

Stellungnahme zu rechnerischen
Nachweisverfahren für die
Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

T 2187

T 2187

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen im Rahmen der Bauteilklassifizierung

im Auftrag des
Instituts für Bautechnik, Berlin
Az.: IV 1-5 513/87

November 1989

INHALT

Teil 0 Einführung und zusammenfassende Wertung

- 1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise
- 2 Organisation des Berichtes
- 3 Zusammenfassende Wertung
- 4 Weiteres Vorgehen

Teil 1 Grundsätze und Lastannahmen

- 1 Überblick
- 2 Grundkonzept
- 3 Systemannahmen
- 4 Thermische Einwirkungen
- 5 Materialkennwerte
- 6 Mechanische Einwirkungen
- 7 Kombinationsregeln für Einwirkungen
- 8 Offene Fragen
- 9 Literaturhinweise

Teil 2 Betonbauwerke

- 1 Überblick
- 2 Grundlagen und Anwendungsbereich
- 3 Genaue rechnerische Nachweisverfahren
 - 3.1 Berechnungsmodelle
 - 3.2 Thermische Analyse
 - 3.3 Mechanische Analyse
- 4 Vereinfachte Nachweisverfahren
 - 4.1 Thermische Analyse
 - 4.2 Mechanische Analyse

- 4.2.1 Rechnerisches Näherungsverfahren
- 4.2.2 Näherungsverfahren mit Hilfe von Tabellen
- 5 Literaturhinweise

Teil 3 Stahlbauwerke

- 1 Überblick
- 2 Grundlagen und Anwendungsbereich
- 3 Thermomechanische Materialeigenschaften
- 4 Bemessungsverfahren
- 4.1 Übersicht
- 4.2 Vereinfachte rechnerische Nachweisverfahren
- 4.3 Genaue rechnerische Nachweisverfahren
- 5 Vergleich mit ISO-Empfehlungen zum rechnerischen Nachweis der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
- 6 Literaturhinweise

Teil 4 Verbundbauwerke

- 1 Überblick
- 2 Bemessung mit Hilfe von Tabellen oder Tafeln
- 2.1 Nachweis für Regelfälle mit Hilfe von Tabellen
- 2.2 Nachweis mit Hilfe von Traglasttafeln
- 3 Vereinfachte rechnerische Nachweise
- 3.1 Verbundstützen
- 3.2 Verbundträger
- 3.3 Stahlprofilblechdecken
- 4 Genaue rechnerische Nachweisverfahren
- 5 Literaturhinweise

Teil 5 Holzbauwerke

- 1 Überblick
- 2 Grundlagen und Anwendungsbereich
- 3 Thermo-mechanische Materialeigenschaften
- 4 Bauteilnachweise
 - 4.1 Allgemeines
 - 4.2 Balken
 - 4.3 Stützen
 - 4.4 Zugglieder
 - 4.5 Aussteifungen
 - 4.6 Tragende Wände und Decken
- 5 Konstruktive Durchbildung
- 6 Wertung und offene Fragen
- 7 Literaturhinweise

Teil 6 Mauerwerksbauten

- 1 Überblick
- 2 Grundlagen und Anwendungsbereich
- 3 Nachweis durch Brandprüfung
- 4 Nachweis anhand von Tabellen
- 5 Rechnerische Nachweise
- 6 Wertung und offene Fragen
- 7 Literaturhinweise

Teil 7 Materialkennwerte für Beton und Stahl bei hohen Temperaturen

- 1 Vorbemerkung
- 2 Mechanische Materialgesetze
 - 2.1 Baustahl

- 2.2 Bewehrungsstahl
- 2.3 Spannstahl
- 2.4 Beton
- 3 Thermische Materialgesetze
- 4 Empfehlungen

Teil 8 Konzept für Vergleichsrechnungen

- 1 Zielsetzung
- 2 Bisherige Vergleichsrechnungen
- 3 Empfehlungen
- 4 Literaturhinweise

Teil 9 Kurzkomentare zu den Eurocode-Entwürfen (in Englisch)

Part 20 of the EC Actions "Actions on Structures exposed to Fire"

- Eurocode 2 - Concrete Structures
- Eurocode 3 - Steel Structures
- Eurocode 4 - Composite Structures
- Eurocode 5 - Timber Structures
- Eurocode 6 - Masonry Structures

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 0: Einführung und zusammenfassende Wertung

November 1989

1 AUFGABENSTELLUNG UND VORGEHENSWEISE

Dieses Forschungsvorhaben wurde Ende 1986 beim Institut für Bautechnik, Berlin beantragt. Wesentliche Zielsetzung war es, die zum damaligen Zeitpunkt national und international bestehenden Ansätze zum teilweisen Ersatz der bislang ausschließlich experimentellen Untersuchungen des Brandverhaltens von Bauteilen durch rechnerische Nachweisverfahren kritisch zu beleuchten, die Voraussetzungen für deren nationale Anerkennung als technische Regeln zu prüfen und ggf. Wege aufzuzeigen, um die noch vorhandenen Unzulänglichkeiten zu beseitigen. Der Forschungsantrag fiel zeitlich zusammen mit den gerade anlauenden Vorbereitungen für den Entwurf von Brandschutzteilen zu den Eurocodes.

Als Weiterführung der vorbereitenden grundsätzlichen Untersuchungen wurde beim Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau die Entwicklung abgesicherter, praxisgerechter brandschutztechnischer Auslegungsverfahren beantragt. Hier standen von Anfang an konkrete deutsche Vorschläge für die europäisch harmonisierten Brandschutzvorschriften im Vordergrund. Leider verzögerte sich die Bewilligung dieses weiterführenden Forschungsvorhaben bis zum Mai dieses Jahres, so daß die ins Auge gefaßten Weiterentwicklungen der verfügbaren Nachweisverfahren und ihrer Rechengrundlagen erst anlaufen konnten, als die Entwürfe der "heißen" Eurocodes bereits kurz vor der Fertigstellung standen.

Der Bearbeitung des vom IfBt geförderten Forschungsvorhaben und des vorliegenden Forschungsberichtes erfolgte daher unter dem Aspekt, möglichst viele unmittelbar verwertbare Informationen für die deutschen Vertreter in den europäischen Entwurfsgruppen zu liefern, ohne jedoch die vorgeschlagenen Nachweisverfahren abschließend beurteilen und für die deutsche Anwendung empfehlen zu können. Dem Anschlußvorhaben bleibt es vorbehalten, die noch ausstehende Absicherung und erforderli-

chenfalls Modifikation der Eurocodeempfehlungen zu erarbeiten und konkrete Vorschläge für die Behandlung der rechnerischen Nachweisverfahren in der deutschen Normung und im nationalen bauaufsichtlichen Verfahren vorzulegen.

2 ORGANISATION DES BERICHTES

Nach dem vorliegenden Teil 0, der mit einer Einführung und abschließenden Wertung den Rahmen für den Gesamtbericht bildet, folgt der weitere Aufbau zunächst direkt dem der Eurocodes. In Teil 1 werden die Grundsätze und Lastannahmen für die Nachweise brandbeanspruchter Tragwerke behandelt, wie sie im wesentlichen in den baustoffunabhängigen Eurocodes Nr. 1 und Nr. 9 (Eurocode on Actions) geregelt werden. Dann werden die baustoffbezogenen Nachweismethoden in der Reihenfolge der entsprechenden Entwürfe zu den Eurocodes Nr. 2 - 6 besprochen. Anschließend werden, wiederum baustoffübergreifend, Vorschläge für Materialkennwerte und für die weitere Erprobung und Absicherung rechnerischer Nachweisverfahren anhand von Kalibrierungsbeispielen mitgeteilt. Schließlich sind die Kurzkommmentare in Englisch beigelegt, die den deutschen Experten als Diskussionsgrundlage in den Beratungen der Eurocode-Gruppen dienen. Insgesamt hat der Bericht damit folgende Struktur:

- Teil 0 Einführung und zusammenfassende Wertung
- Teil 1 Grundsätze und Lastannahmen
- Teil 2 Betonbauwerke
- Teil 3 Stahlbauwerke
- Teil 4 Verbundbauwerke
- Teil 5 Holzbauwerke
- Teil 6 Mauerwerksbauten
- Teil 7 Materialkennwerte für Beton und Stahl
bei hohen Temperaturen
- Teil 8 Konzept für Vergleichsrechnungen
- Teil 9 Kurzkommmentare zu den Eurocode-Entwürfen (in Englisch)

Die Berichtsteile wurden im wesentlichen unter Federführung von Mitarbeitern des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz erarbeitet. Sie wurden in entsprechend eingerichteten kleinen Arbeitskreisen des NABau-Unterausschusses 02.34.19 diskutiert und abgestimmt. Die substantiellen Beiträge der externen Mitglieder dieser Arbeitskreise haben dazu beigetragen, die Arbeiten auf die notwendige breite Basis zu stellen und alle national verfügbaren Kenntnisse zu nutzen.

Der grundsätzliche Aufbau der einzelnen Berichtsteile wurde so gewählt, daß nach einer generellen Einführung der jeweiligen Problemkreise vorab der Stand der entsprechenden Eurocode-Regelungen zusammengefaßt wird. Optisch durch Kursivschrift abgehoben, folgen dann entsprechende Kommentare des federführenden Mitarbeiters bzw. des Arbeitskreises zu dem Reifegrad der bisherigen Regelungsvorschläge. Hierbei stehen insbesondere Vollständigkeit der Nachweisverfahren und der dazu erforderlichen Rechengrundlagen, Konsistenz, Absicherung durch Versuchswerte und praktische Anwendbarkeit im Vordergrund der Diskussionen. Sofern sich bereits konkrete eigene Verbesserungsvorschläge abzeichnen, werden diese - vorbehaltlich einer weiteren Absicherung im BMBau-Vorhaben - mitgeteilt.

3 ZUSAMMENFASSENDER WERTUNG

Grundsätze und Lastannahmen

Die für die praktischen Nachweise erforderlichen konzeptionellen Vorgaben und Lastannahmen werden in Teil 20 des EC Actions mehr oder weniger vollständig angesprochen. Um die verschiedenen Elemente des Sicherheitskonzeptes für die außergewöhnliche Situation Brand, hinsichtlich der erforderlichen Zuverlässigkeit der Auslegung sowie der in Kombination mit Brand maßgebenden Lasten der verschiedenen Tragwerke bewerten zu können, sind Annahmen zur Auftretenshäufigkeit und Tole-

rierbarkeit von Schäden erforderlich; hierzu werden in der Documentation Note einige Alternativen untersucht. Sofern sich die tolerierbare Versagenswahrscheinlichkeit und das Gewicht der Einflußgrößen im betrachteten Grenzzustand für den Brandfall in der gleichen Größenordnung wie bei Grenzzuständen der Gebrauchsfähigkeit bewegen, können die Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte (wie derzeit vorgesehen) den jeweiligen Teilen des EC Actions entnommen werden. Bei größeren Abweichungen sind jedoch Korrekturen notwendig.

Die Systemrandbedingungen und Belastung für Nachweise des Brandverhaltens sollen generell im Einklang mit der Kaltbemessung gewählt werden. Tatsächlich ändern sich jedoch die Randbedingungen und Schnittgrößen von Teilsystemen oder Einzelbauteilen u. U. deutlich mit der Veränderung der Steifigkeitsverhältnisse beim Brand. Hinzu kommen die teils günstigen, teils ungünstigen Auswirkungen des Zwangs infolge thermischer Dehnungen. Die Interaktion zwischen verschiedenen Bauteilen, einschließlich der Wirkung von thermischen Dehnungen sollte daher grundsätzlich, auch beim Nachweis von Einzelbauteilen, berücksichtigt werden. Sofern erfahrungsgemäß keine ungünstigen Veränderungen der Randbedingungen und Schnittgrößen durch Brand zu befürchten sind, können diese entsprechend der Kaltbemessung angesetzt werden. Flankierend sollten in den einzelnen ECs zusätzliche Richtlinien und Beispiele für die Berücksichtigung von Verformungen nach Theorie II. Ordnung und realistischen Steifigkeitsverhältnissen im Brandfall gegeben werden.

In Übereinstimmung mit der bisherigen Brandschutzpraxis wird die Temperaturerhöhung im Brandraum in den Eurocodes primär durch die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) beschrieben, die für viele Brände in Gebäuden üblicher Art und Nutzung repräsentativ ist. Alternativ darf aber auch die Temperaturerhöhung durch einen Normbrand mit Wärmebilanzrechnungen ermittelt werden. Als maßgebender Parameter geht eine sog. Nennbrandlast

ein, die aus der bauaufsichtlich geforderten Feuerwiderstandsdauer so rückgerechnet wird, daß sie für mittlere Ventilationsverhältnisse und Sicherheitsanforderungen gilt. Bei Gebäuden mit günstiger Ventilation oder mit zusätzlichen Sicherheitsvorkehrungen in Form von Sprinkleranlagen oder Werkfeuerwehr können dann auf diesem Umweg die bauaufsichtlichen Anforderungen in Anlehnung an das Konzept der DIN V 18 230 modifiziert werden. Statt dessen darf auch eine Bemessungsbrandlast im Einzelfall in Abhängigkeit der Gebäudenutzung bestimmt werden.

Nach dem probabilistischen Sicherheitskonzept gelten beim Nachweis des Brandverhaltens von Bauteilen für die Materialkennwerte geringere Teilsicherheitsbeiwerte als bei der Kaltbemessung. Je nach Größe der tolerierbaren Versagenswahrscheinlichkeit können Teilsicherheitsbeiwerte ≤ 1 auftreten, so daß z.B. Nennfestigkeiten zu erhöhen wären. Die Abweichungen von eins sind bei tragenden Bauteilen jedoch in aller Regel so gering, daß im Sinne einer Vereinfachung direkt mit den charakteristischen Materialkennwerten gerechnet werden kann. Bei einem wärmetechnischen Kennwert einer Isolierung als maßgebendem Parameter der Beanspruchbarkeit können aber auch Teilsicherheitsbeiwerte $> 1,0$ notwendig sein, wenn Mittelwerte als charakteristische Werte festgelegt sind. Die Erläuterungen zu den Teilsicherheitsbeiwerten in der Documentation Note gehen davon aus, daß die derzeitige Prüfpraxis möglichst gut wiedergegeben werden soll. Dies ist dadurch sehr unübersichtlich, daß zugleich mehrere Einflüsse zwischen Versuch und Berechnung auseinanderklaffen, deren komplizierte Wechselwirkung noch nicht bekannt ist.

Gleichzeitig mit dem Brand sind nur diejenigen Einwirkungen maßgebend, die quasi-ständig vorhanden sind. Demzufolge sind größere Abminderungen der mechanischen Einwirkungen gegenüber den Gebrauchslasten der Kaltbemessung möglich, die so in der bisherigen Brandprüfpraxis nicht vorgenommen werden. Die Teil-

sicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte für die mechanischen Einwirkungen werden in der Documentation Note diskutiert, wobei probabilistisch begründete Herleitungen zur Lastabminderung der bisherigen Prüfpraxis mit voller Gebrauchslast gegenübergestellt werden.

Aufgrund des Fehlens von systematischen Vergleichen zwischen Rechenergebnissen und Brandversuchen ist bisher nicht erkennbar, inwieweit die rechnerischen Nachweise an Erfahrungen aus der Brandprüfpraxis anknüpfen. Daher wird die Auswahl repräsentativer Tragwerke oder Bauteile aus den unterschiedlichen Baustoffen und die Durchführung systematischer Vergleichsrechnungen empfohlen (vgl. Teil 8). Hierbei sind "Nullrechnungen" mit den gemessenen Parametern aus Brandversuchen notwendig, um die Güte der Rechenmodelle zu belegen. Bei generellen oder partiellen Abweichungen vom derzeitigen experimentellen Sicherheitsniveau ist zunächst den möglichen physikalischen oder konzeptionellen Ursachen nachzuspüren, bevor ggf. an Korrekturschrauben gedreht wird. Erfahrungsgemäß passen solche Korrekturen für einige Anwendungsfälle und versagen bei anderen.

EC 2 - Betonbauwerke

"Exakte" Rechenverfahren (Rechenprogramme) für Stahlbeton- und unbewehrte Betonbauteile existieren für alle drei in EC 2 behandelten Tragwerkstypen - Einzelbauteile, Teilsysteme und Gesamtsysteme. Dabei wurden aber bisher überwiegend - bei Tragwerksausschnitten und Gesamttragwerken ausschließlich - Bauteile aus Normalbeton mit quarzitisches Zuschlägen berechnet. Für Beton mit kalkhaltigen Zuschlägen dürfen vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend die gleichen Rechengrundlagen wie bei Beton mit quarzitisches Zuschlägen verwendet werden. Für Spannbetonbauteile mit sofortiger Vorspannung und mit Vorspannung ohne Verbund existieren zwar

"exakte" Rechenverfahren für Einzelbauteile, es fehlen aber Rechenverfahren für Tragwerksausschnitte und für Gesamttragwerke.

Die Beschränkung der rechnerischen Nachweise auf die ETK-Brandbeanspruchung erscheint zur Zeit sinnvoll. Bisher gibt es nämlich - abgesehen von wenigen Pilotstudien - keine Beweise dafür, daß die in rechnerischen Nachweisen eingesetzten Grundlagen auch bei realen Brandeinwirkungen (z.B. Schwelbränden, Bränden mit ausgeprägter Abkühlphase oder entsprechend der Hydrocarbonkurve) gelten. Die Wärmeübergangsbedingungen vom Teil 20 des EC Actions müssen noch mit den in Deutschland verwendeten Rechenwerten für die Wärmeübergangszahl und das Emissionsverhältnis verglichen werden.

Die thermischen Baustoffkennwerte von Beton im EC 2 Part 10 entsprechen in etwa den in Deutschland verwendeten Annahmen. Zum Teil wird in Deutschland die Dichte als temperaturabhängiger Wert beschrieben. Der Einfluß der vereinfachten Festlegungen der temperaturabhängigen thermischen Baustoffkennwerte auf die Temperaturverteilung im Betonquerschnitt muß durch einige Kontrollrechnungen und Vergleich mit vorhandenen Tabellenwerten nachgewiesen werden. Für die mechanischen Baustoffkennwerte und die thermischen Dehnungen in den Eurocodes 2 - 4 wurden kürzlich einheitliche Annahmen als Kompromißlösungen aus unterschiedlichen nationalen Vorschlägen vereinbart. Die in Teil 7 dieses Berichtes dargestellten neuen Festlegungen sind noch durch Vergleichsrechnungen zu verifizieren.

Es existieren auch Rechenprogramme zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von flächenartigen Bauteilen (Platten, Scheiben) unter Brandbeanspruchung. Diese benötigen andere Eingangsparameter (z.B. Baustoffgesetze) als die üblicheren Rechenprogramme für stabförmige Bauteile; darauf wird im EC 2 nicht hingewiesen.

Tabellen mit diskreten Temperaturwerten oder Graphiken mit Isothermenverläufen sind die derzeit geläufigen Hilfsmittel, um ohne Rechnung die Temperaturverteilung in Betonquerschnitten zu ermitteln. Naturgemäß bleibt die Anwendung solcher Bemessungshilfen auf übliche Querschnittsformen beschränkt. Vorhandene vereinfachte Berechnungsmethoden für die Temperatur liefern nur in einem sehr eingeschränkten Anwendungsbereich akzeptable Ergebnisse. Ein Näherungsverfahren zur Berechnung der Temperaturverteilung in beliebig geformten Betonquerschnitten wäre daher eine notwendige Voraussetzung für die Entwicklung praxisgerechter rechnerischer Auslegungsverfahren.

Die Tabellen für die näherungsweise Bemessung von Stützen, Wänden, Zuggliedern und Balken sowie Platten weichen grundsätzlich nicht von den entsprechenden Tabellen in DIN 4102 Teil 4 ab. Wegen ihrer größeren Parameterabhängigkeit erlauben die Stützen-Tabellen im EC 2 aber eine weitergehendere Differenzierung als die Stützen-Tabellen der DIN 4102.

Das Näherungsverfahren (Tafelwerte) zur Bestimmung der vorhandenen Feuerwiderstandsdauer von überwiegend auf Biegung beanspruchten Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen im EC 2 entspricht dem Verfahren von DIN 4102 Teil 4. Es basiert auf der Methode der "kritischen" Stahltemperatur, die davon ausgeht, daß die temperaturabhängige Festigkeitsreduzierung des Bewehrungsstahls bei einer bestimmten Temperatur und einer bestimmten Festigkeitsausnutzung zum Versagen des Bauteils führt. Damit wird die Berechnung der "heißen" Biegetragfähigkeit, d.h. der Biegetragfähigkeit nach einer bestimmten Brandeinwirkungszeit überflüssig. Die für die Anwendung des Bemessungsverfahrens erforderlichen Beziehungen zwischen kritischer Temperatur und temperaturabhängiger Festigkeitsreduzierung sind im EC 2 und in DIN 4102 Teil 4 für verschiedene Betonstahl- und Spannstahlsorten graphisch dargestellt.

Untersuchungen haben gezeigt, daß das rechnerische Näherungsverfahren im EC 2 für vorwiegend biegebeanspruchte, einachsig gespannte Bauteile ausschließlich bei der Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit brandbeanspruchter Tragwerke befriedigende Ergebnisse liefert. Durchbiegungen bzw. Durchbiebungsgeschwindigkeiten werden nicht angesprochen

EC 3 - Stahlbauwerke

Im Eurocode 3 Part 10 muß zunächst die Brandbeanspruchung in Abhängigkeit der zu berechnenden Struktur festgelegt werden. Sofern es sich um den Nachweis von Einzelbauteilen handelt und die Berechnung somit eine Brandprüfung ersetzt, wird die ETK zugrunde gelegt werden. Für die Berechnung von komplexeren Strukturen kann entweder ein ETK-Brand oder ein natürlicher Brand angenommen werden, dieser kann einzelne Bauteile (in einem Raum) oder das Gesamtsystem (z. B. Rahmentragwerke) thermisch beanspruchen. Unter Umständen ist eine teilweise thermische Einwirkung wegen auftretender Zwängungen gefährlicher für die Konstruktion (und damit maßgebend für die Bemessung) als eine vollständige Temperaturbeaufschlagung. In Deutschland durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, daß außenliegende (d. h. vor der Fassade eines Gebäudes) angeordnete Tragwerkselemente im Brandfall vielfach mit der gleichen Intensität thermisch beansprucht werden wie innerhalb des Gebäudes befindliche Bauteile. Die in EC 3 vorgesehene Unterscheidung von Außen und Innenbauteilen ist daher nur in besonderen Einzelfällen sinnvoll.

Bei den temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sollte man sich mehr auf deutsche Untersuchungsergebnisse beziehen, die auf der Basis umfangreicher experimenteller und rechnerischer Untersuchungen entwickelt wurden. Dies wurde bei dem Neuvorschlag in Teil 7 dieses Berichtes berücksichtigt. Für den temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffi-

zienten, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von Baustahl liegen in Deutschland andere Werte vor als im EC 3 angegeben sind, so daß es zu leichten Unterschieden bei den Rechenergebnissen kommt.

Ein Hauptanwendungsfall rechnerischer Brandschutznachweise für Stahlbauteile wird sein, Ergebnisse aus Normbrandversuchen an bekleideten Stahlstützen und -trägern auf andere Lastausnutzungsgrade, statische Randbedingungen, andere U/A-Werte zu extrapolieren und damit die erforderliche Anzahl von Brandprüfungen auf ein Minimum zu senken. Dabei ist das Brandverhalten des Bekleidungsmaterials von entscheidender Bedeutung. Die generelle Eignung von Bekleidungen (Haftung am Stahl, Verformbarkeit usw.) soll grundsätzlich experimentell (nach CEN XYZ) festgestellt werde. Zur rechnerischen Erfassung des Wärmeisoliationsverhaltens der Brandschutzbekleidung werden deren thermodynamische Materialkennwerte benötigt, über die jedoch bis auf einen Hinweis auf entsprechende CEN-Normen keine Angaben gemacht werden. Um zu vermeiden, daß es auf diese Weise zu Widersprüchen zwischen Versuch und Rechnung kommt, wird vorgeschlagen, die spez. Wärmekapazität der Bekleidung mit Hilfe der einschlägigen kalorimetrischen Verfahren zu ermitteln, die Wärmeleitfähigkeit als wichtigere Einflußgröße aber direkt aus Normbrandversuchen nach DIN 4102 Teil 2 in Verbindung mit Stahlbauteilen abzuleiten. Bei unbekleideten Stahlbauteilen sollten die benötigten Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung und Konvektion ebenfalls zu einem Kennwert zusammengefaßt und direkt aus Normbrandversuchen nach DIN 4102 Teil 2 abgeleitet werden.

Die Einbeziehung eines Korrekturbeiwertes in die Bestimmung der kritischen Temperatur hat erheblichen Einfluß auf das Sicherheitsniveau und erscheint aus unserer Sicht zu grob und daher ungeeignet. Vielmehr sollten die bekannten Abhängigkeiten der kritischen Stahltemperatur von der Temperaturverteilung im Querschnitt, dem Lastausnutzungsgrad, den statischen

Lagerungsbedingungen, den geometrischen und stofflichen Imperfektionen und der Stahlgüte bei der Brandschutzbemessung soweit wie möglich ausgenutzt werden.

Mit der vereinfachten Berechnungsmethode für bekleidete Stahlkonstruktionen soll die Stahltemperaturzeitkurve $T_S(t)$ für Stahlprofile mit verschiedenen Profilmustern und mit unterschiedlichen Bekleidungsarten und dicken bestimmt werden. Ein Vergleich derzeit bekannter Verfahren mit Ergebnissen aus Brandprüfungen an bekleideten Stahlstützen hat ergeben, daß die beste Übereinstimmung zwischen Versuchsergebnissen und numerischer Ermittlung der Zeitdauer bis zum Erreichen der kritischen Stahltemperatur mit denjenigen Methoden erzielt wird, die die wärmetechnischen Eigenschaften der Bekleidung (also insbesondere die Wärmekapazität) möglichst genau berücksichtigen. Auch für "genaue" Rechenverfahren ist es erforderlich, die integralen Wärmetransportkoeffizienten der Bekleidung als Eingangswerte für die Berechnung bereitzustellen. Die genaue Erfassung der wärmeisolierenden Eigenschaften eines Bekleidungsmaterials stellt kein Problem dar, wenn die temperaturabhängige Veränderung der Stoffwerte bekannt ist. Für die meisten auf dem Markt befindlichen Bekleidungen ist dies jedoch nur in relativ geringen Temperaturbereichen der Fall.

Es wird vorgeschlagen, sogenannte "calibrating systems" festzulegen, an denen der Nachweis einer korrekten Berechnung erbracht werden kann. Im Rahmen der in Teil 8 dieses Berichtes konzipierten Vergleichsrechnungen sollen die in Deutschland existierenden Programme an derart repräsentativen Beispielen geeicht werden.

EC 4 - Verbundbauwerke

Für Regelfälle werden im EC 4 als einfachste Nachweisform (Level I) jetzt auch Nachweise mit Hilfe von Tabellen vorgesehen, wie sie Bestandteil der neuen DIN 4102 Teil 4 werden sollen. Dagegen erscheinen (Traglast-)Tafelwerke für eine normgerechte Darstellung ungeeignet.

Für vollständig einbetonierte Stahlprofile erübrigt sich ein vereinfachter rechnerischer Nachweis, da diese Stützenform schon bei der vorgeschriebenen Mindestbetondeckung des Stahlprofils von 40 mm in der Regel Feuerwiderstandsdauern von mehr als 60 min erreicht und bei der aus herstellungstechnischen Gründen zu empfehlenden Betondeckung von 50 mm feuerbeständig (F 90) ausgebildet werden kann. Ihr Brandverhalten kann mit ausreichender Wirtschaftlichkeit durch die Vorgabe der Querschnittsabmessungen und der Betondeckungen von Bewehrung und Stahlprofil beschrieben werden.

