweisverfahren auf der Ebene 2 und 3, für den Verbundbau auf den Ebenen 1 bis 3 angegeben. Als wert-

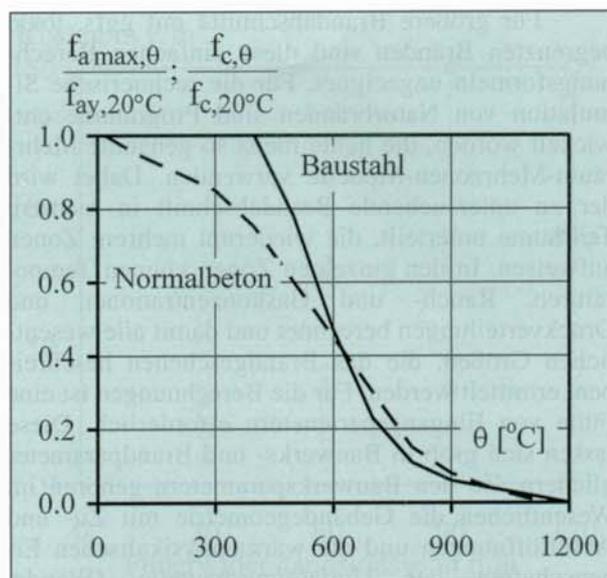


Abb. 5: Abhängigkeit der Festigkeiten von Baustahl und Normalbeton von der Bauteiltemperatur

volle Berechnungsgrundlage für Nachweise auf der Ebene 3 werden in den Eurocodes die Rechenwertannahmen für die temperaturabhängigen Materialeigenschaften von Bau- und Bewehrungsstahl sowie Normal- und Leichtbeton festgelegt (Abb. 5). Damit wird eine wichtige Basis für die Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens einzelner Bauteile bis hin zu Gesamtstrukturen im Brandfall gegeben. Die Nachweise auf der Ebene 3 mit allgemeinen Berechnungsverfahren werden durch die Nationalen Anwendungsdokumente eingeschränkt.

Bei Stahlbauteilen kann der Nachweis auf Temperaturebene mit dem Θ_{cr} -Verfahren geführt werden. Dabei wird nachgewiesen, dass die z.B. nach Abb. 3 errechneten Stahltemperaturen, die für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer (R-Klasse) ermittelt wurden, unterhalb der kritischen Stahltemperaturen bleiben.

Bei den Nachweisverfahren für Verbundbauteile im EC4-1-2 wurden die in der DIN 4102-4 enthaltenen Bemessungstabellen, abgestimmt auf das veränderte Sicherheitskonzept der Eurocodes, aus den deutschen Regelungen übernommen.

Die vereinfachten Berechnungsverfahren der Ebene 2 ermöglichen dem Tragwerksplaner besser als mit den Tabellenverfahren, den Feuerwiderstand der Verbundbauteile rechnerisch nachzuweisen. Der Verbundquerschnitt kann den Anforderungen somit besser angepasst werden. Bei den vereinfachten Rechenverfahren erfolgt eine Berechnung der Querschnittstragfähigkeit des zu bemessenden Bauteils für die Branddauer unter Einheits-Temperaturzeitkurve, die der angestrebten Feuerwiderstandsdauer entspricht. In

