

Foto: dpa

Untersuchungen zum World Trade Center Anwendung der „heißen Eurocodes“

Am 11. September 2001 stürzten die Türme des World Trade Centers als Folge eines terroristischen Anschlags in sich zusammen. Nach Auslösung des Versagensmechanismus versanken die Türme innerhalb von 10 Sekunden in einem flammenden Inferno. Dieses tragische Ereignis kostete fast 3000 Menschen das Leben. Im Nachgang sind zunächst spontane, dann zunehmend ausgereifte Analysen zum Versagensablauf in der ganzen Welt veröffentlicht worden. Teils, weil die US-Sicherheitsbehörden und die Gebäudeeigentümer Unterlagen einbehalten haben, teils, weil eine Vielzahl von entscheidenden Parametern im Nachhinein nicht quantifizierbar sind, stößt die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Phänomenen des Kollapses auch heute, fast zwei Jahre nach dem Ereignis, auf viele Grenzen.

Die bisher umfangreichste Dokumentation ist der im Mai 2002 erschienene Bericht der Federal Emergency Management Agency (FEMA) [1]. Im Juni 2002 veröffentlichte James Quintiere von der University of Maryland einen bemerkenswerten Beitrag [2], der mit zeitlicher Verzögerung im Frühjahr diesen Jahres in Amerika eine wachsende öffentliche Diskussion um etwaige Sicherheitsmängel im konstruktiven baulichen Brand-

schutz der Twintowers auslöste. Die Verfasser haben dies zum Anlass genommen, um einige Detailuntersuchungen mit Hilfe der Nachweismethoden der „heißen Eurocodes“ anzustellen. Im Fokus steht dabei nicht die Schadensanalyse des Kollapses vom 11. September. Vielmehr soll der Feuerwiderstand der Deckenkonstruktion (s. Abb. 1) auf der Grundlage der in [1, 2] veröffentlichten Daten mit den Methoden der in Deutschland ab

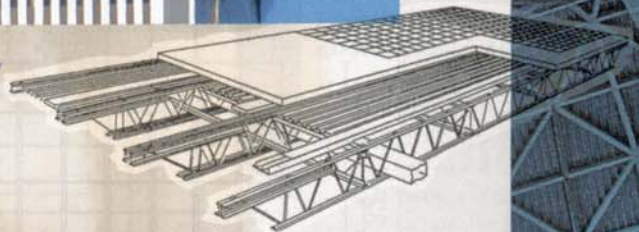


Abb. 1: Tragstruktur der Decken im World Trade Center.

2000 bauaufsichtlich eingeführten Eurocodes für die brandchutztechnische Bemessung diskutiert werden.

ANFORDERUNGEN AN DEN FEUERWIDERSTAND

Die bauaufsichtlichen Anforderungen an den Feuerwiderstand der Tragstruktur für vergleichbare Gebäude werden in Deutschland auf Länderebene in den



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

Jahrg. 1954, Studium Bauingenieurwesen Ruhr-Universität Bochum, 1977 Diplom, 1984 Dr.-Ing. Promotionsthema z. baul. Brandschutz; bis 1987 Krupp Forschungsinst., Essen; dann Gesellsch./GF HRA Ing.-Gesellschaft Bochum/Leipzig; 1996 Berufung z. Univ.-Prof. u. Ltr. d. Inst. f. Stahlbau Uni Hannover; Vors./Mitglied in zahlr. nat. u. internat. Verbands- und Normungsgremien d. baul. Brandschutzes; Beratender Ing.



Dipl.-Ing. Florian Kettner

Jahrg. 1975, 1996 bis 2002 Studium Bauingenieurwesen Universität Hannover, Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau, seit 2002 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Universität Hannover.

Sonderbauordnungen für Hochhäuser geregelt. Für Decken sind die Anforderungen in den Ländern unterschiedlich. Die geforderte Feuerwiderstandsklasse kann F 90 (z.B. in NRW) oder F 120 (z.B. in Hessen) betragen. Wie dem aktuellen Bericht [3] des National Institute of Standards and Technology (NIST) zu entnehmen ist, hätten die

schicht. Ein planmäßiger Verbund war weder zwischen Stahlprofilblech und Leichtbeton noch zwischen Platte und Stahlgitterträger vorhanden. Die Verfasser haben das Deckentragwerk rechnerisch untersucht und dabei den Untergurt und die Diagonale des Nebenträgers als maximal ausgelastete Zug- bzw. Druckstäbe

Type D. Die durchschnittliche Dicke betrug gemäß FEMA-Report [1] $3/4"$ (19 mm) und wurde gerade auf $1\ 1/2"$ (38 mm) erhöht. Am 11. September war im WTC 1 (Nordturm) die größere Bekleidungsdicke im Einschlagbereich (94. bis 98. Etage) bereits vorhanden, während die Arbeiten im Südturm erst bis zur 78. Etage (Einschlagbereich 78. bis 84. Etage) fortgeschritten waren.