Das im EC 4-Entwurf dargestellte, vereinfachte Verfahren ("Jungbluth-Verfahren") für Verbundstützen liefert bei Beachtung der Anwendungsgrenzen auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Es ist aber in seinen Anwendungsgrenzen (zentrische Lasteinleitung, kammergefüllte Stahlprofile mit Biegung um die schwache Achse, Stützenlänge bis 4,50 m) sehr eingeschränkt. Zwei Autorengruppen (Klingsch/Muess/Wittbecker und Haß/Dorn) arbeiten zur Zeit an verbesserten Verfahren, so daß in Kürze drei konkurrierende Verfahren verfügbar sein werden. Im Hinblick darauf sollten derzeit nur die Grundlagen für vereinfachte Rechenverfahren in einer Norm erfaßt werden.

Im EC 4-Entwurf ist zur Zeit kein vereinfachtes Verfahren zur Bemessung von Verbundträgern dargestellt. Das "Jungbluth-Verfahren" liefert auch hier bei Beachtung der Anwendungsgrenzen auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Eine Autorengruppe (Dorn/Muess/Schaumann) arbeitet zur Zeit an einem weiteren

Verfahren, so daß in Kürze mindestens zwei konkurrierende Verfahren verfügbar sein werden. Daher sollten auch hier vorerst nur die Grundlagen für vereinfachte Rechenverfahren genormt werden.

Das im EC 4-Entwurf beschriebene Verfahren für bewehrte Verbunddecken liegt auf der sicheren Seite, wenn die Decken auf Biegung versagen. Sind sie druckbruchgefährdet (sehr hohe Stege), so ist das Brandverhalten noch nicht endgültig geklärt. Abweichend von bisherigen Erkenntnissen erreichen unbewehrte Decken unabhängig von der Profilform Feuerwiderstandsdauern von 30 min. Diese Diskrepanz muß noch geklärt werden. Eine weitere Wissenslücke ist im Anschlußbereich Decke/-Auflager zu schließen. Hier kann u.U. ein vorzeitiges Versagen der Decken, das rechnerisch im EC 4-Entwurf nicht erfaßt wird, auftreten. Daher sollten die konstruktiven Hinweise des EC 4-Entwurfs überarbeitet und ggf. ergänzt werden.

Exakte Rechenverfahren müssen den Einfluß von geometrischen und physikalischen Nichtlinearitäten in geeigneter Weise berücksichtigen. In EC 4 werden hierfür Rechengrundlagen (Wärmeübergang, Materialgesetze) aufgrund des in Teil 7 dieses Berichtes erläuterten Vorschlages vollständig beschrieben. Es handelt sich jedoch zum Teil um Kompromißlösungen, die von bisherigen Annahmen in den Verifizierungsrechnungen abweichen und die daher einer nochmaligen eingehenden Überprüfung durch Vergleichsrechnungen bedürfen.

Alle derzeit bekannten rechnerischen Nachweisverfahren sollten in Referenzpapieren zusammengefaßt werden und in Vergleichsrechnungen gemäß Teil 8 dieses Berichtes erprobt werden. Dann sollten sie vom NABau-Unterausschuß 02.34.19 und ggf. vom SVA "Brandverhalten von Bauteilen" des IfBt abschließend begutachtet werden.

EC 5 - Holzbauwerke

In dem derzeitigen Entwurf des Eurocode 5 Part 10 sind nur rechnerische Nachweise für die Brandschutzfunktion "Tragfähigkeit" (Kriterium "R") geregelt; es fehlen noch Nachweisverfahren für raumabschließende Funktion (Kriterien "E" und "I").

Die rechnerischen Nachweise beschränken sich außerdem auf wichtige Einzelbauteile. Bisläng fehlen dagegen analytische Verfahren für Teilsysteme und Gesamttragwerke.

Die thermo-mechanischen Materialkennwerte sind zum Teil noch unvollständig oder in der Diskussion. Angesichts der noch lückenhaften experimentellen Absicherung werden daher z.B. die temperaturabhängigen Festigkeiten und Steifigkeiten vorerst nur in einem Annex geregelt. Die angegebenen Abbrandraten sind noch umstritten, da deutsche Erfahrungswerte zum Teil um 0,1 mm/min höher liegen. Sie gelten für ETK-Brandbeanspruchung; für natürliche Brandverläufe werden Abbrandraten in einem Annex aufgrund neuerer Forschungsergebnisse definiert. Es wird darauf hingewiesen, daß die Wärmedehnung bei Holz wegen des kleinen α_T und geringer Erwärmung des Querschnittes normalerweise im Hinblick auf Zwangkräfte keine Rolle spielt. Auch die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität sind von eher geringer Bedeutung, da bei Holzbauteilen eine thermische Querschnittsanalyse für Brandbeanspruchung nicht üblich ist.

Bei bekleideten Holzbauteilen darf der verzögerte Abbrand nach dem Versagen der Bekleidung berücksichtigt werden. Hinsichtlich der "Versagenszeiten" von Bekleidungen wird auf eine künftige CEN-Norm verwiesen, die dann für alle baustoffabhängigen Eurocodes gleichermaßen anwendbar sein soll.

Bezüglich nicht ausreichender Kippaussteifung bei schlanken Balken mit $d/b > 4$ kann analog zur Kaltbemessung mit Festig-

keitsabminderung verfahren werden. Bei maßgebendem Schubversagen im Auflagerbereich von Balken, bei Querschnitten mit Durchbrüchen sowie bei Biegung mit Normalkraft sind die Nachweise in EC 5 flexibler und realistischer als in DIN 4102 Teil 4. Der generelle Bemessungsansatz entspricht dem im Holz-Brandschutz-Handbuch.

Im DIN 4102 Teil 4 wird die Knicklänge von Stützen aus Brett-schicht- oder Vollholz bei konstruktiv ausgebildetem vollem Kontaktstoß der Enden unterschiedlich bewertet; außerdem werden für I- und Kreuzquerschnitte vollflächige Kontaktstöße der Enden ohne Reduktion der Knicklänge verlangt. Genaue Angaben für die Mindest-Kippaussteifung sind noch festzulegen. Die konstruktive Ausführung der Verbindungen wird in einem Annex behandelt.

Einzelheiten zum rechnerischen Nachweis von tragenden Wänden und Decken sind noch zu regeln. Derzeit ist nur der Tragfähigkeitsnachweis der Einzelbauteile vorgesehen. Nachweise der Integrität oder thermischen Isolierung sollen in einem Anhang behandelt werden.

Im Annex 5 werden Hinweise zur konstruktiven Durchbildung auf der Grundlage von Prüferfahrungen sowie neuerer Forschungsergebnisse zusammengestellt.

Insgesamt gesehen enthält der EC 5 Teil x eine Reihe von Bemessungsansätzen nach Level I und Level II, die als Weiterentwicklung gegenüber dem derzeitigen Stand der Praxis in der Bundesrepublik zu werten sind. Ihre endgültige Absicherung und der Vergleich mit den bisherigen Bemessungsergebnissen muß jedoch noch erfolgen. Dazu sind systematische Vergleichsrechnungen an repräsentativen Bauteilen unter Normbrandbedingungen erforderlich (vgl. Teil 8 des Gesamtberichtes). Bei positivem Ausgang steht auch einer Anwendung der vereinfachten Nachweisverfahren auf natürliche Brandverläufe nichts im Wege.

Hinsichtlich der Nachweisverfahren nach Level III bleibt der EC 5 hinter den Eurocodes 2 bis 4 zurück. Hier ist jedoch derzeit noch keine Normung möglich und nach dem Bedarf der Praxis vielleicht auch noch nicht erforderlich.

EC 6 - Mauerwerksbauten

Im Eurocode 6 Part 10 werden generell die drei Nachweisstufen - wie in den anderen Eurocodes - aufgeführt. Derzeit sind jedoch hauptsächlich Nachweise mittels tabellierter Daten aus Brandprüfungen, analog DIN 4102 Teil 4, geregelt. Problematisch ist, daß bis zum heutigen Zeitpunkt die harmonisierten Prüfmethode nicht bekannt sind und daher nicht gesagt werden kann, ob die Prüfergebnisse nach den zukünftigen europäischen Prüfmethode mit den heutigen nationalen Prüfergebnissen vergleichbar sein werden.

Eine Prüfmethode für "Brandwände" in Anlehnung an DIN 4102 Teil 3 wird nicht explizit definiert. Es wird aber erwähnt, daß es ggf. gesonderte nationale Anforderungen für "fire walls" geben kann.

Für rechnerische Nachweise werden in jedem Fall thermo-mechanische Kennwerte der Mauerwerksbaustoffe benötigt. Nach vorliegenden Prüferfahrungen haben die Materialkennwerte von Steinen und Mörtel (z. B. Abmessungen, Lochanteil, Rohdichte, Mörtelart) einen entscheidenden Einfluß auf das Brandverhalten von Mauerwerk. Zur Zeit gibt es allerdings noch keine harmonisierten europäischen Normen für die Baustoffe von Mauerwerk, weder bei Normaltemperatur, noch unter Brandbeanspruchung. Im "kalten" Teil von Eurocode 6 werden nur die Fachausdrücke und nicht die Eigenschaften der Mauerwerksbaustoffe definiert.

Die Bemessungshilfen des EC 6 für Nachweise nach Level I basieren im wesentliche auf deutschen und englischen Prüfer-

fahrungen. Bei einigen Mauerwerksarten gibt es jedoch zwischen Großbritannien und der Bundesrepublik erhebliche Unterschiede in der erforderlichen Wanddicke für einzelne Feuerwiderstandsklassen. Einigung konnte bisher nicht erzielt werden, weil die Grundlagen und Prüfvoraussetzungen, die zu den einzelnen Ergebnissen führen, bisher nicht im Detail bekannt sind.

Es ist dringend erforderlich, die noch gänzlich fehlenden rechnerischen Nachweisverfahren zu erarbeiten. Einerseits werden in allen anderen Eurocodes (EC 2 - EC 5) rechnerische Nachweise angeboten, so daß dies auch bei EC 6 erwartet werden kann. Andererseits wären gerade bei Mauerwerk rechnerische Möglichkeiten dringend erwünscht, um die Unstimmigkeiten in den derzeit vorliegenden Prüfergebnissen besser analysieren und ggf. beheben zu können und um die derzeit noch bestehenden Lücken in den Bemessungshilfen auszufüllen.

Materialkennwerte

Die Formulierung von Vorschlägen für einheitliche, temperaturabhängige mechanische und thermische Materialgesetze der Konstruktionsbaustoffe Stahl und Beton in den Eurocodes 2 (Beton), 3 (Stahl) und 4 (Verbund) wurde einer internationalen Arbeitsgruppe übertragen. Die erzielten Ergebnisse stellen Kompromißlösungen dar, die noch im Rahmen der geplanten Vergleichsrechnungen abzusichern sind.

Die temperaturabhängigen Materialgesetze für Baustahl werden in Eurocode 3 und 4 in einer numerischen Darstellung präsentiert, die der von Rubert/Schaumann entspricht. Die Kenngrößen für die Materialgesetze sind aus englischen Versuchen an Stahlproben abgeleitet; sie unterscheiden sich nur geringfügig von Ergebnissen aus dem SFB 148.

Nach allgemeiner Auffassung unterscheiden sich die temperaturabhängigen mechanischen Materialkennwerte von Baustahl und dem heute überwiegend verwendeten naturharten Betonstahl nur wenig. Daher werden die Materialgesetze von Baustahl auch für naturharten Betonstahl verwendet. Für kaltverformten Betonstahl, wie er heute noch in Betonstahlmatten zur Anwendung kommt, hat man die im SFB 148 erarbeiteten Materialgesetze in die äußerer Form nach Rubert/Schaumann gebracht.

Es wurde versucht, auch für die Spannstähle temperaturabhängige Kennwerte zu entwickeln, so daß die Materialgesetze in der Rubert/Schaumann-Formulierung den Ergebnissen des SFB 148 entsprechen. Ob die gewählten Kennwerte diese Bedingung erfüllen, ist noch zu überprüfen.

Die mechanischen Materialgesetze von Beton wurden im ansteigenden Ast entsprechend der im SFB 148 von Schneider entwickelten Formulierung dargestellt. Im abfallenden Ast werden zwei alternative Möglichkeiten angegeben. Die Kurven werden durch drei temperaturabhängige Kennwerte beschrieben. Die aufnehmbaren Zugspannungen im Beton werden in der Regel nicht zur Ermittlung der Tragfähigkeit herangezogen. Für die maximal aufnehmbare Druckfestigkeit wurde ein Kompromiß zwischen der belgisch/luxemburgischen und der von der deutschen Seite vertretenen Auffassung gefunden, wobei die Ausgangswerte nur geringfügig voneinander abweichen. Die maximalen Dehnwerte wurden von der belgisch/luxemburgischen Seite vorgegeben; sie haben für die deutsche, auch im Bereich des abfallendem Ast durchlaufende Formulierung keine Bedeutung.

Große Unterschiede ergaben sich bei den Vorschlägen für die zu den maximalen aufnehmbaren Spannungen gehörenden Dehnwerte. Einigkeit besteht, daß die sogenannten Hochtemperatur-Kriechinflüsse in der Formulierung der Arbeitslinien berücksichtigt werden müssen. Als Kompromißvorschlag wurden in den Textentwurf der Eurocodes 2 und 4 die Mittelwerte aus zwei alterna-

tiven Formulierungen übernommen; die oberen und unteren Grenzwerte werden jeweils in einem Anhang erwähnt. Alle Formulierungen gelten sowohl für quarzhaltigen als auch für kalkhaltigen Betonzuschlag.

Bei der Formulierung der thermischen Materialgesetze für die thermische Dehnung, die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Dichte der Konstruktionsbaustoffe Baustahl, Betonstahl, Spannstahl und Beton, ergaben sich keine wesentlichen Auffassungsunterschiede. Alle verabschiedeten Formulierungen sind mit dem deutschen Standpunkt vereinbar.

Durch die Änderung wesentlicher Materialgesetze gegenüber den Annahmen in den bekannten und abgesicherten Programmsystemen ist es erforderlich, die neuen Formulierungen auf ihre Gültigkeit hin zu überprüfen. Dies kann durch vergleichende Nachrechnung durchgeführter Versuche oder repräsentativer Bauteile (gemäß Teil 8 dieses Berichtes) geschehen. Eine Abschätzung der Auswirkungen der Einflüsse veränderter Kennwerte ist aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten vorab nicht möglich.

Vergleichsrechnungen

Zur Verifizierung der in den Teilen 10 der Eurocodes 2 bis 6 geregelten brandschutztechnischen Nachweisverfahren sind umfassende, systematische Vergleichsrechnungen zwingend erforderlich. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf eine Absicherung der Neuformulierungen für die Materialgesetze. Für Vergleichsrechnungen anhand ausgewählter repräsentativer Anwendungsbeispiele wird in Teil 8 dieses Berichtes ein Konzept vorgelegt.

Zunächst müssen die Anwendungs- und Gültigkeitsgrenzen der Rechenprogramme überprüft bzw. festgelegt werden. Zu diesem Zweck wird ein Anwendungsraum für die Rechenprogramme be-

schrieben, in dem eine hohe Zuverlässigkeit der Rechenergebnisse nachgewiesen ist. In einem weiteren Schritt ist dann festzulegen, wie weit die Rechenprogramme über den nachgewiesenen Anwendungsraum hinaus noch vertrauensvolle Ergebnisse liefern. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, Rechenprogramme auch für solche Fälle einzusetzen, für die keine Erfahrungen durch Brandversuche vorliegen.

Ein derartiger systematischer Vergleich ist bisher nur vereinzelt durchgeführt worden. Die meistens Vergleichsrechnungen beschränken sich auf die Gegenüberstellung von experimentell und rechnerisch ermittelten Ergebnissen. Eine Auswahl von Literaturstellen, die eine möglichst vollständige Versuchs- und Programmbeschreibung enthalten, ist in Teil 8 ausgewertet.

Die repräsentativen Bauteile für die Vergleichsrechnungen sind so festzulegen, daß möglichst eindeutige Versagensmechanismen auftreten, wie Versagen der Zugbewehrung, Versagen der Druckzone, Stabilitätsversagen, usw. Örtliches Versagen, wie zerstörende Betonabplatzungen, Schubbruch oder Durchstanzen sind durch konstruktive Maßnahmen auszuschließen. Einige Vorschläge für die zweckmäßige Vorgehensweise sind in Teil 8 enthalten.

4 WEITERES VORGEHEN

Die Kommentare und Empfehlungen zu den Eurocode-Entwürfen wurden zwischenzeitlich bereits über die deutschen Vertreter in die abschließenden Beratungen der jeweiligen Drafting Panels eingebracht. Dazu dienten auch die in Teil 9 dieses Berichtes beigefügten Kurzkommentare in englischer Sprache. Eine englische Übersetzung dieses Gesamtberichtes soll außerdem im Frühjahr 1989 als deutscher Beitrag zu einem geplanten Statusbericht der ISO/TC92/SC2/WG2 über rechnerische Nachweise des Brandverhaltens von Bauteilen vorgelegt werden. Auf diese Weise ist gewährleistet, daß die in diesem Vorhaben erarbeitete-

ten Grundlagen und Erkenntnisse unmittelbar der internationalen Normung zugute kommen.

Anhand der in Teil 8 des Berichtes konzipierten Vergleichsrechnungen soll im Rahmen des BMBau-Anschlußvorhabens Erfahrung in der Anwendung der rechnerischen Nachweisverfahren auf praxisrelevante Beispiele gewonnen werden. Dabei soll auch ein systematischer Vergleich der Rechenergebnisse mit den vorliegenden Ergebnissen von Brandprüfungen im Hinblick auf eine bessere Absicherung der rechnerischen Nachweisverfahren erfolgen.

Schließlich werden bereits laufende Bemühungen um vereinfachte rechnerische Nachweisverfahren für die "Alltagsanwendung" intensiviert. Die Arbeiten im iBMB konzentrieren sich zur Zeit vorwiegend auf Verbundkonstruktionen, sollen aber in jedem Fall auch auf Mauerwerk ausgedehnt werden. Mit einer angemessenen Förderung, die zum Teil bereits in Aussicht gestellt ist, werden die Erfolgsaussichten als gut beurteilt.

Abschlußbericht

**"Rechnerische Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen"**

im Auftrag des
Instituts für Bautechnik, Berlin
Az.: IV 1-5 513/87

November 1989

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 1: Grundsätze und Lastannahmen

November 1989

1 ÜBERBLICK

Der vorliegende Bericht wurde unter Federführung von Prof. Dr.-Ing. D. Hosser erstellt und in dem Arbeitskreis "Grundsätze und Lastannahmen" des NABau-Unterausschusses 02.34.19 abgestimmt. Dem Unterausschuß gehörten folgende weitere Mitarbeiter an: Dipl.-Ing. H. Hertel, Dr.-Ing. M. Kersken-Bradley, Dipl.-Ing. L. Krampf und Dr.-Ing. J. Wesche.

Für den Nachweis brandbeanspruchter Bauteile sind - wie für Nachweise bei Raumtemperatur - Lastannahmen erforderlich. Hierzu zählen einerseits die mechanischen Einwirkungen (Eigengewichtslasten und Verkehrslasten) und andererseits die thermischen Einwirkungen aus dem Brand.

Die Auslegungsgrundsätze und die Einwirkungen für die gemäß Eurocodes Nr. 2 bis 6 auf Brand nachzuweisenden Bauteile werden im Teil 20 "Actions on Structures exposed to Fire" des Eurocodes on Actions geregelt, auf den in Modellabschnitten der baustoffbezogenen Eurocodes Bezug genommen wird. Auf der Basis des Entwurfes Juni 1989 von Teil 20 [1] sowie des Entwurfes Mai 1989 der Modellabschnitte [2] werden im folgenden die wesentlichen Regelungen zusammengefaßt. Die Hintergründe der Regelungen werden anhand der Erläuterungen in der Documentation Note [3] diskutiert und es werden Unzulänglichkeiten und offene Fragen aufgezeigt.

2 GRUNDKONZEPT

Das Sicherheitkonzept für Nachweise von Tragwerken nach den Eurocodes ist in dem Eurocode Nr. 1 "Gemeinsame einheitliche Regeln für verschiedene Bauarten und Baustoffe" [4] dargestellt. Dort wird zwischen Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Grenzzuständen der Gebrauchsfähigkeit unterschieden. Der Brandfall wird als außergewöhnliche Situation betrachtet, bei

der besondere Grenzzustände der Tragfähigkeit (z. B. Versagen nach längerer Branddauer) maßgebend werden.

Tragfähigkeit und Gebrauchsfähigkeit werden mit der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte nachgewiesen, wobei die Teilsicherheitsbeiwerte grundsätzlich den jeweiligen Veränderlichkeiten und Unsicherheiten von Einflußgrößen direkt zugeordnet werden. In den Nachweis werden sogen. Bemessungswerte eingeführt, die sich in der Regel aus repräsentativen Werten und Teilsicherheitsbeiwerten, bei Kombinationen von Einwirkungen ggf. mit Kombinationsbeiwerten abgemindert, ergeben.

Die Bemessungswerte berücksichtigen:

- die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Überschreiten des betreffenden Grenzzustandes toleriert werden kann,
- die Veränderlichkeit und ggf. Modellunsicherheit der betrachteten Einflußgröße,
- die Bedeutung der Einflußgröße in dem betreffenden Grenzzustand.

Die pauschalen Hinweise zum Sicherheitsnachweis brandbeanspruchter Tragwerke im Eurocode Nr. 1 werden präzisiert in

- den Modellabschnitten zu den Teile 10 der Eurocodes Nr. 2 bis 6 [2],
- Teil 20 des Eurocodes Nr. 9 on Actions [1].

Dabei definieren die Modellabschnitte die generellen Grundsätze und Anwendungsregeln, nach denen das Verhalten von Tragwerken und ihrer Teile bezüglich geforderter Brandschutzfunktionen (z.B. Standsicherheit, Raumabschluß oder thermische Isolierung) unter vorgegebener Brandbeanspruchung (insbeson-

dere Normbrand nach ETK in Ausnahmefällen auch Naturbrand) nachgewiesen werden kann. Hierzu zählen auch Hinweise auf die generell anzunehmenden Einwirkungen.

Detaillierte Angaben zu den Nachweissituationen für den Brandfall, den thermischen Einwirkungen, den mechanischen Einwirkungen und den maßgebenden Einwirkungskombinationen finden sich hauptsächlich im Teil 20 des EC Actions. Die Bedingungen für die Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsbeiwerten werden in der zugehörigen Documentation Note [3] erläutert.

Kommentar:

Die für die praktischen Nachweise erforderlichen konzeptionellen Vorgaben und Lastannahmen werden in Teil 20 des EC Actions mehr oder weniger vollständig angesprochen.

Um die verschiedenen Elemente des Sicherheitskonzeptes für die außergewöhnliche Situation Brand, z.B. hinsichtlich der erforderlichen Zuverlässigkeit der Auslegung sowie der in Kombination mit Brand maßgebenden Lastverhältnisse der verschiedenen Tragwerke, bewerten zu können, sind vorab die Annahmen zur Auftretenshäufigkeit und Tolerierbarkeit von Schäden offenzulegen. Hierzu enthält die Documentation Note im Anhang 2 nur beispielhafte Hinweise. Generell ist es wichtig, daß

- *eine realistische tolerierbare Versagenswahrscheinlichkeit für den Regelfall der ETK-Brandbeanspruchung gewählt wird, die sich an die Versagenswahrscheinlichkeiten experimentell ermittelter Feuerwiderstandsdauern anlehnt,*
- *dafür Bemessungswerte der thermischen und mechanischen Einwirkungen und der Materialkennwerte ermittelt werden, die durch geeignet festzulegende Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte zu beschreiben sind,*
- *die mit diesen Festlegungen für repräsentative Bauteile erzielten Bemessungsergebnisse mit den Ergebnissen von Brandversuchen verglichen werden.*

In [3] wird versucht, den ersten beiden Forderungen gerecht zu werden, wobei jedoch durch "Ausprobieren" vieler Alternativen die Klarheit etwas leidet. Nach [5 - 7] darf die tolerierbare Versagenswahrscheinlichkeit umso größer sein, je unwahrscheinlicher die Bemessungssituation ist. Die Auftre-

tenswahrscheinlichkeit größerer Brände mit Auswirkungen auf Bauteile ist deutlich geringer als diejenige üblicher Bemessungssituationen ("Kaltbemessung"); daher ist eine größere Versagenswahrscheinlichkeit tolerierbar, was in geringeren Teilsicherheitsbeiwerten resultiert. Prinzipiell hängt die Auftretenswahrscheinlichkeiten größerer Brände von der Art und Nutzung der Gebäude ab und kann nur im Einzelfall ermittelt werden; ggf. kann ein Durchschnittswert für eine bestimmte Gebäudeklasse angenommen werden.

Sofern sich die tolerierbare Versagenswahrscheinlichkeit und das Gewicht der Einflußgrößen im betrachteten Grenzzustand für den Brandfall in etwa in der gleichen Größenordnung wie bei Grenzzuständen der Gebrauchsfähigkeit bewegen (wie in Anhang 2.2 von [3] unterstellt), können die dafür geltenden Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte (wie derzeit in [1] vorgesehen) den jeweiligen Teilen des EC Actions entnommen werden. Bei größeren Abweichungen sind ggf. Korrekturen erforderlich (vgl. [7, 8]).

3 SYSTEMANNAHMEN

Die Regelungen zur Annahme des für den Brandfall maßgebenden statischen Systems in [1, 2] sind knapp gefaßt. In [1] wird ausgesagt, daß beim Nachweis von Gesamt- oder Teilsystemen die thermische Ausdehnung im Bereich des Brandraumes wegen ihrer Wirkung auf Nachbarbereiche berücksichtigt werden sollte, während sie bei Einzelbauteilen in der Regel durch konstruktive Maßnahmen beherrscht wird. In bezug auf die im Ausland derzeit nicht geregelten Brandwände ("fire walls") wird ein Nachweis unter Berücksichtigung von Zusatzbelastungen infolge eines brandbedingten Tragwerkseinsturzes als Option offengehalten.

Sinngemäß finden sich diese Aussagen auch in den Model Clauses [2] in bezug auf Nachweise der Tragfähigkeit; verallgemeinernd wird hier noch auf die möglichen negativen Folgen von Verformungen für trennende Bauteile hingewiesen.

Die Geometrie, einschließlich der Imperfektionen, soll entsprechend der Kaltbemessung festgelegt werden; bei Gesamttragwerksanalysen dürfen die Imperfektionen reduziert werden. Auch

die Systemrandbedingungen sollen im allgemeinen wie bei den Gebrauchslastfällen gewählt werden. Die Schnittgrößen aus äußeren Lasten können direkt der Kaltbemessung entnommen werden. Wenn nur ein Teil eines Gesamttragwerks brandbeansprucht wird, ist die Interaktion mit dem (kalten) Resttragwerk zu berücksichtigen.

Kommentar:

Die Festlegung der Systemrandbedingungen und der Belastung für Nachweise des Brandverhaltens im Einklang mit der Kaltbemessung erscheint auf den ersten Blick als einzig richtiger Weg. Tatsächlich ändern sich jedoch die Randbedingungen und Schnittgrößen von Teilsystemen oder Einzelbauteilen u. U. deutlich mit der Veränderung der Steifigkeitsverhältnisse beim Brand. Hinzu kommen die teils günstigen, teils ungünstigen Auswirkungen des Zwangs infolge thermischer Dehnungen. Die Interaktion zwischen verschiedenen Bauteilen, einschließlich der Wirkung von thermischen Dehnungen sollte daher generell berücksichtigt werden. Sofern erfahrungsgemäß keine ungünstigen Veränderungen der Randbedingungen und Schnittgrößen durch Brand zu befürchten sind, können diese entsprechend der Kaltbemessung angesetzt werden. Die Formulierungen in [2] sollten in dieser Beziehung vorsichtiger sein. Soll die Berechnung eines Einzelbauteils einen Brandversuch ersetzen, so ist das Gesamtmodell gemäß ISO 834 bzw. DIN 4102 incl. Randbedingungen und Belastung zugrunde zu legen.

Flankierend müssen in den einzelnen ECs zusätzliche Richtlinien und Beispiele für die Berücksichtigung von Theorie II. Ordnung-Effekten und realistischen Steifigkeitsverhältnissen im Brandfall gegeben werden (vgl. z.B. EC 2).