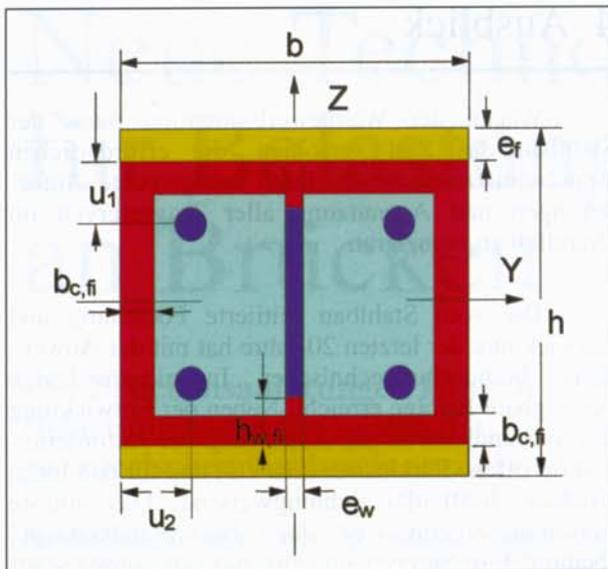


Abb. 6: Aufteilung eines brandreduzierten Verbundstützenquerschnitts mit Kammerbeton

diesem Zusammenhang wird von sogenannten „brandreduzierten“ Querschnitten gesprochen (Abb. 6). Die Vereinfachung gegenüber allgemeinen Rechenverfahren besteht darin, dass die Temperaturberechnung zur Bestimmung der Querschnittstemperaturen überbrückt wird, indem die Festigkeitsabminderung für festgelegte Querschnittsbereiche in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsdauer und z. B. der Bauteilmassigkeit direkt vorgegeben ist.

Bei Biegebauteilen erfolgt der Tragfähigkeitsnachweis nach der Plastizitätstheorie. Bei Stützen muss beim Bauteilnachweis das Stabilitätsverhalten infolge der temperaturbedingten Steifigkeitsabnahme berücksichtigt werden. Der Schlankheitseinfluss wird durch spezielle, für den Brandbeanspruchungszustand gültige Knickspannungskurven berücksichtigt.

3 Naturbrandszenarien

In den 90er Jahren startete die Europäische Konvention für Stahlbau ein großes europäisches Forschungsprojekt „Natural Fire Safety Concept“ (NFSC) [9], das sich zum Ziel gesetzt hat, für die brandschutztechnische Bemessung Naturbrandszenarien zugrunde zu legen und diese in ein probabilistisches Sicherheitskonzept einzubetten. Dieses Konzept hat in jüngerer Zeit national in analoger Weise die Entwicklungen der neuen Musterbauordnung, der Musterindustriebau-Richtlinie [10] und der DAST-Richtlinie 019 [4] beseelt.

Parallel zu diesen Forschungsarbeiten wurden in Cardington (England) Großbrandversuche in einem achtgeschossigen Testgebäude mit einer Gesamthöhe von 33 m in Stahl- bzw. Verbundbauweise durchgeführt. Die Decken wurden als Verbunddecken gefertigt.

Aus dem Testprogramm soll hier lediglich auf den so genannten „Demonstration Test“ eingegangen werden. Dieser Test stellt einen Vollbrand im ersten Obergeschoss eines Büro- oder Verwaltungsgebäudes dar, bei dem ein Abschnitt von 136 m² mit einer hohen, realen Brandlast von 46 kg Holz/m² oder 850 MJ/m² in Brand gesetzt wurde. Die Fensterfläche betrug etwa 20 % der Grundfläche. Die Stahlstützen waren mit kastenförmiger Bekleidung versehen; Verbundträger und Verbunddecken waren ungeschützt.

Nach dem Brand blieb die Stütze erwartungsgemäß unversehrt. Träger und Decken wurden stark plastisch verformt, sie haben jedoch nicht versagt. Der Brandversuch hat 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



Abb. 7: Brandabschnitt nach dem Brand (Foto: British Steel)

dem Tragverhalten der Decken besondere Bedeutung zu. In der räumlichen Interaktion trat trotz Bauteiltemperaturen in den unbedeckten Stahlträgern von über 1000 °C kein Systemversagen (Abb. 7) auf.

Aus den umfangreichen Analysen der Cardington-Versuche lassen sich zwei wesentliche Schlussfolgerungen für mehrgeschossige Rahmentragwerke aus Stahl ziehen.