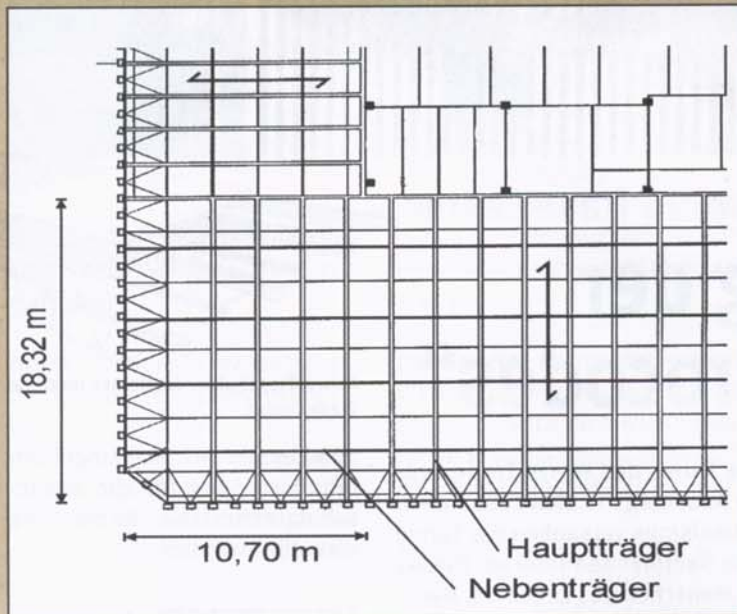


Abb. 2: Viertel-Grundriss eines Regelgeschosses [1].

Decken im World Trade Center einschließlich der Deckenträger nach dem New York City Building Code zwei Stunden Feuerwiderstand, entsprechend F 120, aufweisen müssen.

DAS DECKENTRAGWERK DER WTC-TÜRME

Das Deckentragwerk war ein Trägerrost, der zwischen den Stützen der äußeren Hülle (Tube) und den Stützen des Kerns über 18 m freitragend gespannt war (vgl. Abb. 2). Abb. 1 zeigt die Haupt- und Nebenträger. Die Deckenplatte besteht aus einem Trapezblech mit einer 10 cm dicken Leichtbeton-

identifiziert. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit der Auffassung von Quintiere [2], wonach das Versagen der Druckdiagonalen der Nebenträger zunächst den Einsturz der Decken und danach den progressiven Kollaps der Türme einleitete. Die Nebenträger sind Fachwerkträger mit Gurten aus zwei Winkelstählen L 3,5"x 3/8" (90x9 mm) und Diagonalen aus 1,09" (27,7 mm) Rundstäben; Stahlgüte A36 (Steckgrenze 250 N/mm²). Die nachfolgenden Betrachtungen zum Feuerwiderstand konzentrieren sich daher auf diese Bauteile. Die Brandschutzbekleidung war ein Mineralfaserspritzputz Cafco

EINWIRKUNGEN IM BRANDFALL

Im Eurocode 1 (DIN V ENV 1991-1-2, kurz EC1) werden die für den brandschutztechnischen Nachweis anzusetzenden Einwirkungen festgelegt.

Für den Nachweis von Feuerwiderstandsklassen wird der Heißgastemperaturverlauf entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) des Normbrandversuches angesetzt.

Bei den mechanischen Einwirkungen im Brandfall wird im Vergleich zu den Lastansätzen der normalen Statik dem außergewöhnlichen Charakter dieser Einwirkungskombination durch verminderte Sicherheitsbeiwerte Rechnung getragen.

In den Untersuchungen der Verfasser wurde für das Eigengewicht der Deckenkonstruktion $g_k = 3,0 \text{ kN/m}^2$ und für die veränderliche Last $q_k = 3,5 \text{ kN/m}^2$ zugrunde gelegt. Die Bemessungslasten im Brandfall betragen etwa 50% der Bemessungslasten für die Standsicherheitsnachweise bei Normaltemperatur.

BRANDSCHUTZTECHNISCHE NACHWEISE

Im Eurocode 3 (DIN V ENV 1993-1-2, kurz EC3) sind die Nachweisverfahren für Stahlbauteile im Brandfall festgelegt.