4 THERMISCHE EINWIRKUNGEN

Thermische Einwirkungen können durch Gastemperaturzeitverläufe $T(t)$ und/oder den zugehörigen Wärmeübergang $Q(t)$ auf ein Bauteil beschrieben werden. Im Regelfall wird die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK gemäß DIN 4102 Teil 2 bzw. ISO 834) für die (gleichförmig angenommene) Brandraumtemperatur zugrundegelegt.

Der Wärmeübergang auf ein Bauteil wird in Abhängigkeit eines resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha(T)$ ermittelt, wobei α mittels empirischer Beziehungen definiert wird.

Kommentar:

Die Bandbreite experimentell ermittelter Wärmeübergangskoeffizienten ist groß. Sie hängt unter anderem von der Art des Brandes (Normbrand mit Brennern, Naturbrand mit verschiedenen Brandgütern) und der Art und Anordnung der Bauteile ab. Zahlenwerte können derzeit nur für ausgewählte, möglichst repräsentative Bauteile bei ETK-Brand angegeben werden, an einer Verallgemeinerung der aus Versuchen nachgerechneten Daten, z. B. für Naturbrände, wird noch gearbeitet.

Als Alternative zur ETK darf ein (natürlicher) Temperaturzeitverlauf durch eine Wärmebilanzrechnung bestimmt werden. Dabei wird entweder eine aus einem Normbrand der Dauer t_f rückgerechnete äquivalente Nennbrandlast q_n oder eine im Einzelfall ermittelte Bemessungsbrandlast q_d angesetzt.

Kommentar:

Die thermischen Einwirkungen im Brandfall hängen grundsätzlich von den besonderen brandschutztechnischen Gegebenheiten in einem Raum bzw. Brandabschnitt eines Gebäude ab, insbesondere von der Brandlast, den Ventilationsverhältnissen sowie der Geometrie und den wärmetechnischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile. In Übereinstimmung mit der bisherigen Brandschutzpraxis wird die Temperaturerhöhung im Brandraum in den Eurocodes primär durch die Einheits-temperaturzeitkurve (ETK) beschrieben, die für viele Brände in Gebäuden üblicher Art und Nutzung repräsentativ ist. Alternativ darf aber auch die Temperaturerhöhung durch einen Normbrand mit äquivalenter Branddauer dargestellt werden, wobei als maßgebender Parameter eine Nennbrandlast eingeht. Diese wird in [1] aus der bauaufsichtlich geforderten Feuerwiderstandsdauer so ermittelt, daß sie für mittlere Ventilationsverhältnisse und Sicherheitsanforderungen gilt; bei Gebäuden mit günstiger Ventilation oder mit zusätzlichen Sicherheitsvorkehrungen in Form von Sprinkleranlagen oder Werkfeuerwehr können auf diesem Umweg die normalen bauaufsichtlichen Anforderungen in Anlehnung an das Konzept der DIN V 18 230 [9] modifiziert werden. Statt dessen darf auch eine Bemessungsbrandlast im Einzelfall in Abhängigkeit der Gebäudenutzung bestimmt werden, wofür im Anhang 3 zu [1] Anhaltswerte angegeben werden.

Die thermischen Einwirkungen wirken als Beanspruchung nur bei Bauteilen, die der thermischen Isolierung dienen. Bei tragenden Bauteilen beeinflussen sie in erster Linie die Tragfähigkeit, indem sie zu

einer Verringerung der Festigkeit und Steifigkeit der Werkstoffe führen; durch thermische Dehnungen kann bei statisch unbestimmten Bauteilen gleichzeitig Zwang entstehen.

5 MATERIALKENNWERTE

Für die Hochtemperatureigenschaften der Baustoffe werden in [2] Bemessungswerte definiert, die sich aus einem temperaturabhängigen charakteristischen Wert $X_k(T)$ dividiert durch einen Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,f}$ ergeben. Im Falle der mechanischen Kennwerte kann $X_k(T)$ als Produkt aus einem temperaturunabhängigen Kennwert X_k und einem temperaturabhängigen Modifikationsfaktor $k(T)$ dargestellt werden, z. B. bei Festigkeit oder E-Modul.

Der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,f}$ wird bei den thermischen Eigenschaften generell zu 1,0 angenommen; bei den thermo-mechanischen Eigenschaften hängt er von der Fraktile des charakteristischen Wertes ab und kann ggf. kleiner als 1,0 sein. Dazu wird in der Documentation Note [3] erläutert, welche Fraktilen bei der derzeitigen Versuchspraxis in bezug auf die Feuerwiderstandsdauern erreicht werden. Sofern diese einer 5 %-Fraktile entsprechen, kann $\gamma_{M,f} = 0,85$ gewählt werden.

Kommentar:

Nach dem probabilistischen Sicherheitskonzept [8] gelten beim Nachweis des Brandverhaltens von Bauteilen für die Materialkennwerte geringere Teilsicherheitsbeiwerte als bei der Kaltbemessung. Je nach Größe der tolerierbaren Versagenswahrscheinlichkeit können - insbesondere dann, wenn die Unsicherheiten der Temperatureinwirkung sehr stark die Unsicherheit der Materialkennwerte bestimmen - durchaus Teilsicherheitsbeiwerte ≤ 1 auftreten, so daß z.B. Nennfestigkeiten zu erhöhen wären. Die Abweichungen von eins sind bei tragenden Bauteilen jedoch in aller Regel so gering, daß im Sinne einer Vereinfachung direkt mit den charakteristischen Materialkennwerten gerechnet werden kann. Anders verhält es sich z. B. bei den thermischen Eigenschaften einer nachzuweisenden Isolierung. Diese können als dominierende Beanspruchbarkeitsparameter durchaus mit Teilsicherheitsbeiwerten über 1,0 belegt werden, insbesondere wenn Mittelwerte als charakteristische Werte festgelegt sind.

Die Erläuterungen zu $\gamma_{M,f}$ im Annex 1 zu [3] basieren darauf, daß der Teilsicherheitsbeiwert einer maßgebenden Materialeigenschaft so festzulegen ist, daß die derzeitige Prüfpraxis möglichst gut wiedergegeben wird. Diese an sich richtige Grundidee wird dadurch sehr unübersichtlich, daß zugleich mehrere Einflüsse zwischen Versuch und Berechnung auseinanderklaffen. Die tatsächlichen Festigkeiten im Versuch sind nämlich keine Fraktilen sondern deterministisch; sie stellen außerdem Kurzzeitfestigkeiten dar, während in der Rechnung üblicherweise Langzeitfestigkeiten verwendet werden (z. B. bei Beton). Schließlich wird im Versuch unter 1,0facher Gebrauchslast geprüft, während in der Rechnung Kombinationsregeln mit abgeminderten Verkehrslasten angesetzt werden sollen. Diese komplizierte Wechselwirkung ist im Rahmen der erforderlichen Vergleichsrechnungen unbedingt näher zu untersuchen, bevor endgültige Zahlenwerte festgelegt werden können (vgl. Abschnitt 8).

6 MECHANISCHE EINWIRKUNGEN

In den Model Clauses [2] wird hinsichtlich der mechanischen Einwirkungen, die bei der Tragwerksanalyse anzusetzen sind, auf den Eurocode on Actions verwiesen; darin regelt Teil 20 [1] die Bemessungswerte der Schnittgrößen für den brandschutztechnischen Nachweis.

Der Teil 20 fordert, daß alle Arten von Einwirkungen aus der normalen Nutzung (d. h. die Gebrauchslasten), sofern sie im Brandfall wahrscheinlich vorhanden sind, betrachtet werden müssen. Dabei soll eine brandbedingte Gewichtsabnahme brennbarer Stoffe nicht in Rechnung gestellt werden. Wind- und Schneelasten sollen mit ihren häufigen oder quasi-ständigen Werten (entsprechend den Teilen 6 bis 8) angesetzt werden. Die kurzzeitigen Anteile von Nutzlasten brauchen nur bei der Auslegung von Rettungswegen berücksichtigt zu werden. Lasten infolge industrieller Produktion dürfen im Brandfall vernachlässigt werden.

Neben den Gebrauchslasten sollen Zwangsschnittgrößen infolge thermischer Dehnungen als indirekte Einwirkungen betrachtet werden, außer wenn sie von vorneherein als günstig oder vernachlässigbar erkannt oder durch ungünstige Auflager- oder

Randbedingungen bzw. Sicherheitsanforderungen abgedeckt sind. Es werden Beispiele dieser indirekten Einwirkungen aufgezählt, wobei Eigenspannungen infolge unterschiedlicher Erwärmung der Querschnitte ausgenommen sind. Bemessungswerte der indirekten Einwirkungen werden mit den thermischen Kennwerten gemäß Abschnitt 5 ermittelt.

Kommentar:

Bei den mechanischen Einwirkungen sind nach Eurocode Nr. 1 [4] ständige Einwirkungen, veränderliche Einwirkungen und außergewöhnliche Einwirkungen zu unterscheiden. Die ständigen Einwirkungen (z. B. Eigengewichtslasten) sind auch im Brandfall voll anzusetzen. Die veränderlichen Einwirkungen setzen sich aus quasi-ständigen und kurzzeitigen Anteilen zusammen. Hier müssen die quasi-ständigen Anteile (z. B. Gewicht von Einrichtungen) voll, die kurzzeitigen Anteile jedoch nur zu einem geringen Teil berücksichtigt werden. Andere außergewöhnliche Einwirkungen sind zusammen mit der außergewöhnlichen Situation Brand nicht zu untersuchen.

Gleiches gilt für Einwirkungen, deren Auftreten im Brandfall aus anderen Gründen auszuschließen ist, z. B. Lasten aus Produktionsbetrieb, aber auch Schneelasten auf Dächern, sofern der Schnee brandbedingt schmilzt und das Schmelzwasser ungehindert abfließen kann.

7 KOMBINATIONSREGELN FÜR EINWIRKUNGEN

Auf der Grundlage des Sicherheitskonzeptes im EC 1 [4] werden Kombinationsregeln für die mechanischen Einwirkungen angegeben, die nach Abschnitt 6 gleichzeitig mit dem Brand auftreten können. Hierbei wird zwischen einer generellen Regelung und einer vereinfachten Kombinationsregel für Nachweise von Einzelbauteilen unterschieden.

Nach der generellen Regelung sind die Einwirkungen wie folgt anzusetzen:

- die ständigen Einwirkungen mit ihrem vollen charakteristischen Wert (i.a. Mittelwert): $1,0 \cdot G_k$

- die dominierende veränderliche Einwirkung (Leiteinwirkung) mit ihrem häufigen Wert: $\psi_1 \cdot Q_{k,1}$
- die weiteren veränderlichen Einwirkungen (Begleiteinwirkungen) mit ihren quasi-ständigen Werten: $\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
- die indirekten Einwirkungen aus Zwang mit ihren, vom Temperaturzeitverlauf abhängigen Bemessungswerten $1,0 \cdot A_{d,ind}$.

Die Kombinationsbeiwerte ψ_1 und $\psi_{2,i}$ sollen den Teilen 6 bis 8 des EC Actions für die jeweiligen mechanischen Einwirkungen entnommen werden.

Anstelle einer Ermittlung im Einzelfall nach dieser generellen Kombinationsregel darf die resultierende Einwirkung für den Brandfall vereinfachend aus dem Bemessungswert der resultierenden Einwirkung der Kaltbemessung durch Umrechnung mit einem Faktor bestimmt werden. Aufgrund eines Vergleichs der jeweiligen Kombinationsregeln ergibt sich für diesen Faktor bei typischen Verhältnissen von ständigen und veränderlichen Einwirkungen ($G_k/Q_k = 1$) etwa 0,7.

Kommentar:

Nach den Erläuterungen zu Abschnitt 6 sind gleichzeitig mit dem Brand nur diejenigen Einwirkungen maßgebend, die mehr oder weniger ständig (quasi-ständig) vorhanden sind. Bei fluktuierenden Einwirkungen wie Nutzlasten oder klimatischen Lasten sind nur die Momentanwerte anzusetzen, anstelle der bei üblichen Bemessungssituationen zu verwendenden Extremwerte. Dies kann nach [4] durch Kombinationsbeiwerte $\psi < 1$ berücksichtigt werden. Demzufolge sind bei der außergewöhnlichen Situation Brand größere Abminderungen der mechanischen Einwirkungen gegenüber den Gebrauchslasten der Kaltbemessung möglich, die so in der bisherigen Brandprüfpraxis nicht vorgenommen werden.

Einzelheiten zur Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten und Kombinationsbeiwerten für die mechanischen Einwirkungen werden in der Documentation Note [3] diskutiert. Hier wird zunächst die bisherige Prüfpraxis bewertet, nach der bei uns die 1,0fache zulässige Gebrauchslast angesetzt wird; dabei werden im allgemeinen nur Hauptlasten, nicht "Zusatzlasten" wie Wind betrachtet. Zum Vergleich

werden die Zahlenwerte ψ_1 und ψ_2 für außergewöhnliche Situationen nach Teil 6 bis 8 des EC Actions angegeben, die für die Leiteinwirkung zwischen 0,5 und 1,0, für die Begleiteinwirkung zwischen 0 und 1,0 liegen. Hieraus resultieren in Abhängigkeit von dem Verkehrslastanteil der Gebrauchslast globale Sicherheitsbeiwerte für den Brandfall zwischen 0,5 und 1,0. Als dritte Variante werden die Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte in Anhang 2.3 zu [3] probabilistisch hergeleitet, woraus sich eine etwa 12 %ige Erhöhung gegenüber der Unfallkombination gemäß Teil 6 bis 8 des EC Actions ergibt. Auf eine solche Anhebung der Teilsicherheitsbeiwerte kann dann verzichtet werden, wenn die Randbedingungen für den brandschutztechnischen Nachweis in Anlehnung an die Kaltbemessung konservativ gewählt sind.

8 OFFENE FRAGEN

Aufgrund des Fehlens von systematischen Vergleichen zwischen Rechenergebnissen und Brandversuchen ist bisher nicht erkennbar, inwieweit die rechnerischen Nachweise an Erfahrungen aus der Brandprüfpraxis anknüpfen. Daher wird die Auswahl repräsentativer Tragwerke oder Bauteile aus den unterschiedlichen Baustoffen und die Durchführung systematischer Vergleichsrechnungen empfohlen (vgl. Teil 8). Hierbei sind "Nullrechnungen" mit den gemessenen Parametern aus Brandversuchen notwendig, um die Güte der Rechenmodelle zu belegen.

Bei generellen oder partiellen Abweichungen vom derzeitigen experimentellen Sicherheitsniveau ist zunächst den möglichen physikalischen oder konzeptionellen Ursachen nachzuspüren, bevor ggf. an Korrekturschrauben gedreht wird. Erfahrungsgemäß passen solche Korrekturen für einige Anwendungsfälle und versagen bei anderen.

Eine für die baurechtliche Akzeptanz der rechnerischen Nachweise wichtige Frage wird sein, wie das bisherige Prüfen von Bauteilen unter 1,0facher Gebrauchslast im Rahmen der neuen Lastkombinationsregeln zu interpretieren ist. Einen gewissen Interpretationsspielraum bietet hierbei das Verhältnis von ständigen zu veränderlichen Einwirkungen. Möglicherweise kann gezeigt werden, daß die im probabilistischen Konzept vorgesehene Abminderung der mechanischen Einwirkungen kompensiert wird durch die auf Nennwerte abgeminderten Materialkennwerte.

Zur Zeit kann jedenfalls noch nicht abschließend beurteilt werden, welche der in der Documentation Note untersuchten alternativen Festlegungen der Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte die Erfahrungen am besten beschreiben.

9 LITERATURHINWEISE

- [1] Coordination Group for Eurocodes: Part 20 of the EC Actions - Actions on Structures exposed to Fire. EC/CG-fire-88/6rev6, June 1989
- [2] Coordination Group for Eurocodes: Eurocodes Part 10 - Structural Fire Design, Model Clauses for EC 2-6. EC CG-fire-88/5rev3, May 1989
- [3] Coordination Group for Eurocodes: Documentation Note on Partial Safety Factors in Structural Fire Design. EC/C6-fire-89/7, June 1989
- [4] Eurocode Nr. 1 - Gemeinsame Einheitliche Regeln für verschiedene Bauarten und Baustoffe. Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel, Luxemburg, 1984
- [5] NABau im DIN: Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven baulichen Brandschutz. In: Baulicher Brandschutz im Industriebau, Beuth-Verlag, Berlin-Köln, 1979
- [6] Bub, H., Hosser, D., Kersken-Bradley, M., Schneider, U.: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1983
- [7] A Conceptual Approach Towards a Probability Based Design. Guide for Structural Fire Safety. CIB W14 Workshop Report, Fire Safety Journal, Vol. 6 No. 1, 1983, Elsevier Sequoia, S.A.
- [8] Hosser, D. und Schneider, U.: Sicherheitskonzept für brandschutztechnische Nachweise von Stahlbetonbauteilen nach der Wärmebilanztheorie. Forschungsbericht im Auftrag des Instituts für Bautechnik, November 1980
- [9] DIN V 18 230 - Baulicher Brandschutz im Industriebau; Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Vornorm, Ausgabe September 1987

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 2: Betonbauwerke

November 1989

1 ÜBERBLICK

Der vorliegende Statusbericht wurde unter Federführung von Dr.-Ing. Richter erstellt und in dem Arbeitskreis "Betonbauwerke" des NABau-Unterausschusses 02.34.19 abgestimmt. Weitere Mitarbeiter des Arbeitskreises sind Dipl.-Ing. L. Krampf und Dr.-Ing. H. Seiler. Grundlage ist Eurocode 2 - Design of Concrete Structures, Part 10: Structural Fire Design, Draft: February, 1989. Um die im Zuge der weiteren Bearbeitung des EC vorgenommenen Veränderungen im Statusbericht zu berücksichtigen, muß eine entsprechende Aktualisierung vorgesehen werden.

Zielsetzung und Inhalt des Statusberichts ist:

- Prüfung der Angaben zu "Rechnerischen Nachweisen" im EC 2 Part 10,
- Angabe der möglichen Berechnungen und deren Ergebnisse,
- Angabe der nicht möglichen (fehlenden) Berechnungen sowie
- Angabe, für welche Bauteile Berechnungen möglich bzw. nicht möglich sind.

Im vorliegenden Statusbericht wird bei den Rechenverfahren unterschieden zwischen "exakten" Rechenverfahren und zwischen Näherungsverfahren. Als "exakte" Rechenverfahren werden dabei solche Rechenverfahren bezeichnet, die mit Hilfe von Computerprogrammen eine detaillierte Tragwerksanalyse bezüglich des Temperatur-, Trag- und/oder Verformungsverhaltens durchführen. Bei den Näherungsverfahren sind bestimmte Kenngrößen in Form von Tabellen und/oder Grafiken so weit aufbereitet, daß eine manuelle Berechnung des Tragverhaltens möglich ist.

Im folgenden wird der EC 2 Part 10 entsprechend der o.g. Zielsetzung durchgesehen. In jedem Kapitel des Statusberichts werden zunächst die Angaben des EC 2 Part 10 aufgeführt und daran anschließend wird eine Stellungnahme der deutschen Arbeitsgruppe gegeben. Die im Statusbericht in Klammern gegebenen Hinweise (Abschn. x.x.x) beziehen sich auf Abschnitte im EC.

2 GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGSBEREICH

Im EC 2 Part 10 werden zur Beurteilung durch Berechnung die folgenden Tragwerke genannt (Abschn. 2.5.1):

- Einzelbauteile und
- Tragwerksausschnitte, die jeweils unmittelbar brandbeansprucht werden sowie
- Gesamtragwerke, bei denen die Interaktion zwischen direkt beflamnten und "kalten" Bauwerksabschnitten berücksichtigt wird.

Die Tragwerke müssen dabei

- als Ortbeton- oder Fertigteilbauteile
- aus unbewehrtem Beton, Stahlbeton oder Spannbeton (mit innenliegenden Spanngliedern) sowie
- als Normalbeton mit quarzitischem oder kalkhaltigem Zuschlag hergestellt sein (Abschn. 1.2).

Kommentar:

"Exakte" Rechenverfahren (Rechenprogramme) für Stahlbeton- und unbewehrte Betonbauteile existieren für alle drei genannten Tragwerkstypen [1, 2, 3, 4], wobei aber bisher überwiegend - bei Tragwerksausschnitten und Gesamtragwerken ausschließlich - Bauteile aus Normalbeton mit quarzitischem Zuschlag berechnet wurden. Für Beton mit kalkhaltigen Zuschlägen dürfen vereinfachend und auf der sicheren Seite liegend die gleichen Rechengrundlagen wie bei Beton mit quarzitischem Zuschlag verwendet werden.

Für Spannbetonbauteile mit sofortiger Vorspannung und mit Vorspannung ohne Verbund existieren "exakte" Rechenverfahren für Einzelbauteile [5, 6], es fehlen Rechenverfahren für Tragwerksausschnitte und für Gesamtragwerke.

Als thermische Einwirkung wird grundsätzlich die Brandraumtemperatur-Zeitkurve nach ISO 834 vorausgesetzt (Abschn. 2.2.1 und 4.2.1).

Die mechanischen Einwirkungen (Belastungen) werden in Abstimmung mit dem EC für mechanische Einwirkung (Abschn. 2.2.2) festgelegt.

Kommentar:

Die Beschränkung der rechnerischen Nachweise auf die ISO 834-Brandbeanspruchung ist z.Z. sinnvoll, da es bisher - abgesehen von wenigen Pilotstudien - keine Beweise dafür gibt, daß die in rechnerischen Nachweisen eingesetzten Grundlagen auch bei anderen Brandeinwirkungen (wie z.B. Schwelbränden, Bränden mit ausgeprägter Abkühlphase oder entsprechend der Hydrocarbonbeanspruchung, usw.) zu befriedigender Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Rechenergebnis führen.

3 GENAUE RECHNERISCHE NACHWEISVERFAHREN

3.1 Berechnungsmodelle (Abschn. 2.5.2)

Im EC 2 Part 10 wird unterschieden zwischen:

- thermischer Analyse zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Querschnitt und in Richtung des Bauteils sowie
- mechanischer Analyse zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens.

3.2 Thermische Analyse (Abschn. 4.2)

Die Brandraumtemperatur-Zeitkurve wird im EC 2 Part 10 entsprechend ISO 834 festgelegt. Die zugehörigen Wärmeübergangsbedingungen werden nicht gesondert definiert, sondern sie sind entsprechend Teil 20 des EC Actions festzulegen.

Für die Berechnung der Temperaturverteilung im Querschnitt wird im EC 2 Part 10 die Fourier Gleichung angegeben. Für die Lösung der Gleichung wird auf die Anwendung von Rechenprogrammen auf der Grundlage der Methode der finiten Elemente oder des Differenzenverfahrens verwiesen.

Die in der Fourier Gleichung enthaltenen thermischen Baustoffeigenschaften spezifische Wärmekapazität, Dichte und Wärmeleitfähigkeit werden im Abschnitt 3.1 für Beton mit überwiegend quarz- oder kalkhaltigem Zuschlag und im Abschnitt 3.2 für Stahl aufgeführt.

Beim Beton wird die Dichte als temperaturunabhängiger Wert (2300 kg/m^3) berücksichtigt, während die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit in Form von temperaturabhängigen Diagrammen dargestellt werden. Zusätzlich zeigt ein Diagramm die Veränderung der Temperaturleitzahl a über der Temperatur. Im Diagramm der spezifischen Wärmekapazität und der Temperaturleitzahl wird jeweils der Einfluß des Wassergehaltes des Betons berücksichtigt.

Für den Stahl werden keine thermischen Baustoffeigenschaften im EC 2 Part 10 angegeben.

Kommentar:

Die Wärmeübergangsbedingungen vom Teil 20 des EC Actions müssen mit den in Deutschland verwendeten Rechenwerten für die Wärmeübergangszahl α ($23 - 25 \text{ W/m}^2\text{K}$) und das Emissionsverhältnis ε ($0,3 - 0,6$) verglichen werden.

Die thermischen Baustoffwerte von Beton im EC 2 Part 10 entsprechen in Näherung den in Deutschland verwendeten Rechenwerten, wobei aber in Deutschland bisher keine Rechenwerte für Beton mit überwiegend kalkhaltigem Zuschlag existieren. Zum Teil wird in Deutschland die Dichte als temperaturabhängiger Wert beschrieben. Den Einfluß, den die teilweise vereinfachte Festlegung der temperaturabhängigen Verläufe der thermischen Baustoffwerte im EC 2 Part 10 auf die Temperaturverteilung im Betonquerschnitt hat, muß durch einige Kontrollrechnungen und anschließenden Vergleich mit z.B. vorhandenen Tabellenwerten nachgewiesen werden.

In Deutschland werden zur Zeit überwiegend Finite Element-Programme zur Berechnung der Temperaturverteilung eingesetzt. Dabei wird in der Regel nur eine zweidimensionale Temperaturverteilung berücksichtigt, d.h. die Temperaturen im Querschnitt werden unter Vernachlässigung des Temperaturflusses in Bauteillängsrichtung berechnet [16, 18]. Der Einfluß des Wassergehaltes im Beton wird vereinfachend im Rechenansatz für die spezifische Wärmekapazität berücksichtigt.

3.3 Mechanische Analyse (Abschn. 4.2.2)

Für die mechanische Analyse werden für die Baustoffe Beton, Betonstahl und verschiedene Spannstahlsorten (kaltgezogenen und vergüteten Draht sowie Litzen) temperaturabhängige Spannungs-Dehnungs-Beziehungen sowie die temperaturabhängigen Verläufe der thermischen Dehnung graphisch dargestellt.

Kommentar:

Der Verlauf der dargestellten mechanischen Baustoffwerte sowie der thermischen Dehnungen entspricht weitestgehend den in Deutschland verwendeten Rechenwerten.

Inzwischen wurde von einer europäischen Arbeitsgruppe versucht, für die Eurocodes 2 bis 4, Teile 10, einheitliche temperaturabhängige mechanische Baustoffkennwerte so allgemeingültig festzulegen, daß eine Beschränkung der Anwendbarkeit auf bestimmte Rechenverfahren vermieden wird (vgl. Teil 7 dieses Berichtes). Die als Kompromißlösungen aus unterschiedlichen Vorschlägen gewählten Kennwertbeschreibungen weichen zum Teil von den bisher in Deutschland verwendeten Annahmen ab. Ein Nachweis der Gültigkeit ist noch im Rahmen der geplanten Vergleichsrechnungen (s. Teil 8 des Berichtes) zu erbringen.

Es existieren Rechenprogramme zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von flächenartigen Bauteilen (Platten, Scheiben) unter Brandbeanspruchung [13, 14, 15]. Diese Rechenprogramme benötigen andere Eingangsparameter (z.B. Baustoffgesetze) gegenüber Rechenprogrammen für einaxiale Beanspruchung. Darauf wird im EC 2 Part 10 nicht hingewiesen.

4 VEREINFACHTE NACHWEISVERFAHREN

4.1 Thermische Analyse

Im EC 2 Part 10 werden zur Zeit keine Näherungsverfahren zur Bestimmung der Temperaturverteilung im Querschnitt und in Richtung des Bauteils angeboten. Für die praktische Arbeit wird auf die Temperaturprofile in der C.E.B. - Veröffentlichung "Bulletin d'Information n° 145" [8] verwiesen; zur Veranschaulichung wird im EC 2 Part 10 für einen ausgesuchten Rechteckquerschnitt die Temperaturverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten in Form von Zahlenwerten und in Form von Isothermenverläufen dargestellt. Zusätzlich wird in einem Bild die Temperaturentwicklung in einem Platten- bzw. Wandquerschnitt (einseitige Brandbeanspruchung) für verschiedene Branddauern gezeigt.

Kommentar:

Näherungsverfahren in Form von Tabellen mit diskreten Temperaturwerten oder Graphiken mit Isothermenverläufen sind die z.Zt. geläufigen Hilfsmittel, um ohne Rechnung die Temperaturverteilung in Betonquerschnitten zu ermitteln. Naturgemäß bleibt die Anwendung dieser Näherungsverfahren aber auf die praxisüblichen Querschnittsformen beschränkt.