Erstens zum Brandverlauf (Abb. 2):

Die Gastemperaturen steigen nach der Schwelbrandphase rasch an und erreichen Temperaturen, die bei der vorliegenden hohen Brandlast von 850 MJ/m² durchaus höher als die ETK sein können. Nach etwa

30 min sinken die Gastemperaturen wieder ab, weil die Brandlast verbrannt ist. Im Vergleich zur ETK zeigt sich, dass die Gastemperaturen etwa 50 min nach Beginn der Vollbrandphase unter das Niveau der ETK sinken.

Zweitens zum Tragverhalten:

Obwohl die Stahltemperaturen zeitweise höher als 1000 °C lagen, haben die ungeschützten Verbundträger nicht versagt. Offenbar wirken im räumlichen Tragsystem zusammen mit den Verbunddecken Mechanismen, die die Tragfähigkeit im Brandfall gegenüber den Versuchsbedingungen im Normbrandversuch deutlich erhöhen. In England wurde aus dieser Erkenntnis ein Bemessungsverfahren für Verbunddecken entwickelt, das im Brandfall einen Membran-Tragzustand der Decken zugrunde legt. Als Folge dieses Tragmodells können Nebenträger ungeschützt ausgeführt werden [9].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Versuche dieser Art belegen, dass sowohl der Brandverlauf als auch das Tragverhalten der Struktur sich im realen Gebäude von den Verhältnissen im Normbrand deutlich unterscheiden. Hier liegt ein wesentliches Potenzial für Weiterentwicklung im baulichen Brandschutz.

4 Ausblick

Wegen der Wettbewerbssituation 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 ist die Anpassung der Anforderungen für offene Parkhäuser (GarVO) und für den Industriebau (IndBauR) richtungweisend. Das jüngste Forschungsergebnis ist das „Naturbrandkonzept“ (Natural Fire Safety Concept), das auf europäischer Ebene erarbeitet wurde, und die DAST-Richtlinie 019 für die Brandsicherheit von Stahl- und Stahlverbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden.

Moderne Berechnungsverfahren verdrängen die traditionell mehr empirischen Methoden im baulichen Brandschutz. Sie führen zu vereinheitlichten und stets nachvollziehbaren Bemessungsergebnissen.

Literatur

- [1] Schaumann, P.; Kettner, F.: Anwendung der „heißen Eurocodes“ – Untersuchungen zum World Trade Center, DiB-Special Stahlbau, Juli/August 2003, Deutsches Ingenieurblatt, S. S2-S5
 - [2] DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Ausgabe 03.94
 - [3] DIN 18230-1, Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Beuth Verlag, Berlin, 05.1998
 - [4] DAST-Richtlinie 019 – Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden (11'2001), Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf (www.bauen-mit-stahl.de/brandschutz.htm)
 - [5] DIN V ENV 1991-2-2 Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen im Brandfall, 1997, Beuth Verlag, Berlin
 - [6] DIN V ENV 1993-1-2 Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, 1997, Beuth Verlag, Berlin
 - [7] 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, 1997, Beuth Verlag, Berlin
 - [8] Schaumann, P.: Nationale brandschutztechnische Bemessung, Stahlbaukalender 2001, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2001, Seite 369 – 402
 - [9] Schleich, J.B.; Cajot, L.: Brandsicherheitskonzept unter Berücksichtigung von Naturbrand, EGKS-Projekt 7215-PA/PB/PC-057, ARBED-Recherches, Esch/Alzette, Luxemburg, 2001
 - [10] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebaurichtlinie – MIndBauRL), Konferenz der für das Städtebau-, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (AR-GEBAU), (03.2000)
 - [11] Newman, G.M.; Robinson, J.T.; Bailey, C.G.: Fire Safe Design: A New Approach to Multi-Storey Steel-Framed Buildings, Steel Construction Institute P 288, Silwood Park, 2000
- Weitere Literatur zum baulichen Brandschutz von Stahl- und Verbundbauteilen mit Erläuterungen und zahlreichen Berechnungsbeispielen zu den Eurocodes siehe Homepage www.stahlbau.uni-hannover.de