Projekt & Planung

Ein wesentliches Element dieser Nachweise ist die rechnerische Ermittlung der zeitabhängigen Erwärmung der Stahlbauteile. Für die Diagonale des Fachwerkträgers sind Aufheizkurven mit zwei unterschiedlichen Bekleidungsdicken in Abb. 3 dargestellt. Die thermischen Eigenschaften der Brandschutzbekleidung (Mineralfaserspritzputz) wurden [4, Tab. 4-3] entnommen.

deutlich, dass die Feuerwiderstandsklasse R120 mit der dickeren Brandschutzbekleidung von 1 1/2" (38 mm) rechnerisch nachgewiesen werden kann. Die dünnere Bekleidung ist rechnerisch selbst für R90 nicht ausreichend.

NATURBRANDKURVEN

Im EC3 werden neben den sogenannten nominalen Brandraumtemperaturkurven wie beispielsweise der ETK

Brandlast, Ventilationsbedingungen und den thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile den zeitlichen Verlauf der Brandraumtemperatur mit Aufheizungs- und Abkühlungsphase analytisch beschreiben. Da diese Funktionen aus Parameterstudien mit Einzonenmodellen hergeleitet sind, sind sie in ihrem Gültigkeitsbereich hinsichtlich Grundfläche (< 500 m²) und Höhe des Brandraums

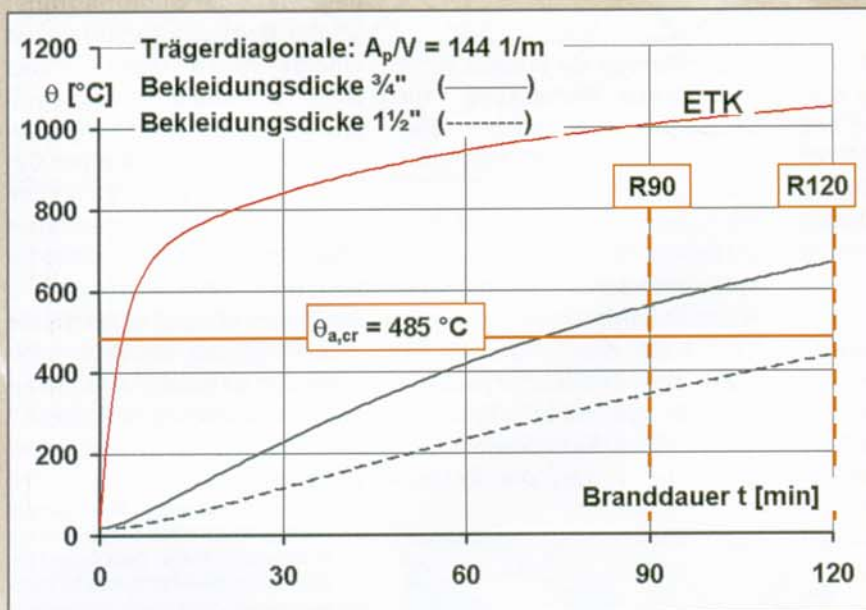


Abb. 3: Zeitabhängige Erwärmung der Stahlbauteile.

Bei druckbeanspruchten Bauteilen wie den Diagonalen ist beim brandschutztechnischen Nachweis analog zur Statik bei Normaltemperatur der Knick Einfluss zu berücksichtigen. Aus der Nachweisprozedur des EC3 ergibt sich für die Diagonalen eine kritische Stahltemperatur von 485 °C. Aus Abb. 3 wird

auch Möglichkeiten eröffnet, Naturbrandkurven zu bestimmen. Diese Option wird zwar von der deutschen Bauaufsicht nicht allgemein anerkannt, soll jedoch an dieser Stelle exemplarisch gezeigt werden. Der einfachste Ansatz sind parametrische Naturbrandkurven, die in Abhängigkeit von

(< 4 m) beschränkt und daher auf die Parameter des WTC nur bedingt anwendbar.