Erste Ansätze, die Temperaturen vereinfacht zu berechnen, werden in [9] vorgestellt. Dabei wird als einziger temperaturabhängiger Parameter die Wärmeleitfähigkeit eingeführt. Die Berechnung erfolgt weiterhin programmgesteuert. Vergleiche der so berechneten Temperaturen mit Versuchswerten und Werten aus "exakten" Berechnungen haben einen sehr eingeschränkten Anwendungsbereich dieses Näherungsverfahrens ergeben [10].

Eine ähnliche Bewertung ergab die Überprüfung und Anwendung des in [17] beschriebenen Näherungsverfahrens. Bei diesem Näherungsverfahren werden mit Hilfe von aufbereiteten Funktionen die Temperaturen für ausgesuchte Punkte im Betonquerschnitt manuell berechnet. Aufgrund dieses Ansatzes ist das Näherungsverfahren eingeschränkt geeignet, um z.B. die Temperaturen in der Bewehrung eines Stahlbeton- oder Spannbetonquerschnitts zu bestimmen.

Durch den Entwurf eines Näherungsverfahrens zur Berechnung der Temperaturverteilung in beliebig geformten Betonquerschnitten könnte der erste Schritt in Richtung auf die Entwicklung von praxisgerechten rechnerischen Bemessungsverfahren getan werden.

4.2 Mechanische Analyse

Für die mechanische Analyse werden im EC 2 Part 10 ein rechnerisches Näherungsverfahren aus [11] sowie Tabellen mit "heißen" Traglasten für Stützen, Wände, Zugglieder, Balken und Platten wiedergegeben.

4.2.1 Rechnerisches Näherungsverfahren

Mit dem rechnerischen Näherungsverfahren aus [11] wird die maximale "heiße" Tragfähigkeit für rechteckige und plattenbalkenförmige, schlaff bewehrte Querschnitte bestimmt, die durch Biegung bzw. Biegung mit Längskraft beansprucht werden. Ausgeschlossen sind vorgespannte Bauteile, sowie Stützen und Wände. Das Näherungsverfahren kann für statisch bestimmte Einfeldkonstruktionen und für statisch unbestimmte Durchlaufkonstruktionen angewendet werden. Es basiert auf der vereinfachenden Annahme, daß bei der Berechnung der Tragfähigkeit der Beton von über 500 °C vernachlässigt und der Beton mit niedrigeren Temperaturen als temperaturunbeeinflusst angesehen werden kann. Voraussetzung für die Anwendung des Näherungsverfahrens ist die Kenntnis der Temperaturverteilung im Querschnitt.

Kommentar:

Untersuchungen in [10, 12] haben gezeigt, daß das Näherungsverfahren im EC 2 Part 10 ausschließlich bei der Ermittlung der Querschnittsbiegetragfähigkeit brandbeanspruchter Tragwerke befriedigende Ergebnisse liefert. D.h. Balkentragwerke lassen sich unter Beachtung von Umlagerungen der Beanspruchungen mit ausreichender Genauigkeit berechnen. Für Bauteile wie Stützen, bei denen die Verformungen bzw. die verformungsbedingten Zusatzbeanspruchungen bedeutend werden, versagt das im EC 2 Part 10 beschriebene Näherungsverfahren.

4.2.2 Näherungsverfahren mit Hilfe von Tabellen

Die Tafeln und Tabellen im EC 2 Part 10 zur näherungsweise Bemessung von Stützen, Wänden, Zuggliedern, Balken und Platten sind jeweils in Abhängigkeit von der gewünschten Feuerwiderstandsdauer aufgebaut. Für Stützen werden "heißen" Traglasten für vorgegebene Knicklängen, Betongüten, Bewehrungsgehalt, Querschnittsabmessungen und Betondeckungswerten angegeben (Abschn. 4.3.2). Bei Zuggliedern, Balken und Platten wird jeweils die Beanspruchung mit dem Bemessungswert der Belastung für den Brandfall gemäß Teil 20 des EC Actions vorausgesetzt; dafür werden die erforderlichen Querschnittsabmessungen und Betondeckungswerte der Bewehrung angegeben. Die Betondeckungswerte gelten für Bewehrung mit der kritischen Temperatur von 500 °C; für abweichende kritische Temperaturen wird eine Korrekturgleichung angegeben (Abschn. 4.3.1).

Kommentar:

Die Tabellen für die näherungsweise Bemessung von Stützen, Wänden, Zuggliedern und Balken weichen grundsätzlich nicht von den entsprechenden Tabellen in DIN 4102 Teil 4 ab. Wegen ihrer größeren Parameterabhängigkeit erlauben die Stützen-Tabellen im EC 2 eine weitergehende Differenzierung bei der Bemessung als die Stützen-Tabellen in der DIN 4102.

Das Näherungsverfahren zur Bestimmung der vorhandenen Feuerwiderstandsdauer von überwiegend auf Biegung beanspruchten Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen im EC 2 Part 10 entspricht dem Verfahren von DIN 4102 Teil 4. Dieses Verfahren basiert auf der Methode der "kritischen" Stahltemperatur, d.h., es geht davon aus, daß die temperaturabhängige Festigkeitsreduzierung des Bewehrungsstahls bei einer bestimmten Temperatur und einer bestimmten Festigkeitsausnutzung zum Versagen des Bauteils führt. Damit wird die Berechnung der "heißen" Biegetragfähigkeit, d.h. der Biegetragfähigkeit nach einer bestimmten Brandeinwirkungszeit überflüssig. Die für die Anwendung des Bemessungsverfahrens erforderlichen Beziehungen zwischen kritischer Temperatur und temperaturabhängiger Festigkeitsreduzierung sind im EC 2 Part 10 im Abschnitt 3 und in DIN 4102 Teil 4 im Anhang B für verschiedene Betonstahl- und Spannstahlsorten graphisch dargestellt. Die im Augenblick des Versagens im Bauteil vorhandene Stahlspannung kann nach EC 2 näherungsweise derjenigen zu Beginn der Brandbeanspruchung gleichgesetzt werden. In [7] werden Rechenansätze für die Veränderung der Stahlspannung in Spannbetonbauteilen aufbereitet.

5 LITERATURHINWEISE

- [1] Quast, U.; Haß, R.; Rudolph, K.: STABA-F, Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984.
- [2] Klingsch, W.; Wittbecker, F.-W.: ENSA, ein Programmsystem zur physikalisch und geometrisch nichtlinearen Berechnung ebener Stabtragwerke. Bergische Universität Wuppertal, 1987.
- [3] Haksever, A.: Zur Frage des trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen im Brandfall. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 35, 1977.
- [4] Kiel, M.: TUSSE - Tunnel Structural Safety Investigation. Beitrag des Teilprojekts A2 im Arbeitsbericht 1984 - 1986 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, 1987.
- [5] Richter, E.: PRESE-F, Prestressed Structural Elements under Fire Action, Version 4 + 7. Veröffentlicht in:
1.) Richter, E.: Rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit von im Spannbett vorgespannten Spannbetonbalken unter Brandbeanspruchung gemäß DIN 4102. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1978 und
2.) Kordina, K.; Richter, E.: Rechnerische Untersuchungen über die Veränderungen im Tragverhalten brandbeanspruchter Spannbetonbindern infolge höherer zulässiger Spannstahlspannungen. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1983.
- [6] Dorn, T.: VOV-T, Berechnung des Brandverhaltens statisch bestimmt gelagerter, stabförmiger Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund. Veröffentlicht in: Kordina, K.;

- Richter, E. Dorn, T.: Untersuchung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989.
- [7] Richter, E.: Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spannbetonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 80, 1987.
- [8] CEB-FIP Model Code. Design of concrete Structures for Fire Resistance. Bulletin d'Information n° 145, Bureau de Paris, 1982.
- [9] CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment): Methode de prevision par le calcul du comportement au feu des structures en beton. Document Technique Unifie, Paris, April 1980.
- [10] Stiller, H.-J.: Untersuchungen zur Vereinfachung der Berechnung brandbeanspruchter Stahlbetonbauteile. Beitrag des Teilprojekts A3 im Arbeitsbericht 1984 - 1986 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, 1987.
- [11] Anderberg, Y.; Pettersson, O.; Thelanderson, S.; Wickström, U.: Fire Engineering Design of Concrete Structures. CEB-FIP Model Code. Design of Concrete Structures for Fire Resistance. Bulletin d'Information n° 145, Bureau de Paris, 1982.
- [12] Quast, U.: Berechnung brandbeanspruchter Tragwerke. Beitrag im Tagungsband zum Abschlußkolloquiums des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, März 1987.
- [13] Walter, R.: Finites Element Programm zur statischen Berechnung elastischer Scheiben. Mitteilung 78/9-1 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen" der Technischen Universität Braunschweig, 1978.

- [14] Wiese, J.: PLAFEU, Platten im Feuer. Veröffentlicht in: Wiese, J.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter partieller Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 84, 1988.
- [15] Kiel, M.: FIPSE, Finites Platten-Scheiben Element. Veröffentlicht in: Kiel, M.: Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbetonflächentragwerke unter Einschluss von Brandbeanspruchung. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 81, 1988.
- [16] Wickström, U.: TASEF-2, A Computer Program for Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire. Lund Institute of Technology, Report 79-2, Lund, Schweden, 1979.
- [17] Wickström, U.: A very simple Methode for estimating Temperatures in Fire exposed Concrete Structures. Swedish National Testing Institute, Fire Technology, Technical Report, SP-RAPP 46, 1986.
- [18] Becker, J.; Bizri, H.; Bresler, B.: FIRES-T, A Computer Program for the Fire Response of Structures - Thermal. Report No. UCB FRG 74-1, Fire Research Group, Department of Civil Engineering, University of California, Berkley, 1974.

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 3: Stahlbauwerke

November 1989

1 ÜBERBLICK

Der vorliegende Statusbericht wurde von Dipl.-Ing. T. Dorn auf der Grundlage eines Entwurfes von Dr.-Ing. H.-M. Bock erstellt und im Arbeitskreis "Stahlbauwerke" des NABau-Unterausschusses 02.34.19 abgestimmt; dem Arbeitskreis gehörte als weiterer Mitarbeiter Dr.-Ing. Witte an.

Ausgangspunkt der Darstellung ist der Teil x des Eurocodes Nr. 3 - Stahlbauwerke [1]. Dieser besteht aus fünf Abschnitten, deren wesentlicher Inhalt im folgenden stichwortartig zusammengefaßt und bewertet wird. In Kommentaren werden ungeklärte Punkte angesprochen und Vorschläge für ein weiteres Vorgehen gemacht.

Abschließend wird auch noch der derzeitige Beratungsstand in ISO/TC 92/SC 2/WG 2 bezüglich rechnerischer Nachweise des Brandverhaltens diskutiert.

2 GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGSBEREICH

In Abschnitt 1 von EC 3 Teil x [1] werden als Grundlage für Rechenverfahren Brandprüfungen unter Normbrandbeanspruchung genannt. Berechnungen sollen auf die Auslegung für bestimmte Feuerwiderstandsdauern abzielen.

EC 3 ist anwendbar für Stahlträger, -stützen und daraus hergestellte Konstruktionen. Die Berechnungsannahmen gelten für warmgewalzte und geschweißte Profile. Es wird zwischen der Brandbeanspruchung von Außen- und Innenbauteilen eines Gebäudes unterschieden.

Kommentar:

Im Gegensatz zu ausländischen Ansätzen [17-19] haben Untersuchungen in Deutschland [20] gezeigt, daß außenliegende (d. h. vor der Fassade eines Gebäudes) angeordnete Tragwerkselemente im

Brandfall vielfach mit der gleichen Intensität thermisch beansprucht werden wie innerhalb des Gebäudes befindliche Bauteile. Abminderungen sollten daher nur in begründeten Einzelfällen erfolgen.

Die Konstruktion muß so bemessen werden, daß sie die Belastung während einer Brandbeanspruchung "genügend" lange trägt. Hinsichtlich der Einwirkungen (thermisch und mechanisch) wird auf den EC Actions Part 20 verwiesen.

Kommentar:

Die Art der Brandbeanspruchung sollte hier festgelegt werden und zwar in Abhängigkeit der zu berechnenden Struktur. Sofern es sich um den Nachweis von Einzelbauteilen handelt und die Berechnung somit eine Brandprüfung ersetzt, muß die ETK (gemäß DIN 4102 Teil 2 bzw. ISO 834) zugrunde gelegt werden. Für die Berechnung von komplexeren Strukturen muß festgelegt werden, ob die ETK oder ein natürlicher Brand einwirkt und ob nur Teile oder das Gesamtsystem (z. B. Rahmentragwerke) thermisch beansprucht werden. Unter Umständen ist eine teilweise thermische Einwirkung wegen auftretender Zwängungen gefährlicher für die Konstruktion und damit maßgebend für die Bemessung als eine vollständige Temperaturbeaufschlagung.

3 THERMOMECHANISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN

Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungs-Linien für Stahl werden fest vorgegeben (als Wertepaare und als mathematische Funktion), ebenso Werte für den Wärmeausdehnungskoeffizient, die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit und die Dichte. Zum Bekleidungsmaterial wird nur auf die Prüfungsvorschriften der CEN zur Bestimmung der Materialeigenschaften hingewiesen.

Kommentar:

Bei den temperaturabhängigen σ - ϵ -Linien sollte man sich auf deutsche Untersuchungsergebnisse beziehen. Zwei Forschergruppen (Ruge/Winkelmann/Hoffend (SFB 148)) und (Rubert/Schaumann) haben auf der Basis umfangreicher experimenteller und rechnerischer Untersuchungen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen entwickelt, die sehr gut übereinstimmen, jedoch von den im EC 3 vorgeschlagenen abweichen. Eine Vorgabe der mathematischen Funktion der temperaturabhängigen σ - ϵ -Beziehungen stellt eine zu große Einschränkung dar, da dies einen starken Eingriff in den Rechenal-

gorithmus der eingesetzten Computerprogramme zur Folge hat. Es wird vorgeschlagen, die Spannungs-Dehnungs-Linien als Folge von Wertepaaren vorzugeben und die Approximation dem Anwender freizustellen. Bei der Bewertung der Rechenergebnisse muß jedoch die gewählte Approximation berücksichtigt werden.

Für den temperaturabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit von Baustahl liegen in Deutschland andere Werte vor, so daß es zu leichten Unterschieden kommt - siehe Tabelle.

Tabelle: Gegenüberstellung von Angaben aus der EC 3 und aus deutschen Vorschriften (Beispiele)

	EC 3	D
α_t (500 °C)	0.000014	0.000015 (SFB 148)
c_a (500 °C)	665 J/kg °C	750 J/kg °C (BAM)
λ_a (500 °C)	37.4 W/m K	40 W/m K (BAM)

Für die Feuerwiderstandsfähigkeit von Stahlkonstruktionen ist das Brandverhalten des Bekleidungs-materials von entscheidender Bedeutung. Zur rechnerischen Erfassung des Wärmeisola-tionsverhaltens der Brandschutzbekleidung werden deren thermodynamische Materialkennwerte benötigt, über die jedoch im Appendix zum EC 3 bis auf einen Hinweis auf entsprechende CEN-Nor-men keine Angaben gemacht werden.

Ein Hauptanwendungsfall rechnerischer Brandschutznachweise für Stahlbauteile wird sein, Ergeb-nisse aus Normbrandversuchen an bekleideten Stahlstützen und -trägern auf andere Lastausnut-zungsgrade, statische Randbedingungen, andere U/A-Werte zu extrapolieren und damit die erforder-liche Anzahl von Brandprüfungen auf ein Minimum zu senken. Um zu vermeiden, daß es auf diese Weise zwischen Versuch und Rechnung zu Widersprüchen kommt, wird vorgeschlagen, nur die spez. Wärmekapazität der Bekleidung mit Hilfe der einschlägigen kalorimetrischen Verfahren zu ermitteln. Die viel wichtigere Einflußgröße, die Wärmeleitfähigkeit der Bekleidung, sollte jedoch direkt aus Normbrandversuchen nach DIN 4102 Teil 2 in Verbindung mit Stahlbauteilen abgeleitet werden. Dabei ist es erforderlich, je Bekleidungsart mindestens zwei Brandprüfungen an Stahlstützen und zur Über-tragung auf dreiseitig beflamnte Bauteile zusätzlich mindestens eine Prüfung an einem Stahlträger-paar durchzuführen.

Dies hat folgende Gründe: Die Wärmeleitfähigkeit λ_j ist nicht nur temperaturabhängig, sondern sie ist u. U. auch geprägt durch eine zunehmende Gefügeänderung bzw. -zerstörung, z. B. durch Mikrorisse oder durch aufspringende Spalte. Es handelt sich somit nicht im eigentlichen Sinne um die Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht, sondern um einen Kennwert für den Wärmetransport, der auch alle übrigen für die Erwärmung des Bauteiles wichtigen Einflußgrößen einschließt, wie die Art und Weise der Herstellung, Bildung offener Fugen, die Größe bzw. die Änderung des Wassergehaltes, die Wärmeübergangswiderstände zwischen Brandraum und Probekörper sowie die thermischen Verhältnisse des Prüfstandes. Auf diese Weise braucht auch der Feuchtigkeitsgehalt eines Bekleidungsmaterials nicht extra berücksichtigt zu werden, da er bereits in dem integralen λ_j -Wert enthalten ist.

Dazu ist die im Appendix Kap. 5.2.2.2 angegebene Formel so umzuformen, daß sich die Wärmeleitfähigkeit λ_j direkt aus Versuchsergebnissen ermitteln läßt.

Bei unbedeckten Stahlbauteilen sollten die benötigten Kennwerte, d. h. die Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung und Konvektion ebenfalls zu einem Kennwert zusammengefaßt aus Normbrandversuchen nach DIN 4102 Teil 2 abgeleitet werden.

4 BEMESSUNGSVERFAHREN

4.1 Übersicht

Einleitend werden verschiedene Arten von Nachweisverfahren auf drei Sicherheitsstufen aufgezählt (vgl. Teil 2).

Kommentar:

Es müssen Versagenskriterien definiert werden: entweder als kritische Stahltemperatur oder als Tragkraftverlust bzw. kritische Verformungsgeschwindigkeit.

4.2 Vereinfachte rechnerische Nachweisverfahren

Das vereinfachte Nachweisverfahren geht von der kritischen Stahltemperatur aus, wobei konstante Temperaturen im Bauteil vorausgesetzt werden. Die Interaktion zwischen Einzelbauteil und Gesamtsystem wird ansatzweise berücksichtigt, wobei das

räumliche Tragverhalten getrennt für jede Systemebene untersucht werden muß. Es wird zwischen bekleideten und unbekleideten Bauteilen unterschieden, für die in Abhängigkeit von dem Lastausnutzungsgrad und von dem Grad der statischen Unbestimmtheit bei Biegeträgern bzw. von der zentrischen oder exzentrischen Lasteinleitung bei Stützen der Brandschutz-nachweis durchgeführt wird. Dabei sollen durch Anpassung der kritischen Temperatur mit einem Korrekturbeiwert κ aus Brandprüfungen bekannte Einflüsse auf den Brandwiderstand des Bauteils erfaßt werden.

Kommentar:

Die Einbeziehung eines Korrekturbeiwertes in die Bestimmung der kritischen Temperatur ist als Vereinbarung ohne wissenschaftliche Begründung [21] anzusehen. Sie hat erheblichen Einfluß auf das Sicherheitsniveau und ist aus der Sicht der Arbeitsgruppe zu grob.

Es ist bekannt, daß die kritische Stahltemperatur abhängig ist von der Temperaturverteilung im Querschnitt, dem Lastausnutzungsgrad, den statischen Lagerungsbedingungen, den geometrischen und stofflichen Imperfektionen und der Stahlgüte. Man sollte diese Abhängigkeiten bei der Brandschutzbemessung auch soweit wie möglich ausnutzen.

Es werden nun nacheinander vereinfachte Verfahren zur Bestimmung des Temperaturzuwachses in einem bestimmten Zeitintervall für unbekleidete und mit trockener (Platten) bzw. feuchter (Putze) Brandschutzbekleidung versehene Stahlbauteile angegeben. Diese Angaben basieren im wesentlichen auf den von der ECCS in [3] angegebenen Berechnungsverfahren.

Kommentar:

Ziel der vereinfachten Berechnungsmethode ist es, die Stahltemperaturzeitkurve $T_S(t)$ in Abhängigkeit der vorhandenen Bekleidung für Stahlprofile zu ermitteln, die verschiedene Profillfaktoren aufweisen, oder mit unterschiedlichen Bekleidungs-dicken versehen sind. In [4] werden die derzeit bekannten Verfahren mit Ergebnissen aus Brandprüfungen der BAM an bekleideten Stahlstützen überprüft und miteinander verglichen. Bei allen Verfahren werden die integralen thermischen Eigenschaften einer vorgegebenen Bekleidungs-konstruktion durch Rückrechnung aus den Ergebnissen von Normbrandversuchen bestimmt. Die Rechenverfahren von Witteveen, Rudolphi, Knublauch und Bruls (WRKB-Methode) [10, 11, 12], die französische Methode [8], die Nordtest-Methode [9] sowie das ECCS-Verfahren [3] gehen alle von der eindimensionalen Darstellung der Wärmeleitungsgleichung aus, verein-

fachen jedoch die zugrundeliegende Differentialgleichung in unterschiedlicher Weise. Die ECCS-Methode [3] und das Verfahren von Bruls [12] stellen eine weitergehende Vereinfachung dar, da sie die spezifische Wärmekapazität der Bekleidung nicht benötigen. Die Untersuchung [4] zeigte, daß die beste Übereinstimmung zwischen dem Versuchsergebnis aus einem Normbrandversuch und der numerischen Ermittlung der Zeitdauer bis zum Erreichen der kritischen Stahltemperatur mit denjenigen Methoden erzielt wird, die die wärmeschutztechnischen Eigenschaften der Bekleidung (also insbesondere die Wärmekapazität) berücksichtigen (französische [8] und Nordtest-Methode [9]). Im übrigen zeigte sich die WRKB-Methode [10, 11, 12] den Verfahren nach ECCS [3] überlegen. Die physikalisch exakteren Verfahren bringen also eine bessere Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung als noch weitergehend vereinfachte Verfahren.

Die Übertragung von vier- auf dreiseitig beflammete Bauteile ist i. a. noch nicht zufriedenstellend. Offensichtlich müssen u. a. noch die Wärmeableitung über die beim Brandversuch aufliegende Trägerabdeckung sowie die unterschiedlichen thermischen Verhältnisse der Prüfstände berücksichtigt werden.

4.3 Genaue rechnerische Nachweisverfahren

Bei den genauen Nachweisverfahren werden keine detaillierten Angaben zur Berechnungsmethode selbst gemacht. Man beschränkt sich vielmehr auf die Berechnungsgrundlagen und Voraussetzungen, die zur sinnvollen Anwendung von "advanced calculation methods" erforderlich sind. Es wird von zwei analytischen Modellen gesprochen: dem "thermal sub-model" und dem "structural sub-model".

Das "thermal sub-model" dient zur Berechnung der Temperaturfelder im Bauteil: Auch bei den verfeinerten Verfahren ist es möglich, die Berechnung der Querschnittstemperaturen auf der Grundlage von λ_1 -Werten durchzuführen, die aus Normbrandversuchen an Bekleidungen in Verbindung mit Stahlbauteilen ermittelt wurden. Bei einer anderen Vorgehensweise müssen besondere Überlegungen angestellt werden, wie die Veränderungen der Bekleidung während der Brandbeanspruchung erfaßt werden können.

Kommentar:

Auch für "genaue" Rechenverfahren ist es erforderlich, die integralen Wärmetransportkoeffizienten der Bekleidung als Eingangswerte für die Berechnung bereitzustellen. Die genaue Erfassung der wärmeisolierenden Eigenschaften eines Bekleidungsmaterials stellt kein Problem dar, wenn die temperaturabhängige Veränderung der Stoffwerte λ , ζ und C_p bekannt ist. Für die meisten auf dem Markt befindlichen Bekleidungen sind diese Werte jedoch nicht oder nur in relativ geringen Temperaturbereichen bekannt.

Das "structural sub-model" dient zur Traglastuntersuchung am Gesamtsystem, bzw. am ganzen Bauteil um z. B. Verformungen während einer Brandbeanspruchung zu bestimmen. Hier können berücksichtigt werden:

- Temperaturgradienten im Querschnitt,
- Theorie II. Ordnung bei Normalkraftbeanspruchung,
- tatsächliche Einbausituation = Lagerungsbedingungen des Bauteils,
- teilweise Längsdehnungsbehinderung.

Kommentar:

In Deutschland stehen Rechenprogramme [6,7,14,15,16] zur Verfügung, welche die o. g. Einflüsse exakt erfassen .

Die Gültigkeit der genauen Rechenverfahren muß noch nachgewiesen werden. Prinzipielle Möglichkeiten dazu sind einmal der Vergleich von Rechen- mit Versuchsergebnissen und zum anderen vergleichende Parameterstudien.

Kommentar:

Es wird vorgeschlagen, sogenannte "calibrating systems" festzulegen, an denen der Nachweis einer korrekten Berechnung erbracht werden kann. Im Rahmen der deutschen DIN 4102 Teil 19-Gruppe laufen z. Zt. derartige Vergleichsrechnungen, um die in Deutschland existierenden Programme an neutralen Beispielen zu vergleichen.

5 VERGLEICH MIT ISO-EMPFEHLUNGEN ZUM RECHNERISCHEN NACHWEIS DER FEUERWIDERSTANDSDAUER VON BAUTEILEN

In dem ISO-Bericht /13/ wird davon ausgegangen, daß bei Anwendern und Behörden Berechnungsverfahren am ehesten dann akzeptiert werden, wenn sie die Daten aus Standardbrandprüfungen erweitern und sich auf die im Prüfverfahren vorgeschriebenen Randbedingungen, Anforderungen und Versagenskriterien beziehen. Für die Entwicklung rechnerischer Nachweisverfahren werden nur prinzipielle Empfehlungen gegeben, die im wesentlichen in drei Punkten zusammengefaßt werden können:

- Es soll überprüft werden, welche typischen Bauteile für eine Bestimmung des Brandverhaltens und der Feuerwiderstandsdauer mit rechnerischen Verfahren geeignet sind.
- Die Verfahren sollen die Nutzungsmöglichkeiten der in Brandprüfungen ermittelten Daten erweitern, d. h. eine Beurteilung von Veränderungen der Bauweise, der Belastung und der Brandbeanspruchung soll ermöglicht werden.
- Die Berechnungsergebnisse sollen dem Sicherheitsniveau einer Brandprüfung an einem repräsentativen Bauteil entsprechen.

Zur Anwendbarkeit rechnerischer Verfahren bestehen Einschränkungen, wenn zusätzliche Anforderungen wie Gasdichtigkeit und Raumabschluß an das Bauteil gestellt werden. Gegen die ausschließlich rechnerische Beurteilung von Bauteilen, die nur tragende Funktionen zu erfüllen haben - Träger und Stützen - bestehen andererseits keine Bedenken.

Auf die Gewährleistung der Übereinstimmung zwischen rechnerischer und experimenteller Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer wird hingewiesen. Insbesondere für Stahlbauteile, bei denen die berechnete Feuerwiderstandsdauer aufgrund des Ansatzes von Festigkeitsmindestwerten und der Nichtberücksichtigung von

Temperaturgradienten im Querschnitt und in Bauteillängsachse zur Unterschätzung des Brandwiderstands führen kann, werden Verfahren zur Erlangung dieser Übereinstimmung angegeben. Für Bauteile aus Stahl wird in diesem Zusammenhang beispielhaft auf das ECCS-Verfahren [3] verwiesen, das mit einem Korrekturbeiwert zur Berücksichtigung von Temperaturunterschieden in Längsrichtung des Bauteils arbeitet.

Kommentar:

Das ISO-Dokument [13] ist eine Ausarbeitung mit der Absicht, allgemeine Grundsätze zu formulieren, die bei der Entwicklung von rechnerischen Verfahren zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen zu beachten sind. Für den Bereich der Stahlbauteile besteht von unserer Seite aus Übereinstimmung in folgenden Punkten:

- *Rechnerische Nachweise sollen den Aussageumfang von Brandprüfungen wesentlich erweitern und die Anzahl der erforderlichen Prüfungen auf ein Mindestmaß reduzieren.*
- *Die Anwendbarkeit der Rechenverfahren bleibt auf Stützen und Träger sowie andere Bauteile beschränkt, an die keine raumabschließenden Anforderungen gestellt werden.*

Die Vorschläge zur Festlegung von Eingangsgrößen zur Berechnung des Bauteilwiderstands bzw. der Ansatz von Korrekturbeiwerten zur Angleichung der Rechen- an Brandprüfungsergebnisse stehen nicht im Einklang mit dem z. Zt. in der Bundesrepublik Deutschland eingeführten Sicherheitsniveau.

6 LITERATURHINWEISE

- [1] Law, M., Kruppa, J., Twilt, L.: Eurocode 3 Part x - Structural Fire Design for Steel Structures. 4th Draft, January 1989
- [2] SIA-Schweizerische Ingenieur- und Architekten-Verein: "Feuerwiderstand von Bauteilen aus Stahl - Rechnerisches Verfahren zur Klassierung". Zürich, 1985

- [3] ECCS-Technical Committee 3: "European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures - Calculation of the Fire Resistance of Load Bearing Elements and Structural Assemblies Exposed to the Standard Fire". Amsterdam, 1983
- [4] Bock, H.-M.; Schickert, G.: "Vergleichende Betrachtungen zur numerischen Ermittlung der kritischen Temperatur bekleideter Stahlbauteile unter Brandbeanspruchung". Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) 17 (1987) Nr. 2
- [5] Haß, R.: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton. Heft 69 der Veröffentlichungsreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986
- [6] Quast, U.; Haß, R.; Rudolph, K.: STABA-F, Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984
- [7] Schaumann, P.: Zur Berechnung stählerner Bauteile und Rahmentragwerke unter Brandbeanspruchung. Mitteilung Nr. 84-4 des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, 1984
- [8] Kruppa, J.: Methode française de caractérisation des produits de protection incendi appliqués sur l'acier. Doc. Nr. 087/86, Vortrag auf dem EGOLF-Symposium in Brüssel, 24./25. Nov. 1986, 17 S.
- [9] Insulation of Steel Structures: Fire Protection, Nord-test Method, NT Fire 021, 1985
- [10] Witteveen, J.: Brandveiligheid Staalconstructies. Rotterdam: Centrum Bouwen in Staal, 1966

- [11] Rudolphi, R.; Knublauch, E.: "Ein Verfahren zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbauteilen". Fortschritt-Bericht VDI-Z, Reihe 5, Nr. 10 (1970), S. 41 - 90
- [12] Franssen, J.-M.; Bruls, A.: Resistance au Feu des Profiles en Acier Isolés-Determination de les Conductivité thermique apparente. Vortrag auf dem EGOLF-Symposium in Brüssel, 24./25. Nov. 1986, 17 S.
- [13] ISO/TC 92/SC 2 N662 (Übersetzung des DIN): "Grundlagen und Hintergrund von Verfahren zur Berechnung der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen". Lund, 1986
- [14] Bock, H.M., Wernersson, H.: Zur rechnerischen Analyse des Tragverhaltens brandbeanspruchter Stahlträger. Stahlbau 55 (1986), Heft 1, S. 7-14
- [15] Baock, H.M.: Über das Tragverhalten von Stahlstützen während eines Normbrandversuches. Stahlbau 56 (1987), Heft 6, S. 161-168
- [16] Laer, R.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlkonstruktionen unter dem Lastfall "Brand". Berichte aus dem Ingenieurbau der Technischen Universität Berlin, Heft 10, 1989
- [17] Boring, D.F.: Fire Protection Through Modern Building Codes, 5th Edition. AISI, Washington 1981
- [18] Law, M.: A basis for the design of fire protection of building structures. The Structural Engineer 1983, Vol. 61A, No. 1
- [19] AISI (Editor): Fire-safe Structural Steel, A Design Guide. Washington 1979
- [20] Bechthold, R.: Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1977
- [21] Witte, H.: Bemerkungen zum Kalibrierungsfaktor κ bei der Brandschutzbemessung im Stahlbau. Stahlbau 58 (1989), Heft 9

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 4: Verbundbauwerke

November 1989

1 ÜBERBLICK

Der vorliegende Bericht wurde unter Federführung von Dr.-Ing. R. Haß erstellt und in einem Arbeitskreis "Verbundbau" des NABau-Unterausschusses 02.34.19 beraten. Dem Arbeitskreis gehörten als weitere Mitarbeiter an: Dipl.-Ing. H. Muess, Prof. Dr.-Ing. W. Klingsch, Dr.-Ing. P. Schaumann.

Der Nachweis des Brandwiderstands tragender Bauteile kann, abgesehen von Prüfungen nach DIN 4102, auf die im folgenden beschriebene Art und Weise vorgenommen werden:

- Tabellen [1] enthalten Bemessungsvorschriften (Abmessungen, Bewehrungsverhältnisse, Betondeckungen) für Bauteile zur Einstufung in die Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102.
- Tafeln [28, 29 und 31] sind zahlenmäßige oder graphische Darstellungen von Traglasten zugehörig zu vorgegebenen Bauteilen und den Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102.
- Die Anwendung rechnerischer Verfahren lassen dem entwerfenden Ingenieur Spielraum bei einer optimierten brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen. Exakte Verfahren [17 - 20, 35] beinhalten eine vollständige thermische und mechanische Analyse der Bauteile in einem Simulationsmodell. Bei einer brandschutztechnischen Beurteilung kann, u.U. unter Preisgabe wirtschaftlicher Vorteile, auch von geeignet vereinfachten und vereinfachenden Annahmen ausgegangen werden (vereinfachte Verfahren).

Im Entwurf des EUROCODE 4 Teil 10 (EC 4-Entwurf) werden im jetzigen Stadium Traglasttafeln, eine Bemessungstabelle, vereinfachte Rechenmodelle und einige Grundlagen für exakte Rechenverfahren angegeben. Eine brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen mit Hilfe weiterer Tabellen (Nachweis für Regelfälle) ist vorgesehen.

2 BEMESSUNG MIT HILFE VON TABELLEN ODER TAFELN

2.1 Nachweis für Regelfälle mit Hilfe von Tabellen

Im EC 4-Entwurf werden Bemessungstabellen für Stützen und Verbundträger angegeben, die von den in [1] veröffentlichten Tabellen abgeleitet worden sind. Sie entsprechen damit vollständig den deutschen Vorstellungen.

Kommentar:

Um das Brandverhalten von Verbundstützen und Verbundträgern normgerecht zu erfassen, wurden Bemessungstabellen [1] mit der Angabe von Mindestquerschnittsabmessungen erstellt. Beim Nachweis wird das Einzelbauteilverhalten zugrundegelegt, so wie dies auch bei allen anderen in DIN 4102 Teil 4 erfaßten Bauteilen der Fall ist. Grundlage der brandschutztechnischen Bemessung ist die Ermittlung der Schnittgrößen bei Raumtemperatur. Das Zusammenwirken der Einzelbauteile des Bauwerks im Brandfall und die daraus folgenden Schnittgrößenumlagerungen oder die Auswirkung von Verformungen infolge der Bauteilerwärmung (z.B. Stützenkopferschiebungen) werden beim Nachweis nach DIN 4102 Teil 4 vernachlässigt.

Die Ausführungshinweise in [1] berücksichtigen die Verwendung handelsüblicher Walzprofile aus St 37-2 oder St 52-3 und von Schweißprofilen, sofern die angegebenen Mindestquerschnittsabmessungen und Verhältniswerte von Profildurchmesser/Wanddicke, Steg/Flansch-Dicke, Profilhöhe/Flanschdicke usw. eingehalten werden. Werden alle Regelungen der entsprechenden Bemessungsvorschriften und die darüber hinausgehenden konstruktiven Hinweise beachtet, so erfüllen die angesprochenen Verbundbauteile die Anforderungen der Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102 Teil 2. Für die brandschutztechnische Bemessung der Verbundstützen wird, analog zur Beurteilung von Stahlbeton- und Holzstützen in DIN 4102 Teil 4, vorausgesetzt, daß die Stützenenden durch die Wahl geeigneter Anschlüsse rotationsbehindert gelagert sind und der Brand durch geeignete Maßnahmen (z.B. Decken in entsprechender Feuerwiderstandsklasse) während der geforderten Feuerwiderstandsdauer auf das betreffende Geschoß beschränkt bleibt. Die in [1] angegebenen Werte für die Mindestquerschnittsabmessungen für Verbundstützen wurden unter der Voraussetzung ermittelt, daß die zulässigen Lasten der Stützen nach DIN 18 806 Teil 1 unter der Annahme der Lagerungsbedingungen nach Euler-Fall 2 (beidseitig gelenkig gelagert) ermittelt wurden. Wenn bei der Ermittlung der aufnehmbaren Last im Bauwerk schon im Gebrauchszustand Behinderungen der Endverdrehungen in Rechnung gestellt wurden, wie es z.B. bei rahmenartigen Tragwerken der Fall ist, dann ergeben sich u.U. höhere zulässige Lasten als bei Annahme einer gelenkigen Lagerung. Die geeignete

Wahl statischer Systeme und eine günstige Verteilung der Baustoffe Beton und Stahl innerhalb der Verbundquerschnitte führen unter Zuhilfenahme exakter Verfahren zu Lösungen, die im Regelfall wirtschaftlicher als die Bemessung mit Hilfe der oben genannten Tabellen sind.

Auf die Darstellung von abgeschlossenen Klassifizierungssystemen für Stahlprofilblechdecken wurde, abgesehen von wenigen Ausnahmen, bisher verzichtet. Hierzu sind ergänzende Untersuchungen erforderlich.

Fazit:

Die Nachweise für Regelfälle mit Hilfe von Tabellen werden Bestandteil der DIN 4102 Teil 4 und sollten daher nach Meinung des Arbeitskreises nicht zusätzlich in einem DIN-Blatt "Rechnerische Nachweise" erscheinen. Gegen eine Einbeziehung in EC 4 als einfachste Nachweisform für gängige Konstruktionen bestehen jedoch keine Bedenken.

2.2 Nachweis mit Hilfe von Traglasttafeln

Im EC 4-Entwurf waren zunächst Traglastdiagramme für Verbundstützen aus Stahlprofilen mit ausbetonierten Seitenteilen [34] und betongefüllten Hohlprofilen [31] dargestellt, sie sollen nun in einem Referenzpapier erscheinen. Aus den graphischen Darstellungen sind Lasten zu entnehmen, die von den Stützen zu vorgegebenen Feuerwiderstandsdauern bei zentrischer Lasteinleitung getragen werden können.

Kommentar:

Die Angaben beruhen auf Berechnungen mit exakten Verfahren oder Näherungsverfahren (Jungbluthverfahren) und sind teilweise noch umstritten. Ferner ist zu beachten, daß jegliche Extrapolationen über die untersuchten Bereiche hinaus nicht zulässig sind. Die Traglasttafeln und -diagramme müssen sich zwangsläufig auf Standardfälle konzentrieren. Abweichungen, wie z.B. exzentrische Lasteinleitung, rückspringende Betonoberflächen, geänderte Betondeckungen, Bewehrungsverhältnisse oder Bewehrungsanordnungen können bei der Bemessung nur unwirtschaftlich oder gar nicht berücksichtigt werden.

Ähnliche Tabellenwerke sind auch von anderer Seite für Verbundstützen aus vollständig einbetonierten Stahlprofilen und aus betongefüllten Hohlprofilen erstellt worden [28]. Sie wurden mit Hilfe eines

exakten Rechenverfahrens ermittelt und weisen bei gleichen geometrischen und mechanischen Kenngrößen der Stützen Unterschiede zu den Werten im EC 4-Entwurf auf.

Fazit:

Für eine normgerechte Darstellung sind solche Tafelwerke aus Sicht der Arbeitsgruppe ungeeignet.

3 VEREINFACHTE RECHNERISCHE NACHWEISE

3.1 Verbundstützen

An dieser Stelle werden nur Näherungsverfahren für Verbundstützen aus Stahlprofilen mit ausbetonierten Seitenteilen und für Verbundstützen aus betongefüllten Hohlprofilen vorgestellt.

Kommentar:

Für vollständig einbetonierte Stahlprofile erübrigt sich ein vereinfachter rechnerischer Nachweis, da diese Stützenform schon bei der vorgeschriebenen Mindestbetondeckung des Stahlprofils von 40 mm in der Regel Feuerwiderstandsdauern von mehr als 60 min erreicht und bei der aus herstellungstechnischen Gründen zu empfehlenden Betondeckung von 50 mm feuerbeständig (F 90) ausgebildet werden kann. Ihr Brandverhalten kann mit ausreichender Wirtschaftlichkeit durch die Vorgabe der Querschnittsabmessungen und der Betondeckungen von Bewehrung und Stahlprofil (Tabellen nach Abschnitt 1.1) beschrieben werden.

Im EC 4-Entwurf wird eine brandschutztechnische Bemessung für zentrisch belastete Verbundstützen aus Stahlprofilen mit ausbetonierten Seitenteilen vorgestellt [29, 30], bei dem der Verbundstützenquerschnitt in mehrere Teile aufgegliedert wird ("Jungbluth-Verfahren" für Stützen). Das Verfahren ist für die Feuerwiderstandsklassen F 30 bis F 120 gültig. Die mittleren Temperaturen von Querschnittsbereichen lassen sich in Abhängigkeit von der Brandeinwirkungszeit und der Querschnittsabmessungen einfach ermitteln. In Abhängigkeit von der Temperatur werden den Querschnittsteilen die mechanischen Eigenschaften zugewiesen. Der weitere Rechengang entspricht dem verein-

fachten Nachweisverfahren nach DIN 18 806 Teil 1 Abschnitt 5, wobei gegenüber dem Nachweis bei Raumtemperatur unveränderte Knickspannungskurven berücksichtigt werden.

Kommentar:

Infolge der überproportionalen Abnahme der Steifigkeit brandbeanspruchter Verbundstützen gegenüber ihrer Festigkeit, die nicht zutreffend berücksichtigt wird, ist es in der vorgestellten Form nur für Stützen bis maximal 4,50 m Länge anzuwenden.

Ein Bemessungsverfahren für zentrisch belastete Verbundstützen aus Stahlprofilen mit ausbetonierten Seitenteilen und aus betongefüllten Hohlprofilen der Feuerwiderstandsklasse F 90, das das im EC 4 dargestellte Verfahren verfeinert, wird in [33] detailliert dargestellt ("Klingsch/Muess/Wittbecker-Verfahren"). Es behält die Systematik des Rechengangs entsprechend der vereinfachten Bemessung von Verbundstützen nach DIN 18 806 Teil 1 (03.84) Abschnitt 5 ebenfalls bei und erfaßt näherungsweise die Auswirkungen der thermisch bedingten Materialveränderungen ebenso wie die Schlankheitseinflüsse. Ausgangspunkt des Verfahrens ist die Annahme, daß für einfach begrenzte geometrische Querschnittsbereiche mit grober Näherung mittlere Isothermenverläufe (Linien gleicher Temperatur) so definiert werden können, daß sich Bereiche mit ähnlichem Materialverhalten ergeben. Diesem Modell liegt die Annahme zugrunde, daß sich vergleichbare Verbundstützenquerschnitte bei Vergrößerung der Außenabmessungen in ihren Randbereichen ähnlich erwärmen. Als Rechenwert der Querschnittsgröße und damit als Eingangsparameter für die Ermittlung der Materialkennwerte wird der Wert U/A gewählt, der sich aus dem Gesamtumfang des Querschnitts U und der Querschnittsfläche A ergibt. Hierbei werden sowohl die Stahl- als auch die Betonanteile berücksichtigt. Abhängig vom Rechenwert U/A lassen sich für die einzelnen Querschnittsbereiche und Baustoffe Abminderungsfaktoren zur Ermittlung der Festigkeiten und der Steifigkeiten ermitteln. Diese Werte dienen zur Bestimmung einer vollplastischen Normalkraft, einer wirksamen Biegesteifigkeit und einer idealen Knicklast der Stützen nach 90 min Brandeinwirkung. Für den brandschutztechnischen Nachweis definieren die Autoren gegenüber der Kaltbemessung modifizierte Knickspannungskurven. Mit ihrer Hilfe wird ein Abminderungsfaktor ermittelt, der die vollplastische Normalkraft auf die im Brandfall aufnehmbare Last abmindert. Eingangsparameter für diese Kurven ist eine geometrische Schlankheit, die in Anlehnung an DIN 18 806 Teil 1 mit Hilfe der idealen Knicklast und der vollplastischen Normalkraft gebildet wird. Die Anwendung dieses Verfahrens zur Ermittlung des Brandwiderstands von Verbundstützen aus Stahlprofilen mit ausbetonierten Seitenteilen und aus betongefüllten Hohlprofilen der Feuerwiderstandsklasse F 90 führt bei Beachtung der Anwendungsgrenzen im Regelfall zu Ergebnissen, die auf der sicheren Seite liegen. Es ist damit nach erster Überprüfung zur brandschutztechnischen Vorbemessung von Verbundstützen geeignet. Zur Zeit wird dieses Verfahren für die Anwendung

bei exzentrischer Lasteinleitung und für den Nachweis der Feuerwiderstandsklassen F 30 F 180 erweitert. Die Eignung des Verfahrens muß aber noch durch die zutreffende Nachrechnung durchgeführter Versuche und die unabhängige Gegenrechnung von Ergebnissen exakter Rechenverfahren nachgewiesen werden. Dies gilt besonders für Stützen mit großer Schlankheit.

Fazit:

Das im EC 4-Entwurf dargestellte, vereinfachte Verfahren ("Jungbluth-Verfahren") liefert bei Beachtung der Anwendungsgrenzen auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Es ist aber in seinen Anwendungsgrenzen (zentrische Lasteinleitung, kammergefüllte Stahlprofile mit Biegung um die schwache Achse, Stützenlänge bis 4,50 m) sehr eingeschränkt. Zwei Autorenguppen ("Klingsch/Muess/Wittbecker" und "Haß/Dorn") arbeiten zur Zeit an verbesserten Verfahren, so daß in Kürze zunächst drei konkurrierende Verfahren verfügbar sein werden. Der Arbeitskreis schlägt daher vor, nur die Grundlagen für vereinfachte Rechenverfahren in einer Norm zu erfassen. Bekannte Verfahren sollten in Referenzpapieren zusammengefaßt werden und von NABau-UA 02.34.19 bzw. von einem SVA-Unterausschuß des IfBt begutachtet werden.

3.2 Verbundträger

Vereinfachte Rechenverfahren zur Ermittlung des Brandverhaltens von Verbundträgern mit ausbetonierten Kammern werden in der jetzigen Fassung des EC 4-Entwurfs nicht angegeben.

Kommentar:

Ein Verfahren, das auf ähnlichen Grundlagen wie das im EC 4-Entwurf dargestellte Bemessungsverfahren für Stützen basiert, wird in [30] dargestellt ("Jungbluth-Verfahren" für Träger). Abweichend von der Bemessung von Verbund- und Stahlbetonträgern bei Raumtemperatur ist die mitwirkende Plattenbreite im Brandfall bei schwacher Querbewehrung geringer. Infolge des Lastabtrags in der Richtung quer zur Trägerachse und durch die ungleiche Durchwärmung der Träger und der anschließenden Decken treten in schwachbewehrten Decken bei Brandbeanspruchung etwa im Abstand der Trägerbreite klaffende Risse parallel zur Trägerachse auf. Eine Schubübertragung ist über diese Risse nicht mehr möglich, so daß weiter entfernt liegende Deckenbereiche nicht zur Biegetragfähigkeit der Balken herangezogen werden können. Zu diesem Thema sind noch weitere experimentelle Untersuchungen mit praxisgerechter, starker Querbewehrung geplant. Dabei soll geklärt werden, ob die Schubsicherungsbewehrung nach der Verbundträger-Richtlinie im Brandfall ausreicht, um die mittragende Breite der Regelbemessung zu erreichen, oder inwieweit sie erhöht werden muß. Ein ver-

bessertes, vereinfachtes Rechenverfahren für Verbundträger mit ausbetonierten Kammern, in das diese Erkenntnisse einfließen, wird z.Zt. von den Autoren "Dorn/Muess/Schaumann" erarbeitet.

Fazit:

Im EC 4-Entwurf ist z.Zt. kein vereinfachtes Verfahren zur Bemessung von Verbundträgern dargestellt. Das "Jungbluth-Verfahren" liefert bei Beachtung der Anwendungsgrenzen auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Eine Autorengruppe ("Dorn/Muess/Schaumann") arbeitet zur Zeit an einem weiteren Verfahren, so daß in Kürze zunächst zwei konkurrierende Verfahren verfügbar sein werden. Der Arbeitskreis schlägt daher vor, nur die Grundlagen für vereinfachte Rechenverfahren in einer Norm zu erfassen. Bekannte Verfahren sollten in Referenzpapieren zusammengefaßt werden und vom NABau-Unterausschuß 02.34.19 und ggf vom SVA "Brandverhalten von Bauteilen" des IfBt begutachtet werden.

3.3 Stahlprofilblechdecken

Im EC 4-Entwurf wird ein Rechenverfahren zum Nachweis der Feuerwiderstandsklassen von Stahlprofilblechdecken vorgestellt [32]. Nach diesem vereinfachten Verfahren können die Decken hinsichtlich der Anforderungen als raumabschließende wie auch als tragende Bauteile bemessen werden. Bei der hier vorgestellten Bemessung wird der Brandwiderstand durch die Wahl der Deckendicke und die Menge an Zulagebewehrung, die im Brandfall Lastanteile der temperaturbedingt entfestigten Bleche übernimmt, gewährleistet.

Kommentar:

Das Rechenverfahren unterscheidet nicht zwischen endverankerten Verbunddecken und solchen mit kontinuierlichem Verbund. Untersuchungen haben gezeigt, daß die unterschiedliche Verbundwirkung wesentlichen Einfluß auf das Tragverhalten der Verbunddecken im Brandfall hat.

Die Gültigkeit der verwendeten Ansätze wurde durch die Nachrechnung durchgeführter Versuche nachgewiesen. Um die Brandschutzanforderungen hinsichtlich des Raumabschlusses zu erfüllen, muß ein Bauteil während einer der geforderten Feuerwiderstandsklasse entsprechenden Brandeinwirkungszeit den Durchtritt von Flammen und entzündlichen Heißgasen wirksam verhindern. Diese Anforderung wird von Blechdecken mit Aufbeton in der Regel erfüllt. Ihr Verhalten ähnelt in dieser Hin-

sicht dem von Stahlbetondecken. Die Bleche verhindern darüber hinaus den Heißgasdurchgang durch Risse im Beton. Weiterhin darf auf der dem Feuer abgewandten Seite nach der der geforderten Feuerwiderstandsklasse entsprechenden Brandeinwirkungszeit die Temperatur im Mittel nur um 140 K und an einzelnen Stellen nur um 180 K angestiegen sein. Um diese Anforderung zu erfüllen, muß die Decke genügend dick sein.

Stahlprofilblechdecken haben in der Regel einen entsprechend dem verwendeten Stahlblech profilierten Querschnitt, der mit Hilfe eines Verfahrens in eine "Ersatzdeckendicke" h_e umgerechnet wird. Das Biegetragverhalten von Stahlprofilblechdecken bei Brandeinwirkung wird mit Hilfe der elementaren Plastizitätstheorie nachgewiesen. Aufgrund der einseitigen Temperaturbeanspruchung bauen sich bei durchlaufenden Stahlprofilblechdecken sehr schnell Stützmomente auf, die die plastischen Grenzmomente der Querschnitte erreichen. Ein Versagen der Deckenkonstruktion tritt dann ein, wenn auch im Feldbereich ein Querschnitt temperaturbedingt den Grenzzustand erreicht und somit eine Gelenkkette entsteht. Weitere, über den Nachweis der Biegetragfähigkeit hinausgehende Nachweise (Druckbruch, Verankerungsbruch) werden nicht geführt.

Die Feuerwiderstandsklasse F 30 wird nach [32] bei Stahlprofilblechdecken mit der "Ersatzdeckendicke" $h_e \geq 60$ mm auch ohne Zulagebewehrung und ohne weiteren Nachweis erreicht. Höhere Feuerwiderstandszeiten ungeschützter Decken können durch Zulage von Bewehrung erreicht werden. Im Feldbereich wird das aufnehmbare Moment durch die untenliegende Bewehrung als Zugkomponente und durch den in der Regel nicht durch Temperatureinwirkung geschwächten Beton aufgenommen. Auf die Anrechnung der Resttragfähigkeit des Bleches wird vollständig verzichtet. Die Temperaturen der Zulagen ergeben sich aufgrund der Lage der Bewehrung und der Profilblechform. Die abschirmende Wirkung des Bleches wird hierbei nicht planmäßig berücksichtigt. Der Beton ist bei oberliegender Druckzone nicht temperaturbeansprucht und damit ungeschwächt. Im Stützbereich ist die oberliegende Bewehrung in der Regel nicht durch Temperatureinwirkung in ihrer Tragfähigkeit beeinträchtigt, die Betondruckzone aber direkt beflammt. Im EC 4-Entwurf ist abhängig von der Brandeinwirkungszeit die Temperaturverteilung der Betondruckzone der Decken angegeben. Hieraus folgt, bei Vorgabe der temperaturabhängigen Zylinderfestigkeit des Betons, eine trapezförmige Festigkeitsverteilung der Druckzone.

Unabhängig von [32] wurden in einem umfangreichen Forschungsprogramm [15] systematisch die verschiedenen Möglichkeiten untersucht, Trapezblechdecken ohne nachträgliche Schutzmaßnahmen in Feuerwiderstandsklassen einzustufen. Die Auswertung der bis dahin vorliegenden Erkenntnisse führte zu einer Einteilung in die folgenden Systeme in Abhängigkeit vom Lastniveau:

- Lastniveau A: Selbsttragende Trapezprofildecke mit Beton als Auflast ("Trapezprofil allein")
- Lastniveau B: Stahlbetonrippenplatte mit verlorener Stahlblechschalung ("Rippenplatte")
- Lastniveau C: Summe der Lasten von A und B (Trapezprofil + Rippenplatte = "trapezprofilunterstützte Rippenplatte")
- Lastniveau D: Stahlbetonrippenplatte mit Anrechnung des Trapezprofilquerschnitts als Zugbewehrung ("Verbunddecke").

Für die Bemessung im Gebrauchszustand liegt die Zulässigkeit der beiden konservativen Bemessungsmodelle A und B auf der Hand. Modell D ist dann zulässig, wenn gewährleistet wird, daß eine ausreichende und dauerhafte Verbundwirkung (Verdübelung) zwischen Trapezblech und Aufbeton sichergestellt ist. Dies ist durch Zulassungsversuche nachzuweisen.

Die Auswertung der Prüfergebnisse in [15] verdeutlichte, daß das Gedankenmodell C (Addition der Tragfähigkeiten des Trapezprofils und der Rippenplatte) das Tragverhalten von unverdübelten Stahltrapezprofildecken mit bewehrtem Aufbeton im Gebrauchszustand und unter Brandbeanspruchung am besten beschreibt. Die Brandprüfungen an diesen Systemen zeigten, daß geringere Achsabstände der Bewehrung als bei normalen Stahlbetonrippenplatten erforderlich sind. Die Bewehrungsstähe in Blechdecken mit Aufbeton erwärmen sich bei gleichem Achsabstand um etwa 10 bis 15 min verzögert gegenüber solchen in ungeschützten Rippenplatten. Das im EC 4-Entwurf beschriebene Verfahren vernachlässigt diese Einflüsse (Bemessung nach Modell B) und liegt deshalb bei bewehrten Decken auf der sicheren Seite.