In Abb. 4 sind für zwei unterschiedliche Brandlasten Naturbrandkurven und die daraus folgenden Temperaturverläufe der bekleideten Diagonalen berechnet. Dabei sind die Ventilationsbedingungen und die Umfassungsbautei-

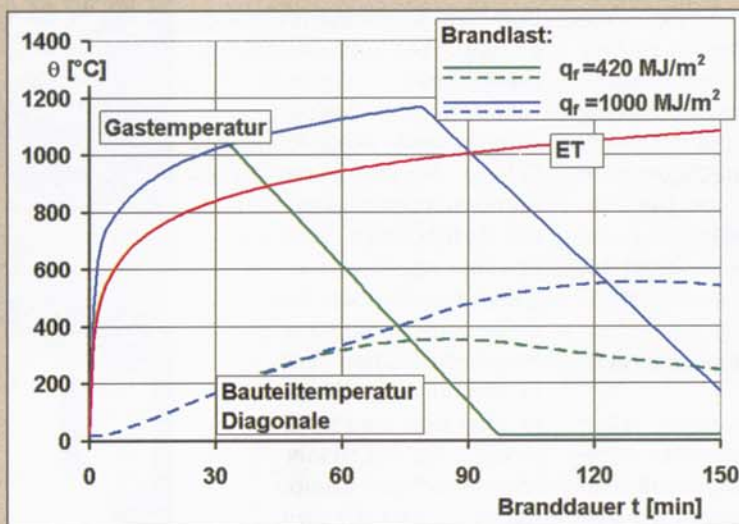


Abb. 4: Naturbrandkurven mit den zugehörigen Bauteiltemperaturen der Diagonalen.

le des WTC berücksichtigt worden. Bei den Brandlasten werden zwei Grenzwerte betrachtet. Der untere Wert von 420 MJ/m^2 entspricht dem statistischen Mittelwert von Bürobrandlasten nach EC1 (siehe auch [5]). Der obere Wert von 1000 MJ/m^2 ergibt sich aus der 80%-Fraktile und einem Sicherheitsbeiwert von etwa 2, wie er nach EC1 anzusetzen wäre, wenn keine zusätzlichen Sicherheitsvorkehrungen wie z.B. Sprinkleranlagen berücksichtigt würden. Auffällig ist, dass die Gastemperaturen deutlich über der ETK liegen. Für die konservative Bemessungsbrandlast (1000 MJ/m^2) ergibt sich für das mit $1 \frac{1}{2}$ " (38 mm) Brandschutzbekleidung versehene Bauteil eine maximale Temperatur von etwa $550 \text{ }^\circ\text{C}$, die höher ist als bei 120 min Normbrandbedingungen.

ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von Untersuchungen zum Feuerwiderstand der Deckenkonstruktion des WTC werden die Nach-

weisverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbauteilen nach den „heißen Eurocodes“ exemplarisch aufgezeigt.

Die Ergebnisse stimmen mit dem aktuellen Stand der Untersuchungen durch amerikanische Wissenschaftler überein und zeigen, dass die ursprüngliche Dicke der Brandschutzbekleidung für zwei Stunden Feuerwiderstand im Normbrand nicht ausreichend war. Die Beklei-



Abb. 5: Bauteile des WTC im NIST-Labor.

dungsdicke war von den Beteiligten aufgrund einer Empfehlung speziell für das WTC festgelegt worden.

Das National Institute of Standards and Technology führt in seinem letzten Bericht vom Mai diesen Jahres dazu wörtlich aus: „Bis heute ist NIST nicht in der Lage, die technische Grundlage für diese Empfehlung auszumachen.“

Die Mitte der 90er Jahre begonnene Sanierung der Brandschutzbekleidung war am 11. September 2001 erst bereichsweise abgeschlossen. Ob darin eine der Ursachen dafür liegt, dass der Südturm früher als der Nordturm einstürzte, ist eine der vielen Fragen, die das NIST im Rahmen eines zweijährigen Untersuchungsprogramms und durch ein per Gesetz im Oktober vergangenen Jahres ins Leben gerufenes „Team für Nationale Gebäudesicherheit“ beantworten soll. Der Zweck dieses Teams ist, die Sicherheit und bauliche Integrität von Gebäuden in den Vereinigten Staaten zu steigern.

LITERATUR

- [1] Federal Emergency Management Agency: World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations; FEMA 403, May 2002
- [2] Quintiere, J.G.; di Marzo, M.; Becker, R.: A suggested cause of the fire-induced collapse of the World Trade Towers; Fire Safety Journal 37 (2002), p. 707 - 716
- [3] Progress Report on the Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, NIST Special Publication 1000-3, May 2003
- [4] Schaumann, P.: Nationale Brandschutztechnische Bemessung; Stahlbaukalender 2001; Verlag Ernst & Sohn, Berlin; S. 369 - 402
- [5] Schaumann, P.; Heise, A.: Erläuterungen zur DAST-Richtlinie 019: Brandsicherheit von Stahl- und Verbundbauteilen in Büro- und Verwaltungsgebäuden, Stahlbau 71, Heft 5, 2002, S. 310 bis 323

Foto: www.nist.gov