Ohne Bewehrungszulage und ohne Verdübelung zwischen Trapezblech und Beton erreichten die Blechdecken in [15] bei einem Lastniveau entsprechend Modell A Feuerwiderstandsdauern von mehr als 30 min. Eine Verdübelung zwischen Trapezblech und Beton ergab bei bewehrtem Aufbeton keine wesentliche Verbesserung des Brandverhaltens. Der Nachweis im EC 4-Entwurf deutet jedoch auf ein verbessertes Brandverhalten von verdübelten Decken mit unbewehrtem Aufbeton hin. Abweichend von den bisherigen Erkenntnissen nach [21] erreichen nach den Angaben des EC 4-Entwurf unbewehrte Decken unabhängig von der Profilform Feuerwiderstandsdauern von 30 min.

Problematisch bei der Beurteilung des Brandverhaltens von Stahltrapezprofilblechdecken sind, wie bei allen Prüfungen an statisch bestimmt gelagerten Plattenstreifen, die großen Durchbiegungen und die Ausbildung der Auflagerkonstruktionen. Bei der brandschutztechnischen Beurteilung sind systemabhängig zusätzliche Forderungen zu erheben, die das Risiko großer Verformungen berücksichtigen. In den meisten Brandprüfungen dienen Massivwände als Unterstützung der Deckenstreifen, d.h. eine Beurteilung des Brandverhaltens müßte auf nicht verformbare Auflagerbereiche eingeschränkt wer-

den. In der Praxis werden diese Deckensysteme jedoch überwiegend in Verbindung mit Stahl- bzw. Verbundkonstruktionen ausgeführt. Bei der Übertragung auf derartige Systeme ist zu beachten, daß neben der Durchbiegung in Spannrichtung der Bleche zusätzliche Verformungen senkrecht dazu, nämlich in Spannrichtung der Auflager, auftreten und das Brandverhalten negativ beeinflussen können. Insbesondere besteht die Gefahr einer erheblichen Beeinträchtigung des Verbundes zwischen Blech und Beton und damit verbunden einer unzulässigen Temperaturerhöhung im Bereich von zusätzlichen Längsrisen und damit u.U. eines vorzeitigen Verlustes der Tragfähigkeit. Weiterhin besteht bei sehr hochstetigen Blechen mit einer nur sehr dünnen durchgehenden Platte die Gefahr eines vorzeitigen Druckbruchs. Hier sind geeignete Maßnahmen (Wahl einer Mindestplattendicke aus konstruktiver Sicht erforderlich).

Fazit:

Das im EC 4-Entwurf beschriebene Verfahren liegt bei bewehrten Decken sehr auf der sicheren Seite, wenn die Decken auf Biegung versagen. Sind sie druckbruchgefährdet (sehr hohe Stege), so ist das Brandverhalten noch nicht endgültig geklärt. Abweichend von bisherigen Erkenntnissen erreichen unbewehrte Decken unabhängig von der Profilform Feuerwiderstandsdauern von 30 min. Diese Diskrepanz muß noch geklärt werden. Eine weitere Wissenslücke ist im Anschlußbereich Decke/Auflager zu schließen. Hier kann u.U. ein vorzeitiges Versagen der Decken, das rechnerisch im EC 4-Entwurf nicht erfaßt wird, auftreten. Daher schlagen die Autoren vor, die konstruktiven Hinweise des EC 4-Entwurfs zu überarbeiten und ggfs. zu ergänzen.

4 GENAUE RECHNERISCHE NACHWEISVERFAHREN

Im EC 4-Entwurf sind jetzt Vorschläge zu den Rechengrundlagen für "exakte" Berechnungsverfahren enthalten, die kürzlich von einer europäischen Arbeitsgruppe erarbeitet wurden. Erläuterungen dazu finden sich in Teil 7 dieses Berichtes.

Kommentar:

Die bisher entwickelten Rechenverfahren [17-20, 35] können dazu verwendet werden, das Erwärmungsverhalten und das Trag- und Verformungsverhalten von Bauteilen (Stützen, Träger, Rahmen, Decken, Wände) während eines Brandes zu ermitteln. Eine zutreffende Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen muß in jedem Fall den Einfluß von physikalischen und geometrischen Nichtlinearitäten berücksichtigen. Hierzu sind eindeutige Definitionen der Wärmeübergangsbedingungen, der temperaturabhängigen thermischen (Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität

und spez. Dichte) und der mechanischen Materialkennwerte (Spannungs-/Dehnungs-Beziehungen und thermische Dehnungen) in Abstimmung mit den Angaben von EC 2 (Beton) und EC 3 (Stahl) erforderlich (siehe Teil 7). Bei der Beschreibung des physikalischen Materialverhaltens muß dabei das sogenannte Hochtemperaturkriechen berücksichtigt werden. Dies kann in der Beschreibung der Spannungs-/Dehnungs-Beziehungen direkt enthalten sein oder über einen temperaturabhängigen Faktor berücksichtigt werden. Selbstverständlich ist auch der Temperaturgradient in geeigneter Weise zu erfassen, der besonders bei der Berechnung von Verbundstützen von großem Einfluß auf die Rechenergebnisse ist. Um für die Rechenverfahren eine einheitliche Beurteilungsbasis zu erreichen, ist die Definition von Imperfektionsannahmen (Vorkrümmung, ungewollte Ausmitten, Stabendverdrehungen) erforderlich. Der vorliegende Entwurf des Teils 10 des EC 4 enthält solche Grundlagen nur unvollständig und zum Teil (Beton) auch in einer Form, die nicht im Einklang mit den Kenntnissen und Erfahrungen des Arbeitskreises steht. Beschreibungen wie Programmablaufpläne, Querschnitts- und Stabdiskretisierungen, Rechenergebnisse, gehören nicht in eine Vorschrift. Ein Programm muß seine Eignung u.a. durch zutreffende Nachrechnung der zahlreichen, vorliegenden Versuche beweisen.

Es muß betont werden, daß der Normbrandversuch und die Einzelbauteilprüfung (Brand-schutzanforderungen an die Bauteile eines Gebäudes in den LBO, Einstufung in F-Klassen) eine Einheit in einem bewährten Sicherheitskonzept bilden. Die Beurteilung des Gesamtbauwerkverhaltens im Brandfall sollte deshalb mit der Berücksichtigung natürlicher Brandverläufe verbunden werden.

Fazit:

Exakte Rechenverfahren müssen den Einfluß von geometrischen und physikalischen Nichtlinearitäten in geeigneter Weise berücksichtigen. In einem Normblatt "Rechnerische Nachweise" sollten die Grundlagen (Wärmeübergang, Materialgesetze, Imperfektionen) eines rechnerischen Nachweises vollständig vorgeschrieben werden. Der EC 4-Entwurf enthält solche Angaben nur unvollständig und nicht in jedem Fall den gestellten Anforderungen entsprechend. Die Definitionen der temperaturabhängigen thermischen und mechanischen Materialkennwerte müssen in logischer Abstimmung mit den Angaben vom EC 2-Entwurf (Beton) und vom EC 3-Entwurf (Stahl) erfolgen. Ein entsprechender Vorschlag findet sich in Teil 7 dieses Berichtes.

5 LITERATURHINWEISE

- [1] Dorn, T.; Haß, R.; Kordina, K.: Brandverhalten von Verbundstützen und -trägern. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 19 (1988), S. 104-109.
- [2] Grandjean, G.; Grimault, J.P.; Petit, L.: Détermination de la durée au feu des profils creux remplis de béton. Forschungsbericht Cométube, Paris, CIDECT 15 B/80-10 und Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (Nr. 7210 SA 3/302), 1980.
- [3] Kordina, K.; Klingsch, W.: Brandverhalten von Stahlstützen im Verbund mit Beton und von massiven Stahlstützen ohne Beton. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, P 35 und Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (Nr. 7210 SA 1/108), 1983.
- [4] Haß, R.; Quast, U.: Brandverhalten von Verbundstützen mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Stützen/Riegelverbindungen. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 86 Akt. 2.2, 1985.
- [5] Haß, R.: Brandversuche an Stahlbeton- und Verbundstützen. Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, Arbeitsbericht 1984 - 1986.
- [6] Prüfung von sechs Verbundstützen aus betongefüllten Hohlprofilen mit geringen Querschnittsabmessungen (kleinere Querschnittsseite bzw. Durchmesser 100 mm bis 160 mm) auf Brandverhalten nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977. Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Prüfungszeugnis Nr. 756/3548 - HB/Schr -, 1987.
- [7] Prüfung von zwei Verbundstützen aus Stahlprofilen mit eingeschweißten, halbierten Stahlprofilen (I-Träger) und ausbetonierten Seitenteilen auf Brandverhalten nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977. Amtliche Materialprüf-

- anstalt für das Bauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Prüfungszeugnis Nr. 85 1101 -HB/Schr -, 1985.
- [8] Jungbluth, O.; Bangert, W.; Lindhorst, W.: Ausbetonierte Stahl-Spezialprofile mit erhöhter Feuerwiderstandsfähigkeit. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 86 Akt. 4.2, 1985.
- [9] Herschelmann, F.: Untersuchungen über konstruktive Maßnahmen, die die Feuerwiderstandsdauer von Stahlverbundträgern verbessern. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, durchgeführt im Auftrage des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn-Bad Godesberg, 1982.
- [10] Prüfung von zwei statisch bestimmt gelagerten Stahlverbundträgern (AF 90-Verbundträger) auf Brandverhalten nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977, zur Ermittlung der Feuerwiderstandsklasse bei dreiseitiger Brandbeanspruchung von unten. Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Prüfungszeugnis Nr. 80 341 - We/Schu -, 1980.
- [11] Durchführung von sechs orientierenden Trägerprüfungen sowie Durchführung von sieben Normprüfungen mit statisch bestimmt gelagerten, ausbetonierten Stahlverbundträgern in Verbindung mit Holrib-Decken auf Brandverhalten nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977, zur Ermittlung der Feuerwiderstandsklasse bei dreiseitiger Brandbeanspruchung von unten. Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen der Technischen Universität Braunschweig, Prüfungszeugnis Nr. 83 821 - We/Schr -, 1983.
- [12] Herschelmann, F.; Richter, E.: Parameterstudie für Verbundträgerdecken der Feuerwiderstandsklasse "F 90". Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 86 Akt. 2.5, 1984.

- [13] Dorn, T.; Haß, R.; Quast, U.: Brandverhalten und Bemessung von Anschlüssen zur Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer von Verbundkonstruktionen. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 86 Akt. 2.10, 1986.
- [14] Jungbluth, O.; Berner, K.: Untersuchungen zum Tragverhalten von durchlaufenden Stahlprofilblech/Beton-Verbundplatten mit Stahlprofil/Beton-Verbundunterzügen und zum Brandverhalten von einfeldrigen Stahlprofilblech/Beton-Verbundplatten. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 42, 1979.
- [15] Lehmann, R.; Schmidt, H.: Stahlprofildecken mit Aufbeton, Brandverhalten ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 86 Akt. 2.7, 1984.
- [16] Teichen, K.-Th.; Lehmann, R.: Planung, Bau, Teilabbrandversuche und Brandschadenmodellsanierung eines viergeschossigen Büro- und Laborgebäudes mit neuartigen, teils kühlmittegefüllten Stahlverbundbauelementen hoher Feuerwiderstandsfähigkeit. Brandverhalten von Stahl- und Stahlverbundkonstruktionen, Statusseminar 1986, Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Verlag TÜV Rheinland, Köln, S. 91-369.
- [17] Quast, U.; Haß, R.; Rudolph, K.: STABA-F, Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1984.
- [18] Schaumann, P.: Zur Berechnung stählerner Bauteile und Rahmentragwerke unter Brandbeanspruchung. Mitteilung Nr. 84-4 des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, 1984.
- [19] Wittbecker, F.-W.: Gesamttragverhalten thermisch instationär beanspruchter Stahlverbundkonstruktionen. Heft 1

- des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Bergischen Universität Wuppertal, 1987.
- [20] Schleich, J. B.: CEFICOSS, A Computer Program for the Fire Engineering of Steel Structures. United Nations Seminar, Luxembourg, 1988.
- [21] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.: Beton-Brandschutz-Handbuch. Betonverlag GmbH, Düsseldorf, 1981.
- [22] Preliminary Draft of an Appendix to the CEB-FIP Model Code. Design of Concrete Structures for Fire Resistance. Comite Euro-International du Béton (Bulletin d'Information), 1982.
- [23] EKS-Technical Committee 3 - Fire Safety of Steel Structures: European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1983.
- [24] Haß, R.: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton. Heft 69 der Veröffentlichungsreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1986.
- [25] Haß, R.; Meyer-Ottens, C.: Brandschutz von Verbundkonstruktionen - Untersuchungen, Beurteilung und Anwendung -. Stahlbau 55 (1986), S. 293-298.
- [26] Haß, R.: Untersuchungen zum Brandverhalten von Verbundstützen und Verbundträgern. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 19 (1988), S. 65-68.
- [27] ECCS-Technical Committee T3 - Fire Safety of Steel Structures: Technical Note: Calculation of the Fire Resistance of Central Loaded Composite Columns Exposed to the Standard Fire, 1986.
- [28] Quast, U.; Rudolph, K.: Traglasten für Verbundstützen zugehörig zu Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102. Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, Forschungsbericht P 86 Akt. 2.3, 1985.

- [29] Jungbluth, O.; Hahn, J.; Traglastenkatalog für ARBED AF 30/120 Verbundstützen auf Walzträgerbasis. ARBED Recherches, Luxembourg, 1980.
- [30] Jungbluth, O.: Optimierte Verbundbauteile. aus Stahlbau Handbuch Teil 1, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, 1982.
- [31] Twilt, L.: Design Charts for the Fire Resistance of Concrete Filled HSS Columns under Centric Loading. TNO Report Project Number 00.65.4.3900, CIDECT Number 15J-88/12-E, 1988.
- [32] ECCS-Technical Committee T3 - Fire Safety of Steel Structures: Technical Note: Calculation of the Fire Resistance of Composite Concrete Slabs with Profiled Steel Sheet Exposed to the Standard Fire, Delft, 1983.
- [33] Klingsch, W.; Muess, H.; Wittbecker, F.-W.: Ein baupraktisches Näherungsverfahren für die brandschutztechnische Bemessung von Verbundstützen. Bauingenieur 63(1988), S. 27-34.
- [34] Schleich, J. B.: Computer Assisted Analysis of the Fire Resistance of Steel and Composite Concrete-Steel Structures. Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl (Nr. 7210 SA 502). Endbericht 1986.
- [35] Klingsch, W., Wittbecker, F.-W.: INTAKT-T - Ein Programmsystem zur Berechnung stabförmiger Tragwerke bei Brandbeanspruchung. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bergische Universität Wuppertal, 1985

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 5: Holzbauwerke

November 1989

1 Überblick

Der vorliegende Bericht wurde von Prof. Dr.-Ing. D. Hosser auf der Grundlage eines Entwurfes von Prof. Dr.-Ing. W. Klingsch erstellt. Er wurde in einem Arbeitskreis des NABau-Unterausschusses 02.34.19 abgestimmt, dem noch Dipl.-Ing. E. Kabelitz, Dr.-Ing. M. Kersken-Bradley und Dr.-Ing. J. Wesche angehören.

Ausgangspunkt der folgenden Darstellungen ist der Entwurf Mai 1989 des Eurocodes 5 Teil x "Structural Fire Design for Timber Structures" [1] dessen wesentliche Inhalte zusammenfassend wiedergegeben werden. In kursiv gedruckten Kommentaren werden diese Regelungen mit dem nationalen Stand der Technik gemäß DIN 4102 Teil 4 [2] und ergänzender Literatur verglichen. Hierbei werden Differenzen oder Unklarheiten aufgezeigt, die zum Teil noch Gegenstand laufender Forschungsvorhaben sind.

Der o.g. EC 5-Entwurf enthält - neben den grundlegenden Modellabschnitten - im Abschnitt 3 die thermo-mechanischen Materialeigenschaften von Holz und im Abschnitt 4 und 5 vereinfachte rechnerische Brandschutznachweise für wichtige tragende Einzelbauteile (Balken, Stützen, Verbände, Wände und Decken). Zusätzlich gibt der Abschnitt 6 detaillierte Hinweise zur konstruktiven Durchbildung von Auflagern und Verbindungen.

2 GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGSBEREICH

Grundsätzlich sollen im EC 5 Nachweisverfahren für

- tragende Funktion (Kriterium "R") und/oder
- raumabschließende Funktion (Kriterien "E" und "I")

von Holztragwerken bei Brandeinwirkung geregelt werden. Hierbei gelten die Grundprinzipien der Modellabschnitte [3] sowie

die Lastannahmen nach Teil 20 des Eurocodes on Actions [4], die hier nicht wiederholt werden sollen.

Wie in den übrigen baustoffbezogenen Eurocodes werden folgende Nachweismethoden angegeben:

- rechnerischer Nachweis von Einzelbauteilen,
- rechnerischer Nachweis von Teilsystemen,
- allgemeine Tragwerksanalyse,
- Nachweis aufgrund von Versuchen (z. B. mittels Tabellen).

Kommentar:

In dem derzeitigen Entwurf fehlen die noch zu regelnden (experimentellen) Nachweisverfahren für raumabschließende Funktion.

Bislang fehlen auch analytische Verfahren für Teilsysteme und Gesamttragwerke.

3 THERMO-MECHANISCHE MATERIALEIGENSCHAFTEN

Die relative Abnahme von Festigkeit und Elastizitätsmodul des Holzes in Abhängigkeit der mittleren Temperatur des nicht verbrannten Restquerschnittes wird mit Hilfe von Faktoren $k(T)$ aus den entsprechenden charakteristischen Werten bei Raumtemperatur ermittelt. Die Reduktionsfaktoren werden derzeit in Annex 1 zu [1] grafisch angegeben für mittlere Querschnittstemperaturen zwischen 20 °C und 100 °C. Für die Bemessung soll im allgemeinen von 100 °C ausgegangen werden.

Kommentar:

Im Hinblick auf laufende Untersuchungen zur experimentellen Absicherung werden die temperaturabhängigen Festigkeiten und Steifigkeiten vorerst nur im Annex geregelt. Die k-Werte sind noch in der Diskussion.

Wesentliche Eingangsgröße für den brandschutztechnischen Nachweis von Holzbauteilen ist die Abbrandrate. In [1] werden Abbrandraten für Stützen und Zugglieder, Balken, Decken- und

Dach-Verbretterungen sowie für Holzwerkstoff-Platten angegeben.

Bei den Holzbauteilen wird zwischen Nadelholz, Brettschichtholz und Laubholz unterschieden.

Für Nadelholz ($\rho = 400 - 600 \text{ kg/m}^3$) gelten folgende Werte:

- Stützen/Zugglieder	$\beta = 0,7 \text{ mm/min}$
- Balken, Brand von oben und von der Seite	$\beta = 0,8 \text{ "}$
- Balken, Brand von unten	$\beta = 1,0 \text{ "}$
- Verbretterungen, Brand von oben	$\beta = 0,6 \text{ "}$
- Verbretterungen, Brand von unten	$\beta = 1,0 \text{ "}$

Bei Brettschichtholz dürfen diese Werte um $0,1 \text{ mm/min}$, bei Laubholz um 40% reduziert werden.

Je nach Dichteklasse liegt die Abbrandrate bei Holzwerkstoff-Platten zwischen $\beta = 0,5 \text{ mm/min}$ ($\rho = 700 \text{ kg/m}^3$) und $\beta = 1,0 \text{ mm/min}$ ($\rho = 400 \text{ kg/m}^3$). Bei Biegebeanspruchung sollen die Werte um 20% erhöht werden.

Kommentar:

Die angegebenen Abbrandraten sind noch umstritten. Deutsche Erfahrungswerte liegen zum Teil um $0,1 \text{ mm/min}$ höher [5].

Alle Angaben gelten für Normbrandbeanspruchung gemäß ISO 834. Für natürliche Brandverläufe werden Abbrandraten in einem Annex 6 zu [1] aufgrund neuerer Forschungsergebnisse definiert.

Bei den wärmetechnischen Kennwerten sind von Interesse:

- der thermische Ausdehnungskoeffizient
 $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

- die Wärmeleitfähigkeit
 $\lambda = 0,13 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ für Nadelholz

$\lambda = 0,19 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ für Laubholz

$\lambda = 0,10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ für Holzkohle

- die spezifische Wärmekapazität

$c = 1,11 + 0,0042 \cdot T$ kJ/kg \cdot °C für Holz

$c = 1,0$ kJ/kg \cdot °C für Holzkohle.

Kommentar:

Es wird in [1] darauf hingewiesen, daß die Wärmedehnung bei Holz wegen des kleinen α normalerweise im Hinblick auf Zwangkräfte keine Rolle spielt. Auch die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität sind von eher geringer Bedeutung, da bei Holzbauteilen eine thermische Querschnittsanalyse für Brandbeanspruchung nicht üblich ist.

4 BAUTEILNACHWEISE

4.1 Allgemeines

Rechnerische Bauteilnachweise umfassen

- Schnittgrößenermittlung,
- Ermittlung der Querschnittsabmessungen unter Berücksichtigung des Abbrandes, einschließlich zeitlich veränderlicher Schlankheit und Querschnittsmomente,
- Berechnung der zeitlich veränderlichen Bemessungsspannungen aus Biegung, Druck- und Zugkraft,
- Ermittlung der zeitabhängigen Bemessungsfestigkeit,
- Nachweis, daß während der Branddauer die Bemessungsspannungen kleiner als die Bemessungsfestigkeiten sind, einschließlich kombinierter Spannungszustände und Theorie II. Ordnungseffekte.

Die zeitlich veränderlichen Querschnittswerte, Festigkeiten und Schlankheiten hängen vom Brandverlauf und der Abbrandtiefe auf den Oberflächen des Bauteils ab, wobei ungeschützte und geschützte Oberflächen zu unterscheiden sind. Bei ungeschützt

dem Feuer ausgesetzten Oberflächen ist die Querschnittsminderung mit der vollen Abbrandrate gemäß Abschnitt 3 in Rechnung zu stellen; bei Stützen ist von vierseitiger, bei Balken von vierseitiger oder dreiseitiger Beflammung auszugehen. Falls eine Oberfläche durch angrenzende Bauteile geschützt ist, erfolgt dort keine Querschnittsreduktion. Im Falle einer Bekleidung mit geringerer Versagenszeit als die Branddauer erfolgt der Abbrand erst nach Versagen der Bekleidung.

Kommentar:

Hinsichtlich der "Versagenszeiten" von Bekleidungen wird auf eine künftige CEN-Norm verwiesen, die dann für alle baustoffabhängigen Eurocodes gleichermaßen anwendbar sein soll.

Der Temperatur/Zeit-Faktor $k(t)$ zur Ermittlung von temperaturabhängigen Materialkennwerten darf bei ungeschützten Bauteilen entweder für eine Mitteltemperatur von 100 °C oder für eine näherungsweise berechnete Temperatur gemäß Annex 3 zu [1] angenommen werden. Bei zum Teil geschützten Bauteiloberflächen darf die Abminderung auf den Prozentsatz der nicht geschützten Oberflächen bezogen werden.

4.2 Balken

Bei reiner Biegung erfolgt der Spannungsvergleich analog zur Kaltbemessung, jedoch mit dem Widerstandsmoment des reduzierten Querschnittes. Generell ist von vierseitiger Beflammung auszugehen. Dreiseitige Beflammung darf angenommen werden bei Balken unter einer durchgehenden Decke, die mindestens die gleiche Feuerwiderstandsdauer wie der Balken hat.

Die Bemessungsfestigkeit wird bei nicht zu schlanken Querschnitten ($d/b < 4$) nicht, andernfalls mit k_{inst} entsprechend der Kaltbemessung abgemindert; hierbei darf eine Kippaussteifung des Bauteils nicht unterstellt werden, wenn die Feuer-

widerstandsdauer der Aussteifung geringer als die Branddauer ist.

Falls bei der Kaltbemessung (z. B. im Auflagerbereich) Schubversagen bemessungsentscheidend ist, muß die Querschnittsbreite um bis zu 50 % in Abhängigkeit der Schubkraftausnutzung vergrößert werden. In gleicher Weise kann bei Balken aus Brettschichtholz mit Durchbrüchen verfahren werden, sofern bestimmte Mindestabmessungen eingehalten werden. Bei Biegung mit Normalkraft kann grundsätzlich wie bei der Kaltbemessung verfahren werden, wobei jedoch die Querschnittswerte und Festigkeiten bei Brand gemäß Abschnitt 4.1 gelten.

Kommentar:

Die Nachweisführungen bezüglich nicht ausreichender Kippaussteifung bei $d/b > 4$, maßgebendem Schubversagen und Behandlung von Durchbrüchen sowie Biegung mit Normalkraft sind im EC 5 [1] flexibler geregelt als in DIN 4102 Teil 4 [2]. Der generelle Bemessungsansatz entspricht dem im Holz-Brandschutz-Handbuch [5].

4.3 Stützen

Bei Holzstützen wird ein Traglastnachweis analog EC 5 Teil 1 geführt, jedoch mit den von der Branddauer abhängigen Querschnittswerten und Festigkeiten gemäß Abschnitt 4.1 und unter Berücksichtigung der mit dem Abbrand veränderlichen Schlankheit.

Die Knicklänge soll grundsätzlich wie bei der Kaltbemessung bestimmt werden. Hierbei kann mit Einspannung (Eulerfall 3 oder 4) gerechnet werden, sofern die Stützenenden bei unverschieblichen Systemen durch vollen Kontaktstoß mit angrenzenden Bauteilen verbunden sind.

Kommentar:

In DIN 4102 Teil 4 [2] wird die Knicklänge von Stützen aus Brettschicht- oder Vollholz bei konstruktiv ausgebildetem vollem Kontaktstoß der Enden unterschiedlich bewertet; eine solche Unterscheidung fehlt in EC 5. Außerdem werden in [2] für I- und Kreuzquerschnitte vollflächige Kontaktstöße der Enden ohne Reduktion der Knicklänge verlangt.

Sofern während der Branddauer die Aussteifung von Druckgliedern versagen kann, sind diese als nicht ausgesteift zu betrachten.

4.4 Zugglieder

Holz-Zugglieder sind durch Vergleich der vom Abbrand abhängigen Bemessungs-Zugspannung und der temperaturabhängigen Bemessungszugfestigkeit zu dimensionieren. Wenn Stahl-Zugglieder verwendet werden, soll die thermische Dehnung berücksichtigt werden.

4.5 Aussteifungen

Wenn Druck- oder Biegeglieder als ausgesteift vorausgesetzt werden, muß die Aussteifung für die entsprechende Feuerwiderstandsdauer bemessen werden. Die gleichmäßig verteilte Last des auszusteifenden Bauteils darf dabei zu 60 % der normalen Bemessungslast angenommen werden. Bei Balken mit Torsionsbehinderung an den Enden genügt eine Mindest-Kippaussteifung entlang der Spannweite.

Kommentar

Angaben zur Mindest-Kippaussteifung unter Berücksichtigung der mit Kombinationsbeiwerten abgeminderten Destabilisierungskräfte sind noch festzulegen. Bezüglich der zu verwendenden Verbindungen gibt Annex 5 Hinweise.

4.6 Tragende Wände und Decken

Der Abschnitt 5 in [1] enthält vorläufige Hinweise für die brandschutztechnische Bemessung von tragenden Wänden und Decken ohne raumabschließende Funktion (nur Kriterium "R") mit vertikalen oder horizontalen Tafeln gemäß EC 5 Teil 1.

Der Nachweis kann entweder durch Berechnung oder Brandversuch oder durch eine Kombination aus beiden geführt werden. Dabei ist für nichtraumabschließende Bauteile beidseitige Beflammung zu unterstellen.

Beim rechnerischen Nachweis ist wie folgt zu verfahren:

- Ermittlung der Bemessungsschnittgrößen mit den maßgebenden Randbedingungen und den vom Brand abhängigen Querschnitts- und Materialkennwerten,
- Berechnung der Verzögerung der Brandbeanspruchung für die tragenden Holzbauteile unter Berücksichtigung von Bekleidungen und Isolierungen.
- Nachweis des Feuerwiderstandes der tragenden Holzbauteile nach den o. g. Regeln.

Kommentar:

Einzelheiten zum rechnerischen Nachweis sind noch zu regeln. Derzeit ist nur der Tragfähigkeitsnachweis der Einzelbauteile vorgesehen. Nachweise der Integrität oder thermischen Isolierung sollen in einem Anhang behandelt werden.

5 KONSTRUKTIVE DURCHBILDUNG

In Abschnitt 6 von [1] sollen konstruktive Hinweise und Kriterien für die Ausbildung von Auflagern und Verbindungen gegeben werden.

Wenn ein Versagen von Auflagern und Anschlüssen zum Tragwerksversagen führen kann, sind die Auflager und Anschlüsse für die gleiche Feuerwiderstandsdauer wie die tragenden Bauteile zu bemessen.

Bei der konstruktiven Durchbildung ist folgendes zu berücksichtigen:

- Schwinden durch Reduktion des Feuchtegehaltes beim Brand (örtlich bis 2,5 %),
- Ribbildung bei behindertem Schwinden,
- ggf. erhöhte Abbrandrate bei gerissenen Bereichen und anschließenden Stahlteilen,
- verstärkte Verformung der anschließenden Teile,
- Verbiegung von Seitenteilen durch ungleichförmige Erwärmung und Feuchteverteilung, ggf. auch exzentrische Belastung.

Kriterien für die Ausführung von Auflagern und Anschlüssen mit mechanischen Befestigungselementen sind in einem umfangreichen Annex 5 zu [1] angegeben.

Kommentar:

Im Annex 5 sind Prüferfahrungen aus [2] und [5] verarbeitet. Diese sind zum Teil durch Bemessungsregeln aufgrund neuerer Forschungsergebnisse ergänzt.

6 WERTUNG UND OFFENE FRAGEN

In Part 10 zu EC 5 [1] sollen wie in DIN 4102 Teil 4 [2] Bemessungshilfen aufgrund von Brandversuchsergebnissen für Nachweise nach Level I (z. B. Tafeln mit Mindestquerschnittsabmessungen), zumindest in Anhängen aufgenommen werden. Die entsprechenden Werte sind jedoch nur bedingt vergleichbar, da zum Teil unterschiedliche Modellannahmen zugrunde liegen.

Für vereinfachte rechnerische Nachweise (Level II) werden Näherungsformeln (in Anlehnung an [5]) angegeben, die hinsichtlich Anwendungsgrenzen und Sicherheit bzw. Wirtschaftlichkeit noch nicht vollständig abgesichert sind. Neu sind im Vergleich zu DIN 4102 Teil 4 [2] unter anderem:

- der Nachweis mit Teilsicherheitsbeiwerten,
- die explizit ausgewiesenen thermo-mechanischen Stoffwerte,
- die explizit anzuwendenden mechanischen Modelle in Abhängigkeit der mit der Branddauer veränderlichen Querschnittswerte und mechanischen Kennwerte,
- die notwendige Entscheidung über Systemannahmen, z. B. Randbedingungen, Knicklänge.

Einige dieser Rechenansätze sind noch Gegenstand laufender oder beantragter Forschungsvorhaben, so daß ihre Normungsfähigkeit zum jetzigen Zeitpunkt zu bezweifeln ist.

Genauere Nachweisverfahren (Level III) für Teilsysteme und Gesamttragwerke sind derzeit noch nicht verfügbar und werden in [1] auch ausgespart.

Etwas überdetailliert im Vergleich zu [2,5] erscheinen die Angaben zu Holzverbindungen in Annex 5 zu [1]. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, daß sich derartige Bemessungsregeln bisher weder in Deutschland noch im Ausland finden. Daher ist ihre Beschreibung und Diskussion in jedem Falle sinnvoll, unabhängig davon, was letztendlich im EC 5 geregelt werden wird.

Insgesamt gesehen enthält der EC 5 Teil 10 eine Reihe von Bemessungsansätzen nach Level I und Level II, die als Weiterentwicklung gegenüber dem derzeitigen Stand der Praxis in der Bundesrepublik zu werten sind. Ihre endgültige Absicherung und der Vergleich mit den bisherigen Bemessungsergebnissen muß jedoch noch erfolgen. Dazu sind systematische Vergleichsrechnungen an repräsentativen Bauteilen unter Normbrandbedingungen erforderlich (vgl. Teil 8 des Gesamtberichtes). Bei positivem Ausgang steht auch einer Anwendung der vereinfachten Nachweisverfahren auf natürliche Brandverläufe nichts im Wege.

Hinsichtlich der Nachweisverfahren nach Level III bleibt der EC 5 hinter den Eurocodes 2 bis 4 zurück. Hier ist jedoch derzeit noch keine Normung möglich und nach dem Bedarf der Praxis vielleicht auch noch nicht erforderlich.

7 LITERATURHINWEISE

- [1] Kersken-Bradley, M., Pedersen, E., Storti, G.: Eurocode Nr. 5 Part 10 - Structural Fire Design for Timber Structures. Preliminary Draft May 1989

- [2] DIN 4102 Teil 4 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. Ausgabe März 1981

- [3] Coordination Group for Eurocodes: Eurocodes Part 10 - Structural Fire Design, Model Clauses for EC 2 - 6, EC/CG-fire-88/5rev3, May 1989

- [4] Coordination Group for Eurocodes: Part 20 of the Eurocode Actions - Actions on Structures exposed to Fire. EC/GG-fire-88/6rev6, June 1989

- [5] Kordina, K., Meyer-Ottens, C.: Holz-Brandschutz-Handbuch. München: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., 1983

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 6: Mauerwerksbauten

November 1989

1 ÜBERBLICK

Der vorliegende Statusbericht wurde unter Federführung von Frau Dipl.-Ing. Hahn unter Mitwirkung von Dr.-Ing. Ohler erstellt. Grundlage ist der Entwurf Juli 1989 des Eurocodes Nr. 6, Teil 10 "Structural Fire Design for Masonry" [1].

Dieser Teil regelt grundsätzlich - entsprechend den Modellabschnitten für alle Eurocodes [2] - drei Arten des Nachweises für den Feuerwiderstand von Mauerwerksbauten:

- Nachweis durch Brandprüfung,
- Dimensionierung und konstruktive Ausbildung anhand von Tabellen und
- rechnerische Nachweise.

Im folgenden werden die jeweiligen Regelungen kurz zusammengefaßt. Die Hintergründe und insbesondere die bestehenden Lücken werden in Kommentaren aufgezeigt.

2 GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGSBEREICH

Der EC 6 Teil 10 [1] enthält Definitionen und Grundlagen für den Brandschutz bei folgenden Mauerwerkskonstruktionen:

- tragende Wände und Pfeiler,
- tragende und raumabschließende Wände,
- nichttragende raumabschließende Wände.

Aussteifende Wände (zur Aussteifung von tragenden Wänden) werden analog zu DIN 4102 Teil 4 [4] definiert.

Brandwände ("fire walls" zum besonderen Schutz gegen Brandausbreitung zwischen Brandabschnitten) werden in [1] nicht behan-

delt; hier soll entsprechend den nationalen Anforderungen verfahren werden.

Bezüglich der Lastannahmen und Sicherheitsanforderungen wird auf den Eurocode Actions Teil 20 [3] verwiesen. Alle Regeln gelten jedoch nur für Normbrandbeanspruchung (ETK gemäß DIN 4102 Teil 2 bzw. ISO 834).

Kommentar:

Im Gegensatz zu den Ausführungen in Abschnitt 2.1 von [1] werden derzeit lediglich die Nachweisarten "Brandprüfung" und "anhand von Tabellen" behandelt. Es existieren weder Ansätze für vereinfachte, noch für genaue rechnerische Nachweisverfahren.

Der Abschnitt 3 von [1] regelt den Nachweis der Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerkswänden. Dabei wird eine einwandfreie Dimensionierung nach Teil 1 von Eurocode 6 vorausgesetzt.

Es werden, entsprechend DIN 4102 Teil 4 [4], verschiedene Wandarten nach ihrer Brandschutzfunktion unterschieden:

- raumabschließende Wände, die bei einseitiger Brandbeanspruchung eine Brandausbreitung verhindern und im Fall tragender Wände ihre Tragfähigkeit behalten,
- nichtraumabschließende Wände, die bei zwei- oder mehrseitiger Brandbeanspruchung ihre Tragfähigkeit behalten.

3 NACHWEIS DURCH BRANDPRÜFUNG

Hier wird kurz erwähnt, daß die Feuerwiderstandsdauer von Mauerwerksbauten durch Brandprüfungen erfolgen kann. Für die Durchführung der Brandprüfungen wird ganz allgemein auf CEN TC 127 verwiesen.

Kommentar:

Das Problem ist, daß bis zum heutigen Zeitpunkt die harmonisierten Prüfmethode nicht bekannt sind. Es kann daher nicht gesagt werden, ob die Prüfergebnisse nach den zukünftigen europäischen Prüfmethode mit den heutigen nationalen Prüfergebnissen vergleichbar sind.

Eine Prüfmethode für "Brandwände" in Anlehnung an DIN 4102 Teil 3 [5] wird nicht definiert. Es wird aber in einem Satz erwähnt, daß es ggf. gesonderte nationale Anforderungen für sogenannte "fire walls" geben kann.

4 NACHWEIS ANHAND VON TABELLEN

Es werden zur Zeit vom iBMB Tabellen in Anlehnung an DIN 4102 Teil 4 [4] auf der Basis von vorliegenden Prüfergebnissen und unter Berücksichtigung von BS 5628 Part 3 [6] erstellt. Spezielle Tabellen für "Brandwände" sind nicht vorgesehen.

Kommentar:

Es gibt z. Zt. noch keine harmonisierten europäischen Normen für die Baustoffe von Mauerwerk. Die Materialkennwerte (z. B. Abmessungen, Lochanteil, Rohdichte, Mörtelart) haben einen entscheidenden Einfluß auf das Brandverhalten von Mauerwerk. Im "kalten" Teil von Eurocode 6 werden nur die Fachausdrücke und nicht die Eigenschaften der Mauerwerksbaustoffe definiert.

Bei einigen Mauerwerksarten gibt es zwischen Großbritannien und der Bundesrepublik erhebliche Unterschiede in der erforderlichen Wanddicke für einzelne Feuerwiderstandsklassen. Einigung konnte bisher nicht erzielt werden, weil die Grundlagen bzw. Prüfvoraussetzungen, die zu den einzelnen Ergebnissen führen, bisher nicht im Detail bekannt sind.

Es gibt in Großbritannien sogenannte "party walls", die die Aufgabe von "Brandwänden" erfüllen sollen. Die Anforderungen an diese "party walls" werden jedoch jeweils im Einzelfall festgelegt, so daß es keine allgemein verwertbaren Unterlagen gibt.

5 RECHNERISCHE NACHWEISE

Weder national noch international gibt es derzeit ein rechnerisches Nachweisverfahren für das Brandverhalten von Mauerwerksbauten. Daher kann auch in EC 6 noch kein Verfahren genormt werden. Grundsätzlich wird jedoch die Möglichkeit eines rechnerischen Nachweises eröffnet, sofern anerkannte Verfahren vorliegen.

Kommentar:

Es ist dringend erforderlich, rechnerische Nachweisverfahren zu erarbeiten. Einerseits werden in allen anderen Eurocodes (EC 2 - EC 5) rechnerische Nachweise angeboten, so daß dies auch bei EC 6 erwartet werden kann. Andererseits wären rechnerische Möglichkeiten dringend erwünscht, um Unstimmigkeiten in den derzeit vorliegenden Prüfergebnissen zu analysieren und ggf. zu klären und um die bestehenden Lücken in den Bemessungstabellen auszufüllen.

6 WERTUNG UND OFFENE FRAGEN

Die Regelungen zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer bzw. -klasse von Mauerwerkswänden im Eurocode Nr. 6 Teil 10 sind bisher nicht befriedigend, da lediglich unvollständige Tabellen der aus DIN 4102 Teil 4 bekannten Art als Bemessungshilfen angeboten werden.

Für die zukünftige europäische Harmonisierung ist es erforderlich, eine Verbindung mit der Mauerwerksgruppe CEN TC 125 herzustellen, in der zur Zeit Materialkennwerte für die Mauerwerksbaustoffe im Rahmen der Kaltbemessung erarbeitet werden. Entsprechende Kennwerte bei erhöhten Temperaturen müßten dann als Grundlage für die Entwicklung praxismethodischer rechnerischer Nachweismethoden hergeleitet werden.

7 LITERATURHINWEISE

- [1] Hahn, C., Heseltine, B.: Eurocode Nr. 6 Part 10 - Structural Fire Design for Masonry. 5th Draft, July 1989

- [2] Coordination Group for Eurocodes: Eurocodes Part 10 - Structural Fire Design, Model Clauses for EC 2 - 6, EC/CG-fire-88/5rev3, May 1989

- [3] Coordination Group for Eurocodes: Part 20 of the Eurocode Actions - Actions on Structures exposed to Fire. EC/GG-fire-88/6rev6, June 1989

- [4] DIN 4102 Teil 4 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile. Ausgabe März 1981

- [5] DIN 4102 Teil 3 - Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Brandwände und nichttragende Außenwände; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe September 1977

- [6] BS 5628 Part 3 - Code of Practice for Use of Masonry. Materials and Components, Design and Workmanship. British Standard Institution, 1985

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 7: Materialkennwerte für Beton und Stahl
bei hohen Temperaturen

November 1989

1 VORBEMERKUNG

Die Formulierung von Vorschlägen für einheitliche, temperaturabhängige mechanische und thermische Materialgesetze der Konstruktionsbaustoffe Stahl und Beton in den EUROCODES 2 (Beton), 3 (Stahl) und 4 (Verbund), wurde einer internationalen Arbeitsgruppe übertragen, die sich aus den Herren Dr. Aribert, Frankreich, Dr. Dotreppe, Belgien, Dr. Haß, Bundesrepublik Deutschland, und Dipl.-Ing. Schleich, Luxemburg, zusammensetzte.

2 MECHANISCHE MATERIALGESETZE

2.1 Baustahl

Die temperaturabhängigen Materialgesetze für Baustahl werden in EUROCODE 3 und 4 in einer numerischen Darstellung präsentiert, die der von Rubert/Schaumann entspricht. Sie bestehen in allen Temperaturbereichen aus einem linearen Ast (Bereich I) mit temperaturabhängiger Steigung, an den sich eine Ellipse (Bereich II) anschließt, die ihrerseits in eine horizontale Gerade (Bereich III) übergeht. Kenngrößen für die temperaturabhängige Darstellung der Materialgesetze sind:

- der Anstieg des elastischen Astes,
- die Spannung am Ende des Bereiches I (Proportionalitätsgrenze, Übergang von der Geraden zur Ellipse) und
- die maximale Spannung.

Die temperaturabhängige Formulierung dieser Kennwerte ist aus englischen Versuchen an Stahlproben abgeleitet, unterscheidet sich aber nur geringfügig von Ergebnissen, wie sie im Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen" entwickelt wurden.

In den Anhängen A der EUROCODES wird die Möglichkeit genannt, die maximale Spannung bei Temperaturen 400 °C größer als den 1,0fachen Ausgangswert, d.h. größer als die Fließgrenze des Stahles bei Raumtemperatur, zu wählen. Dieser sogenannte "Strain/Hardening"-Effekt bewirkt, daß die Stahlspannungen bei 20 % Dehnung noch einmal auf höhere Werte ansteigen. Auch bei Raumtemperatur ist dieser Effekt bekannt, er wird dort aber im Regelfall nicht zur Bemessung herangezogen.

2.2 BEWEHRUNGSSTAHL

Da sich nach allgemeiner Auffassung die temperaturabhängigen mechanischen Materialkennwerte von Baustahl und dem heute überwiegend verwendeten naturharten Betonstahl nur gering unterscheiden, einigte sich die Arbeitsgruppe darauf, die temperaturabhängigen mechanischen Materialgesetze von Baustahl auch für naturharten Betonstahl zu verwenden.

Für kaltverformten Betonstahl, wie er in der Vergangenheit häufiger verwendet wurde und heute noch in Betonstahlmatten zur Anwendung kommt, hat man die im Sonderforschungsbe- reich 148 "Brandverhalten von Bauteilen" erarbeiteten Mate- rialgesetze so umgearbeitet, daß sie bei gleicher äußerer Form in der Rubert/Schaumann-Formulierung dargestellt werden können.

2.3 SPANNSTÄHLE (NUR EUROCODE 2)

Es wurde versucht, auch für die Spannstähle temperatur- abhängige Kennwerte (siehe Abschnitt 2.1) zu entwickeln, so daß die Materialgesetze auch in der Rubert/Schaumann-For- mulierung eine Form erhalten, die der im Sonderforschungsbe- reich 148 "Brandverhalten von Bauteilen" erarbeiteten Fassung entspricht. Ob die gewählten Kennwerte diese Bedingung er-

füllen, ist noch zu überprüfen. Die Arbeitsgruppe beschränkte sich zunächst auf die Angabe von Kennwerten für zwei Spannstahlsorten: kaltgezogene Spanndrähte oder Litzen und vergütete Spanndrähte.

2.4 BETON

Die mechanischen Materialgesetze von Beton wurden im ansteigenden Ast entsprechend der im Sonderforschungsbereich 148 "Brandverhalten von Bauteilen" von Schneider entwickelten Formulierung (kubische Parabel) dargestellt. Im abfallenden Ast werden zwei alternative Möglichkeiten angegeben:

- die Weiterführung der kubischen Parabel über den Scheitelpunkt der Kurven hinaus oder
- ein linearer Abfall vom Scheitelpunkt der Kurven auf einen definierten Grenzwert der Dehnung, bei dem keine Spannungen mehr aufgenommen werden können.

Die Kurven werden durch drei temperaturabhängige Kennwerte beschrieben:

- die maximale Druckfestigkeit,
- den Dehnwert zugehörig zur max. Druckfestigkeit und
- die maximal aufnehmbare Dehnung, bei der im abfallenden Ast keine Spannungen mehr aufgenommen werden können.

Die aufnehmbaren Zugspannungen im Beton werden in der Regel nicht zur Ermittlung der Tragfähigkeit herangezogen.

Die Arbeitsgruppe einigte sich bei der Formulierung der maximal aufnehmbaren Druckfestigkeit auf einen Kompromiß zwischen der belgisch/luxemburgischen Auffassung und der von der deutschen Seite vertretenen Auffassung. Beide Ausgangswerte weichen nur geringfügig voneinander ab.

Die maximalen Dehnwerte wurden von der belgisch/luxemburgischen Seite vorgegeben; sie haben für die deutsche, auch im Bereich des abfallendem Ast durchlaufende Formulierung keine Bedeutung.

Große Unterschiede ergaben sich bei den Vorschlägen für die zu den maximalen aufnehmbaren Spannungen gehörenden Dehnwerte. Obwohl sich alle Mitglieder der Arbeitsgruppe einig waren, daß die sogenannten Hochtemperatur-Kriecheinflüsse in der Formulierung der Arbeitslinien berücksichtigt werden müssen, werden die Betonarbeitslinien unterschiedlich ermittelt: im Programmsystem CEFICOSS aus Warmdruckversuchen (1. Aufheizen, 2. Belasten bis zum Bruch) und in den deutschen Formulierungen aus Warmkriechversuchen (1. Belasten, 2. Aufheizen bis zum Bruch). Hierdurch ergeben sich große Unterschiede in der temperaturabhängigen Steifigkeit des Betons. In der deutschen Formulierung erreichen die Spannungs/Dehnungs-Beziehungen schon ab 100 °C ihre Maximalwerte bei deutlich höheren Dehnungen als im Programmsystem CEFICOSS.

Mit dem Programmsystem CEFICOSS (steifere Betonarbeitslinien) wurden zahlreiche Brandversuche an Stahl- und Verbundbauteilen zutreffend nachgerechnet; mit dem Programmsystem STABA-F (weichere Betonarbeitslinien) konnten Brandversuche an Stahlbeton sowie Stahl- und Verbundbauteilen mit vergleichbarer Genauigkeit nachvollzogen werden.

Die Arbeitsgruppe einigte sich auf einen Kompromißvorschlag, indem sie in den Textentwurf der EUROCODES 2 und 4 die Mittelwerte der beiden Formulierungen übernahm. Die oberen und unteren Grenzwerte werden jeweils in einem Anhang erwähnt. Die Ursachen für die unterschiedliche Darstellung werden angegeben; eine endgültige Klärung, welche Formulierungen zutreffen, wird aber dem Urteil von Fachleuten nach der Nachrechnung von repräsentativen Bauteilen (siehe Teil 8 dieses Berichtes) und einer möglichen CEN-Norm, die sich mit der Ermittlung tempera-

turabhängiger mechanischer Materialgesetze befassen soll, überlassen.

Alle Formulierungen gelten sowohl für quarzhaltigen als auch für kalkhaltigen Betonzuschlag.

3 THERMISCHE MATERIALGESETZE

Bei der Formulierung der thermischen Materialgesetze für

- die thermische Dehnung,
- die spezifische Wärmekapazität,
- die Wärmeleitzahl und
- die spezifische Dichte

der Konstruktionsbaustoffe Baustahl, Betonstahl, Spannstahl und Beton, ergaben sich innerhalb der Arbeitsgruppe keine wesentlichen Auffassungsunterschiede. Alle verabschiedeten Formulierungen sind mit dem deutschen Standpunkt vereinbar.

Kommentar:

Durch die Änderung wesentlicher Materialgesetze gegenüber den Annahmen in den bekannten und abgesicherten Programmsystemen ist es erforderlich, die neuen Formulierungen auf ihre Gültigkeit hin zu überprüfen. Dies kann durch vergleichende Nachrechnung durchgeführter Versuche oder repräsentativer Bauteile (siehe Teil 8) geschehen. Eine Abschätzung der Auswirkungen der Einflüsse veränderter Kennwerte ist aufgrund der vielfältigen Abhängigkeiten vorab nicht möglich.

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 8: Konzept für Vergleichsrechnungen

November 1989

1 ZIELSETZUNG

Zur Verifizierung der in den Teilen 10 der Eurocodes 2 bis 6 geregelten brandschutztechnischen Nachweisverfahren sind umfassende, systematische Vergleichsrechnungen zwingend erforderlich. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf eine Absicherung der Neuformulierungen für die Materialgesetze (gemäß Teil 7 dieses Berichtes). Die Vergleichsrechnungen sollen anhand ausgewählter repräsentativer Anwendungsbeispiele erfolgen. Das vorliegende Konzept basiert auf Vorüberlegungen eines Arbeitskreises im NABau-Unterausschuß 02.34.19 "Rechnerische Nachweise", dem folgende Mitarbeiter angehörten: Dr.-Ing. Bock, Dipl.-Ing. Dorn, Dr.-Ing. Haß, Dipl.-Ing. Krampf, Dr.-Ing. Richter und Dr.-Ing. Schaumann. Der Bericht wurde von Dr.-Ing. E. Richter unter Mitwirkung von Dr.-Ing. R. Haß verfaßt.

Zunächst müssen die Anwendungs- und Gültigkeitsgrenzen der Rechenprogramme überprüft bzw. festgelegt werden. Zu diesem Zweck wird ein Anwendungsraum für die Rechenprogramme beschrieben, in dem eine hohe Zuverlässigkeit der Rechenergebnisse nachgewiesen ist. In einem weiteren Schritt ist dann festzulegen, wie weit die Rechenprogramme über den nachgewiesenen Anwendungsraum hinaus noch vertrauensvolle Ergebnisse liefern. Damit wird die Möglichkeit geschaffen, Rechenprogramme auch für solche Fälle einzusetzen, für die keine Erfahrungen durch Brandversuche vorliegen. Dies trifft z.B. für Bauteile zu, die entweder größer sind als die zur Verfügung stehenden Brandkammern oder die mit angrenzenden, unter Umständen nicht direkt vom Brand betroffenen Bauteilen zusammenwirken.

Die Durchführung von Vergleichsrechnungen beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- a) Vergleich programmrechnerischer Ergebnisse mit Ergebnissen, die anhand geschlossener Lösungsansätze ermittelt wurden,

- b) Vergleich der Rechenergebnisse von unterschiedlichen Programmen und
- c) Vergleich programmrechnerischer Ergebnisse mit Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen.

Das Vorgehen nach a), d.h. Vergleich programmrechnerischer Ergebnisse mit Ergebnissen, die anhand geschlossener Lösungsansätze ermittelt wurden, ist nur für ein sehr begrenztes Anwendungsspektrum der Programme möglich. Damit können jedoch an ausgesuchten Beispielen, die nicht immer ganz realitätsnah sein müssen, die Programme auf ihre physikalische Korrektheit überprüft werden. Im Fall der brandbeanspruchten Bauteile müssen sich diese Vergleichsrechnungen aufgrund der vorhandenen geometrischen und physikalischen Nichtlinearitäten auf sehr ausgesuchte Beispiele beschränken, die mehr am Rand des vorgesehenen Anwendungsspektrums der Rechenprogramme liegen. Trotzdem erscheint dieser Vergleich im ersten Schritt notwendig, da er wichtige Hinweise zur Klärung von Unstimmigkeiten bei einem Vergleich der Ergebnisse nach b) oder c) liefern kann.

Zur Durchführung des Arbeitsschrittes c) ist die Auswahl repräsentativer Tragwerke oder Bauteile aus den unterschiedlichen Baustoffen erforderlich (vgl. Abschnitt 2). Für diese Bauteile müssen Ergebnisse aus Brandversuchen vorliegen oder es müssen zusätzliche Versuche durchgeführt werden. Um den Umfang der vergleichenden Berechnungen möglichst klein zu halten, sollten die ausgewählten repräsentativen Bauteile gleichzeitig die Grundlage für den Arbeitsschritt b) bilden.

Ein Vergleich der Ergebnissen von unterschiedlichen Programmen (Arbeitsschritt b) ermöglicht es, "Ausreißer"-Programme zu erkennen, deren Ergebnisse deutliche, systematische Abweichungen von den Ergebnissen anderer Programme zeigen. Solche Abweichungen müssen aber nicht unbedingt auf einem Programmfehler beruhen, sie können auch durch unterschiedliche mechanische

Modelle, die den Programmen zugrunde liegen, oder durch unterschiedliche Detaillierungsgrade bei der Parametererfassung bedingt sein. Um eine solche Programmklassifizierung vornehmen zu können, sollte der Vergleich von Rechenergebnissen unterschiedlicher Programme einem Vergleich von Rechen- und Versuchsergebnissen nach c) vorgeschaltet werden.

Der Vergleich zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Ergebnissen (Arbeitsschritt c) belegt, inwieweit die rechnerischen Nachweise an Erfahrungen aus der Brandprüfpraxis anknüpfen. Die Abweichungen zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Ergebnissen können als Maß für die Güte des Rechenmodells dienen; solches Vorgehen bedingt aber, daß die Parameter, die auf experimenteller und rechnerischer Seite die Ergebnisse beeinflussen, möglichst genau definiert und direkt vergleichbar sind.

Von der Versuchsseite betrifft dies die Parameter:

- Versuchsdurchführung (Auflagerbedingungen, Belastungseintragung, Brandraumtemperaturverlauf, usw.),
- Versuchskörperbeschaffenheit (Baustoffkennwerte, geometrische Größen des Bauteils (Länge, Querschnittsabmessungen, Lage der Bewehrung) und
- Beschreibung der Meßwerte (geometrische Lage der Meßpunkte, Genauigkeit der Meßelemente).

Seitens der Rechenprogramme müssen die folgenden Parameter möglichst genau definiert sein:

- mechanisches Modell, das zur Abbildung der Wirklichkeit benutzt wird und
- Beschreibung der erforderlichen Eingabeparameter.

Auch bei vollständiger Erfüllung der vorgenannten Bedingungen müssen die Ergebnisse aus Versuch und begleitender Rechnung kritisch untersucht und gewertet werden. Ein Grund dafür sind zum einen die auftretenden Streuungen bei den Versuchsergebnissen infolge unvermeidbarer Abweichungen zwischen Ist- und geplantem Sollzustand des Bauteils und zum anderen die Tatsache, daß im Versuch nur eine relativ kleine Auswahl der Parameter gemessen werden kann, die das Trag- und Verformungsverhalten brandbeanspruchter Bauteile beeinflussen. Zur Zeit beschränken sich die Messungen während des Brandversuchs im wesentlichen auf die Temperaturzustände im Brandraum und im Bauteil sowie auf Bauteilverformungen und Verlauf von Stütz- und Auflagerkräften, wobei aber deren Messung an nicht direkt vom Brand beanspruchten Bauteilstellen vorgenommen werden muß. Die zur Klärung und Kontrolle der komplizierten Beanspruchungszustände im Bauteilinneren erforderliche Gegenüberstellung von Spannungszuständen mit Hilfe gemessener und berechneter spannungserzeugender Dehnungen ist zur Zeit nur sehr bedingt möglich [1]. Die experimentelle Bestimmung der spannungserzeugenden Dehnung bei Brandeinwirkung bereitet noch erhebliche Schwierigkeiten und wurde bisher nur in wenigen Fällen durchgeführt, wobei die Messungen zudem noch hohe Fehlerquoten aufwiesen [2,3].

2 Bisherige Vergleichsrechnungen

Ein systematischer Vergleich entsprechend den in Abschnitt 1 aufgezählten Arbeitsschritten a) bis c) ist bisher nur vereinzelt durchgeführt worden. Die meistens Vergleichsrechnungen beschränken sich auf den Arbeitsschritt c). Es werden experimentell und rechnerisch ermittelte Ergebnisse gegenübergestellt. Häufig sind die Parameter, welche die Versuchs- und Rechenergebnisse beeinflussen, unvollständig beschrieben. Eine Ursache hierfür ist, daß zum Teil Versuche und Rechnungen nicht zeitparallel geplant und durchgeführt wurden. Die fol-

gende Zusammenstellung beschränkt sich deshalb auf eine Auswahl von Literaturstellen, die eine möglichst vollständige Versuchs- und Programmbeschreibung enthalten.

In [1] werden experimentell und rechnerisch ermittelte Ergebnisse für brandbeanspruchte Stahlbeton-, Verbund- und Stahlstützen gegenübergestellt. Neben der ausführlichen Versuchsdarstellung enthält diese Arbeit auch eine detaillierte Beschreibung der Grundlagen des verwendeten Rechenprogramms (STABA-F). Die Ergebnisse von Versuch und Rechnung werden als Vergleich der gemessenen und berechneten Versagenszeiten in Form von Tabellen und Zeichnungen dargestellt.

Für vorgespannte Bauteile werden in [5,6] Ergebnisse aus Brandversuchen und Rechnungen gegenübergestellt. In [5] werden für balkenförmige Bauteile mit Spannbett-Vorspannung die mittleren Temperaturen im Spannstahl im Augenblick des Versagens verglichen; in [6] werden für Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund neben den Temperaturen im Spannstahl und den Durchbiegungen im Augenblick des Versagens vor allen Dingen die gemessenen und berechneten Veränderungen der Vorspannkkräfte dargestellt.

Für scheiben- und plattenförmige Bauteile werden in [7,8] Ergebnisse aus Versuchen und Rechnungen verglichen. In [7] werden dabei schwerpunktmäßig die entstehenden Zwangkräfte bei Behinderung der Längsdehnung des beflamnten Deckenteils durch umgebende kalte Flächenteile betrachtet und in [8] die Veränderung des Trag- und Verformungsverhaltens, wenn an den Auflagerlinien des Versuchskörpers die freie Verformbarkeit eingeschränkt wird.

Im Gegensatz zur umfangreichen Literatur über Vergleiche von experimentell und rechnerisch ermittelten Ergebnisse an statisch bestimmten Bauteilen liegen nur vereinzelte Ergebnisse über statisch unbestimmt gelagerte Bauteile vor. Die Ursache

hierfür sind u.a. die sehr hohen Versuchskosten und die Tatsache, daß diese Versuche aufgrund der dafür benötigten großen Versuchsstände nur in sehr wenigen Versuchsanstalten ausgeführt werden können. Unter Berücksichtigung des vorgesehenen Anwendungsspektrums der Rechenprogramme, das auch die Beurteilung von Bauteilen vorsieht, für die keine Versuchsergebnisse vorliegen (s. Abschnitt 1), ist aber der Vergleich von Versuchs- und Rechenergebnissen von statisch unbestimmten Konstruktionen besonders aufschlußreich. In dieser Hinsicht sind bisher überwiegend durchlaufende Balken- und Rahmenkonstruktionen untersucht worden.

Für rotationsbehinderte Plattenstreifen aus Stahlbeton werden in [9] Versuchs- und Rechenergebnisse verglichen; dabei wird auf ein Rechenprogramm zurückgegriffen, das in den USA für Rahmentragwerke entwickelt worden ist [10] und das durch neu entwickelte Materialgesetze modifiziert wurde.

In [11] wird über experimentelle Ergebnisse an einhüftigen Rahmen und deren rechnerische Begleitung berichtet; es werden die im Brandversuch gemessenen Verformungen und Auflagerkräfte mit den entsprechenden Rechenwerten verglichen. Das für die rechnerische Begleitung verwendete Programm wird in [12] beschrieben.

Ergebnisse aus Vergleichsrechnungen von Versuchen an stählerne Einzelbauteilen und Rahmensystemen werden in [13] dargestellt. Die Ergebnisse sind in Diagrammen zusammengestellt, aus denen die kritische Temperatur in Abhängigkeit von Lastausnutzungsgrad und Schlankheit abgelesen werden kann.

Für Verbundstützen, -balken und -rahmen werden in [14] gemessene und berechnete Verformungs- und Kraftverläufe angegeben.

In [15] wird über die Durchführung eines "Benchmark"-Tests berichtet. Im Rahmen dieses Tests werden weltweit Rechen- und Versuchsergebnisse verglichen, wobei die Ergebnisse der in England durchgeführten Brandversuche an zwei statisch bestimmt gelagerten Plattenstreifen und an einer Stahlstütze den beteiligten "Rechnern" nicht bekannt sind. Gegenübergestellt werden die Temperaturentwicklung an ausgezeichneten Punkten der Versuchskörper, die Verformung der Versuchskörper und die Versagenszeiten. Die Ergebnisse des Benchmark-Tests sollen etwa Anfang 1990 veröffentlicht werden.

3 EMPFEHLUNGEN

Die Konzeption für Vergleichsrechnungen muß die Arbeitsschritte a) bis c) des Abschnitts 1 in Verbindung mit repräsentativen Bauteilen beinhalten.

Die repräsentativen Bauteile sind so festzulegen, daß möglichst eindeutige Versagensmechanismen auftreten, wie Versagen der Zugbewehrung, Versagen der Druckzone, Stabilitätsversagen, usw. Örtliches Versagen, wie zerstörende Betonabplatzungen, Schubbruch oder Durchstanzen sind durch konstruktive Maßnahmen auszuschließen.

Die Programme sind zunächst in Gruppen zu unterteilen, die eine baustoff- (Stahlbeton, Stahl, Verbund) und bauteilspezifische (Balken, Stütze, Platte, Rahmen) Einteilung ermöglichen. Einige Programme können dabei selbstverständlich in mehreren Gruppen genannt werden. Die Vergleichsrechnungen werden dann jeweils für Programme einer Gruppe durchgeführt.

Zunächst werden die Rechenprogramme markiert, die nicht in der Lage sind, Ergebnisse entsprechend geschlossener analytischer Lösungsansätze zu produzieren (Arbeitsschritt a). Große Abweichungen zwischen der analytischen Lösung und dem pro-

grammberechneten Ergebnis können auf Fehler im Rechenprogramm hindeuten, wie z.B. falsche physikalische Grundlagen, große Ungenauigkeiten im Bereich von Iterationsprozessen, usw. Die markierten Rechenprogramme, die die Verifikation nicht bestanden haben, werden für die weiteren Vergleichsrechnungen nicht mehr berücksichtigt.

Beispiele für die Rechenprogramm-Verifikation sind:

- Ermittlung der Knicklast für den sogenannten "Euler-Stab"
 $P_k = (\pi / s_k)^2 EI,$
- Ermittlung der Verformungsfigur aus der Biegegleichung des Stabes $[EI(x) w'''] = q(x)$ und
- Ermittlung der elastischen Beullast der allseitig gelenkig gelagerten Platte [16,17].

Erforderliche Vereinfachungen für diese Berechnungen sind u.a.:

- Annahme eines homogenen Temperaturfeldes im Querschnitt, d.h. Vernachlässigung des Temperaturgradienten auf dem Temperaturniveau: $T = T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const}$ oder
 $T = T_1 = \text{const};$
- Annahme eines isotropen, homogenen Werkstoffs;
- Annahme eines linearen Elastizitätsgesetzes.

Rechenprogramme, deren Ergebnisse durch systematische Abweichungen im Vergleich mit Ergebnissen von anderen Rechenprogrammen auffallen (Arbeitsschritt b) werden zunächst zum Zweck der Klärung dieser Abweichungen zurückgestellt. Für die Beurteilung der Programme untereinander sind neben der Erfassung und dem Vergleich der Rechenergebnisse auch die Kenntnis des

benutzten Rechners, der benötigten Rechenzeit, der erforderlichen Speicherplatzbelegung u.ä. hilfreich.

Vor Beginn der Vergleichsrechnungen (Arbeitsschritt c) muß das Ziel der Rechnungen, d.h. der Vergleichsmaßstab, möglichst genau festgelegt werden. Z.B. ist es für die Beurteilung der Rechenergebnisse von Bedeutung, ob als Kriterium die Versagenszeit, die Temperatur in einem ausgezeichneten Punkt des Querschnitts und/oder die Verformung des Bauteils herangezogen wird. Entsprechend der Zielgröße der Brandprüfung wird empfohlen, den Vergleich in erster Linie auf die Versagenszeit, d.h. die Feuerwiderstandsdauer, abzustimmen. Bei Stahlbauteilen und statisch bestimmt gelagerten, biegebeanspruchten Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen, d.h. bei Bauteilen, bei denen das Versagen mit dem Erreichen einer bestimmten Temperatur im Bauteilquerschnitt eingeleitet wird, ist zusätzlich der Vergleich der Temperatur im Stahl bzw. in der Bewehrung im Augenblick des Versagens notwendig.

Die Auswertung der Arbeitsschritte a) bis c) ergibt eine Rangfolge der Rechenprogramme, wobei der höchste Rang von den Programmen eingenommen wird, die im Arbeitsschritt c) die beste Übereinstimmung zwischen Rechen- und Versuchsergebnis erbracht haben. Bei der Bewertung der experimentell und rechnerisch ermittelten Ergebnisse ist zu beachten, daß das derzeit akzeptierte Sicherheitsniveau auf der Klassifizierung des ungünstigeren Ergebnisses aus zwei gleichartigen Prüfungen basiert. Nachweise durch Berechnung, die das gleiche Sicherheitsniveau erreichen sollen, müssen deshalb durch Sicherheitselemente korrigiert werden. In [4] werden z.B. die dafür erforderlichen Werte für Stützen aus Beton und Stahl genannt.

4 LITERATURHINWEISE

- [1] Richter, E.: Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spannbetonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 80, 1987.

- [2] Kiel, M.: Dehnungsmessungen bei Temperaturen unter 150 °C und Rißverfolgung in Betonquerschnitten. Beitrag des Teilprojekts A2 im Arbeitsbericht 1981 - 1983 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, 1983.

- [3] Richter, E; Sager, H.: Erprobung von Hochtemperatur-Dehnmessstreifen. Beitrag der Teilprojekte A/B im Arbeitsbericht 1978 - 1980 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, 1980.

- [4] Haß, R.: Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 69, 1986.

- [5] Richter, E.: Spannbetonbauteile unter Brandbeanspruchung - Versuche und theoretische Begleitung. Bericht aus dem Teilprojekt A1 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, 1987.

- [6] Kordina, K.; Richter, E.; Dorn, Th.: Untersuchung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund. Unveröffentlichter Forschungsbe-

richt des Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1989.

- [7] Walter, R.: Partiiell brandbeanspruchte Stahlbetondecken-Berechnung des inneren Zwanges mit einem Scheibenmodell. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 47, 1981.
- [8] Wiese, J.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter partieller Brandbeanspruchung. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 84, 1988.
- [9] Anderberg, Y.: Fire-exposed hyperstatic concrete structures - an experimental and theoretical study. Bulletin 55, Lund, Institute for Technology, 1976.
- [10] Becker, J.; Bresler, B.: FIRES-RC, A Computer Program for the Fire Response of Structures - Reinforced Concrete Frames. Report No. UCB FRG 74-3, Fire Research Group, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1974.
- [11] Haksever, A.: Stahlbetonrahmentragwerke unter praxisgerechten Randbedingungen - Versuche und rechnerische Analyse. Beitrag des Teilprojekts A1 im Arbeitsbericht 1978 - 1980 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Technische Universität Braunschweig, 1980.
- [12] Haksever, A.: Zur Frage des Trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen im Brandfall. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 35, 1977.

- [13] Schaumann, P.: Zur Berechnung stählernder Bauteile und Rahmentragwerke unter Brandbeanspruchung. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 84-4 des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1984.

- [14] Franssen, J.-M.: Etude du comportement au feu des structures mixtes acier - beton. Dissertation. Universite de Liege (Belgien), 1986.

- [15] Towler, K.: Numerical Modelling of Structures at Elevated Temperatures. Unterlagen zum Bench Mark Test. Fire Research Station, Borehamwood, England, 1988.

- [16] Kiel, M.: Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbetonflächentragwerke unter Einschluß von Brandbeanspruchung. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 81, 1987.

- [17] Girkmann, K.: Flächentragwerke. Springer-Verlag; Wien, 1956.

Abschlußbericht

Stellungnahme zu rechnerischen Nachweisverfahren
für die Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen
im Rahmen der Bauteilklassifizierung

Teil 9: Kurzkomentare zu den Eurocode-Entwürfen
(in Englisch)

November 1989

Comments

on the present drafts of the EUROCODE Parts on Fire Safety Design

Part 20 of the EC Actions "Actions on Structures exposed to Fire"

1. Completeness of regulations

Part 20 of the EC Actions (Draft April 1989) gives a more or less complete framework for basic principles and the load assumptions in fire protection engineering design.

Safety elements - safety factors γ and combination factors ψ - shall be taken according to the other parts of the EC Actions. As to the values of the combination factors ψ , a complete definition within Part 20 (instead of Parts 6, 7 and 8) would be more appropriate. For it is not yet proven that the values from usual design can be directly applied in fire safety design, too.

2. Consistency of safety requirements

The numerical values of the safety elements should be derived by the help of reliability methods for representative fire design situations and defined levels of reliability according to EC 1. The reliability levels depend on the particular occupancy and the respective probability of occurrence of the required standard fire of given duration.

The values according to Parts 6 to 8 are valid only if this probability is less than about $10^{-3}/y$.

Therefore it seems necessary to define the application limits of the values given in Part 20 and to say how they have to be modified if one exceeds the limits (cf. Discussion notes).

3. Open questions

Due to the lack of comparison calculations, it is not yet clear whether the regulations for reducing mechanical actions by ψ - values yield similar results like the present design procedure based on test results with full service loads.

Therefore it is proposed to select a number of representative structures in order to perform such calibration calculations. This is mainly important for verifying other load levels than 100 % of the service load. The general reduction of the resulting design action E_d by a factor 0.6 is valid only for design situations with percentage of variable actions above 30 % (of the total actions). Again, the definition of application limits is essential.

The NABau commission 02.34.19 will perform such calibration calculations for different materials and structures within the next few months. In addition, the safety requirements in Part 20 will be checked according to section 2 of this comment. The results will be presented in connection with the national enquiry.

Members of the Working Group:

Dipl.-Ing. Hertel

Prof. Dr.-Ing. Hossler (Reporter)

Dr.-Ing. Kersken-Bradley

Dr.-Ing. Wesche

EUROCODE 2 - Concrete Structures

1. Evaluation by computer aided calculation

1.1 Introduction

In Part x of EC 2 (Draft January 1989) the following structural models are mentioned with regard to analytical assessment:

- structural members,
- subassemblies and
- entire structures.

Calculation models are distinguished as follows

- thermal analysis of the structure for determining the temperature distribution within the cross-section and along members,
- structural analysis for determining the structural response.

For thermal analysis either the finite difference method or the finite element method may be used.

EC 2 Part x does not refer to any standards of the programs, no limitations for the application are given. It seems to be necessary to give more detailed information about the boundary conditions of the program used, e.g.

- maximum size and shape of the network (discretization) within the cross-section and along the member,
- maximum size of the time steps,
- special effects which must be taken into account:
e.g. transient creep strains, 2nd order theory,

- support conditions (depending on the structure).

It should be taken into consideration that some details about boundary conditions are dependent on the type of program which is used (finite difference or finite element method), i.e. the given details must be connected with the type of program. Sometimes it could be advantageous to describe the effect of the boundary condition which must be kept by computation.

1.2 Thermal analysis

EC 2 Part x contains the basic input data for calculation of heat transfer and temperature distribution within the cross-section. Most of the data are given in form of graphs, but without mathematical modelling.

Most of the graphs seem to be close to the "German" ones, nevertheless it is necessary to check them by comparative calculation.

1.3 Structural analysis

EC 2 (App.) contains the basic input data for calculation of load bearing and deformation behaviour of structural elements exposed to fire. Most of the data are given in form of graphs, but without mathematical modelling.

Most of the graphs seem to be close to the "German" ones, nevertheless it is necessary to check them by comparative calculation.

1.4 Recommendation

Both thermal and structural analysis need a lot of input data for computer aided calculation. All these data must be described in form of temperature-dependent relations, most of

them with a separate function or at least with special coefficients for different materials (concrete, reinforcing steel, prestressing steel), i.e., the codes will be loaded with extensive, sometimes complicated formulas and tables for coefficients. To prevent this the mathematical formulation - maybe several possibilities - and all the necessary tables with coefficients should be given in a "Supporting Document" but not directly in the code.

2. Evaluation by simplified calculation methods

The fire engineering design procedure presented in EC 2 Part x is valid for reinforced concrete cross-sections of beams and slabs, exposed to bending moment and axial load.

The analytical method can easily be used. Comparative calculations with computer aided calculation methods showed that the results of the simplified method are always on the safe side /1/. The field of application of the simplified calculation method is nearly the same which is covered by the German Code DIN 4102 Part 4.

Reference

- /1/ Stiller, J.-H.: Untersuchungen zur vereinfachten Berechnung brandbeanspruchter Stahlbetonbauteile. Beitrag des Teilprojektes A3 im Arbeitsbericht 1984 - 1986 des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen", Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig, 12/1987.

Members of the Working Group:

Dipl.-Ing. Krampf

Dr.-Ing. Richter (Reporter)

Dr.-Ing. Seiler

EUROCODE 3 - Steel Structures

Comments to the following sections of Eurocode 3 Part x (Draft January 1989):

2.3 Heat transfer to steel

In Germany test results and calculations showed that there is no difference between heat attack of external steelwork outside the building enclosure and heat attack of internal steelwork inside the building enclosure. Therefore it does not seem to be reasonable to distinguish between internal and external steelwork as far as heat transfer from fire to steel is concerned.

4. Thermo-mechanical material properties

4.1 Steel

4.1.1 Strength and deformation properties

In Germany stress-strain curves for structural steel at elevated temperatures were developed by different research groups. The stress-strain curves based on a lot of experimental und theoretical investigations and computer simulations of the load bearing and deformation behaviour of steel components under fire action. Most of the stress-strain relationships, though developed by different groups of researchers, are in a good agreement but different from those used in EC 3.

To define the stress-strain properties of structural steel by a mathematical function only represents a restriction. It may be more advantageous to prescribe the stress-strain relationship by a number of pairs of values and to leave it up

to the engineer to choose the appropriate approximation needed for his computer program (cf. comment to EC 2, sect. 1.2 and 1.3).

4.1.2 Thermal elongation

In Germany, slightly different values are used.

4.1.3 Specific heat

In Germany, slightly different values are used.

4.1.4 Thermal conductivity

The thermal properties of an entire steel component have to be derived from a standard fire test according to ISO 834 by transforming the heat transfer equation in chapter 5.2.2.1 in such a way that the coefficient of heat transfer can be derived directly from the test result. Whereas the specific heat (see chapter 4.1.3) may be determined directly by a calorimetric method. The numerical values in Germany are slightly different from EC 3.

4.2 Insulation Materials

One must make sure that the steel-temperatures measured during the fire test are not contrary to the calculated steel-temperatures based on the thermal properties of the insulation material determined in accordance with the CEN procedure. Therefore, the thermal properties should be derived from a standard fire test according to ISO 834 by transforming the heat transfer equation in chapter 5.2.2.2 in such a way, that the thermal conductivity can be derived directly from the test result. The specific heat may be determined directly by a calorimetric method.

5. Assessment methods

5.1 Introduction

The failure criteria of building components have to be defined either by the critical steel temperature or by the critical rate of deformation or the collapse of the specimen.

5.2 Simple calculation method

This method is based on the critical steel temperature. As far as beams are concerned the simple calculation method only takes into account the degree of redundancy whereas with columns only the centrally loaded ones are mentioned. This method is very rough; more accurate ways to assess the critical steel temperature of building components have to be developed.

The temperatures of the steel components should be recalculated from the results of standard fire tests by interpolation or extrapolation, respectively (see statement to chapter 4.2). It is important to define the very point in the cross-section which the critical temperature is referring to. This hold especially for steel beams with a thermal gradient in the cross section.

5.3 Advanced calculation methods

5.3.1 Temperature distribution

It will be impossible to simulate accurately the thermal behaviour of protected steel components, because it is not possible to describe theoretically the fire behaviour (cracks, moist, gaps, shrinkig) of every type of cladding. Therefore it would be prefereable to use only the results of the simple thermal calculation method (see chapter 5.2).

5.3.2 Mechanical behaviour

no remarks

5.3.3 Validity of the advanced calculation method

To check the validity of the different advanced calculation methods it is necessary to develop so called "calibrating frames". They may be used as "Calibrating systems" in order to check the reliability of different computer programs. This method has already applied in Germany for steel-structures at room temperature.

Members of the Working Group:
Dr.-Ing. Bock (Reporter)
Dipl.-Ing. Dorn
Dr. Witte

EUROCODE 4 - Composite Structures

The sections of the current draft of Eurocode 4 Part x (Draft February 1989) are discussed as follows:

1. Design Diagrams (graphical or numerical values of admissible loads)

Design diagrams in graphical or numerical representation are not suitable to appear in codes, because they only cover a very small range of application. To be general the number of tables had to be too much extended.

2. Design Tables (giving design regulations)

The better way to give regulations for structures in case of a fire are design tables, which give for instance values for minimum section sizes, the concrete cover of the reinforcement or the steel sections. A proposal for these design diagrams for composite columns and beams is added to this paper, similar to the tables which is part of EC 4 Part x.

3. Simplified Calculation Methods

a. A simplified calculation method for composite columns concreted between the flanges is given in the EC 4 Part x-draft. The procedure of this method is similar to the simplified calculation in the cold state. This methods yields results on the safe side if the range of application is fixed as follows:

- fire resistance classes from R 30 to R 120,
- central loading and
- maximum column height 4,50 m.

- b. There is a simplified calculation method for composite beams concreted between the flanges, which has the same theoretical basis as the forementioned method for columns (see 3a). It should be mentioned in EC 4 Part x, if the method for columns is applicable for beams, too.
- c. A simplified calculation method for metal deck floors is given in the EC 4 Part x - draft. It is possible to design a slab according to both the load-bearing and the insulation criterion. This method gives results on the safe side if the following restrictions are observed:
- the minimum thickness of the slab (distance between the upper flange of the steel sheet and the concrete surface at the upper floor h_2) should not be $h_2 \geq 60$ mm,
 - the relation between the maximum thickness (distance between the bottom flange and the concrete surface at the upper floor, h_1) and the minimum thickness (distance between the upper flange and the concrete surface at the upper floor, h_2) should be restricted to $h_1/h_2 \leq 3$ and
 - appropriate measures. to avoid failure as a result of extensive deflection of pliable supports (steel or composite beams), for instance concreting the gap between the supporting beam and the steel sheet.

If these restrictions are not taken into account a sudden and early failure of the compression zone can be observed.

4. Basic Principles for a Precise Thermal and Mechanical Analysis

The principles for the precise thermal and analytical analysis of EC 4 Part x should be in line with those of EC 2 and EC 3. Minimum requirements of the precise calculation methods are

- the thermal material laws have to include the effect of the vaporization of the water in a suitable way,
- the stress/strain-relationships have to include the effect of high temperature creep or this effect has to be added by factors in a proper way,
- the effect of the temperature gradient in a section on the stress inducing strains has to be taken into account, especially if the structures are under axial loading,
- the second order effect has to be taken into account, if the structures are under axial loading,
- geometrical imperfections have to be defined, if the structures are under axial loading,

5. Constructional Details

On the whole the EC 4 Part 4 is not only a regulation for calculation, but has to give the requirementy for a proper fire design. Therefore, and to avoid sudden and unexpected failure, constructional details (for instance boreholes in concrete filled hollow sections, the connection between steel profiles and the concrete between the flanges) have to be more emphasized. They are of that importance that they should be summerized in one chapter.

Members of the Working Group:

Dr.-Ing. Haß (Reporter)

Dipl.-Ing. Muess

Prof. Dr.-Ing. Klingsch

Dr.-Ing. Schaumann

EUROCODE 5 - Timber Structures

Material properties

In the draft May 1989 of EC 5 Part x all material properties, mainly information on temperature dependency of mechanical properties, are in a planning stage. Results of a running research project (TU München) will be available soon and should be adapted.

With regard to structural details of joints and connections the results of a research project (final report in preparation) should be taken into account. Thus, fire engineering on level II would be possible.

General remark

For numerical fire engineering on level III detailed information on the temperature dependency of all material properties are necessary. The calculation values which are given now are not checked by comparative calculations with fire tests. To modify these material laws, if necessary, in an easy way, it is proposed to add this information within an appendix to the fire design chapter. Thus, it seems much easier to adapt new results than by fixing these values within the main text of the code.

This suggestion concerns not only Eurocode 5, but all Eurocodes.

Members of the Working Group:

Dr.-Ing. Kersken-Bradley

Prof. Dr.-Ing. Klingsch (Reporter)

Mr. Maisel

EUROCODE 6 - Masonry Structures

1. Introduction

The Draft May 1989 gives definitions of walls, describes the general structure and shows the possibilities to assess the fire resistance of masonry structures. The available methods are as follows:

- assessment by tests,
- assessment by tables,
- assessment by calculation.

2. Problems and remarks

2.1 Assessment by tests

Up to now, details of a harmonized test method for masonry in fire are unknown. Therefore it is not yet possible to say whether the future test results will be comparable with the existing national test results or not.

A European test method for fire walls according to DIN 4102 Part 3 will not be defined.

2.2 Assessment by tables

The necessary tables are presently set up by IBMB based on existing test results and on the regulations in DIN 4102 Part 4. Tables of BS 5628 Part 3 are also taken into account.

The main problem in setting up these tables is the lack of harmonized European standards for the materials of masonry. The material properties (e.g. the dimensions and perforation

of bricks or the typ of mortar) have a predominant influence upon the behaviour of masonry in fire. In the "cold" part of EC 6 are only definitions for material terms and not for material properties. Presently, material codes for bricks and mortar are prepared with in CEN TC 125 "Masonry" and will be available as preliminary draft by the end of this year. On the base of these codes more detailed proposals for the fire safety design can be elaborated.

Tables for fire walls will not be defined in EC 6. Nevertheless, it is mentioned in EC 6, that on the base of national building codes there can be special regulations for such fire walls or party walls.

2.3 Assessment by calculation

Up to now, no national or international calculation methods for masonry structures under fire action exist.

3. Conclusion

Regulations regarding the fire resistance of masonry are presently not yet sufficiently elaborated in Part x of EC 6. Fire safety design only, an assessment by tables similar to the regultaions of DIN 4102 Part 4 is included. For future harmonization work it is recommended to liaise with CEN TC 125 "Masonry", e.g. by establishing a joint working group.

Members of the Working Group:

Dipl.-Ing. Hahn

Dr. Ohler

Braunschweig, May 22th, 1989

Prof. Dr.-Ing. Hossler, Reporter NABau 02.34.19