



Überblick über die Möglichkeiten der heißen Eurocodes

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
Institut für Stahlbau
Universität Hannover**

**Brandschutz
Fachseminar und Workshop
FH München – Bauen mit Stahl e.V.**

**München
13./14. April 2000**



1 Einleitung

Das Deutsche Institut für Normung (DIN) hat im Jahr 1997 die sogenannten „heißen Teile“ der Eurocodes als europäischen Vornormen (ENV) im Blaudruck in deutscher Sprache veröffentlicht. Für Stahlbauten und -konstruktionen im Hoch- und Ingenieurbau sind die Einwirkungen in DIN V ENV 1991-2-2 [1] geregelt, während die Regeln zur brandschutztechnischen Tragwerksbemessung für Stahlbauten in DIN V ENV 1993-1-2 [2] bzw. für Verbundtragwerke aus Stahl und Beton in DIN V ENV 1994-1-2 [3] enthalten sind:

DIN V ENV 1991-2-2 (kurz: EC1-2-2)	Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke -Einwirkungen im Brandfall
DIN V ENV 1993-1-2 (kurz: EC3-1-2)	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall
DIN V ENV 1994-1-2 (kurz: EC4-1-2)	Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall

Die zugehörigen Nationalen Anwendungsdokumente (NAD) sind vom NABau-Arbeitsausschuss 00.32.00 Ende 1999 formal beschlossen worden. Die heißen Eurocodes können zusammen mit den NAD nach Veröffentlichung im Einzelfall angewendet werden und stellen eine technisch gleichwertige Lösung im Sinne von §3 Abs. 3 MBO dar. Als weiterer Schritt soll der Beschluss zur Aufnahme in die Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen folgen. Darüber wird in der Fachkommission Bautechnik in diesem Jahr zu beschließen sein. Diese Entwicklung ist überfällig, da die heißen Eurocodes bereits im Jahre 2002 in der EN-Fassung veröffentlicht werden sollen.

Die grundlegenden Änderungen der Eurocodes gegenüber den bisherigen Regelungen sind zum einen das neue Sicherheitskonzept (Teilsicherheitsbeiwerte) und zum zweiten die Tatsache, dass brandschutztechnische Nachweise auf rechnerischem Wege geführt werden können. Das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte führt zu einer Reduzierung der mechanischen Lasten im Brandfall gegenüber den bisherigen Prüfbedingungen (s. dazu Kap. 3). Durch die Möglichkeit, Rechenverfahren anzuwenden, wird im Gegensatz zum bisherigen Klassifizierungssystem auf rein experimenteller Basis ein regelrechter Nachweis analog zu den Standsicherheitsnachweisen der statischen Berechnung möglich.

Das allgemeine Ziel des Brandschutzes ist die Begrenzung von Risiken im Hinblick auf Personen und das Gemeinwesen, die Nachbarschaft und erforderlichenfalls die Sachgüter des betroffenen Objekts. Speziell für die Tragkonstruktion enthält die Bauproduktenrichtlinie 89/106/EEC folgende grundlegende Anforderung für die Begrenzung des Brandrisikos: „Das Bauwerk ist derart zu planen



und zu errichten, dass im Fall der Entstehung eines Brandes die Tragfähigkeit der Konstruktion für eine definierte Dauer vorausgesetzt werden kann.“

Die heißen Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau behandeln die passiven Brandschutzmaßnahmen im Hinblick auf die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken und Tragwerksteilen für eine angemessene Tragfähigkeit und falls erforderlich für die Begrenzung der Brandausbreitung.

Ein umfassendes analytisches Verfahren für die brandschutztechnische Tragwerksbemessung würde das **Verhalten des Tragwerks bei erhöhten Temperaturen**, die **mögliche Brandbeanspruchung** und die günstige Wirkung der **Brandbekämpfung** berücksichtigen, einschließlich der Unsicherheiten, die mit diesen drei Einflussgrößen verbunden sind, und der Bedeutung des Tragwerks (Folgen eines Versagens). Gegenwärtig ist es grundsätzlich möglich, mit wissenschaftlichen Verfahren, die einige wenn auch nicht alle Parameter berücksichtigen, nachzuweisen, dass sich das Tragwerk oder Teile davon in einem tatsächlichen Schadenfeuer angemessen verhalten werden. Innerhalb der Europäischen Staaten und hier speziell in Deutschland beruht das gebräuchliche Verfahren jedoch nach wie vor auf den Ergebnissen von Normbrandversuchen und ist gekoppelt an ein Klassifizierungssystem in Vorschriften für Feuerwiderstandsdauern. Es wird davon ausgegangen, dass die geforderten Feuerwiderstandsdauern die vorgenannten Einflüsse, wenn auch nicht explizit so doch pauschal, abdecken. Die heißen Teile der Eurocodes befassen sich deshalb hauptsächlich - nicht ausschließlich - mit der Bemessung für den Feuerwiderstand unter Normbrandbedingungen.

2 Nachweisverfahren

Von tragenden Bauteilen wird gefordert, dass ihre Tragfähigkeit im Brandfall unter den Bemessungslasten (s. dazu Kap. 3) für eine anforderungsgemäße Branddauer aufrechterhalten bleibt. Dieses Traglast-Kriterium wird in den heißen Eurocodes entsprechend der Feuerwiderstandsdauer unter Normbrandbedingungen durch die Klassen R 30, R 60, R 90, R 120, R 180 und R 240 ausgedrückt.

Bei Decken werden wegen ihrer raumabschließenden Funktion zusätzliche Anforderungen an ihre Wärmedämmung und Integrität gestellt. Um das Wärmedämmungskriterium zu erfüllen, darf die Temperaturerhöhung auf der dem Brand abgewandten Seite örtlich 180°C und im Mittel 140°C nicht überschreiten. Die Integrität ist die Forderung nach Dichtheit der Konstruktion gegen den Durchgang von Flammen und heißen Gasen in Rissen.



Allgemein stehen für den Nachweis des Feuerwiderstands tragender Bauteile neben dem Brandversuch folgende Nachweisebenen zur Verfügung (s. auch Tab. 1):

- Ebene 1
 Klassifizierung der Bauteile mit Hilfe von Tabellen
 (entspricht dem Verfahren nach DIN 4102-4 [4])

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

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

Tab. 1 Nachweisebenen der brandschutztechnischen Bemessung nach Eurocodes

Ebene	Bemessungsaufgabe	Nachweis
1. Tabellen	Überprüfung maßgebender Parameter	Klassifizierung ja/nein
2. Vereinfachte Berechnungsverfahren	Berechnung der Traglasten im Brandfall	$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d}$
3. Allgemeine Berechnungsverfahren	Numerische Simulation unter Brandbeanspruchung	$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$

Das Konzept der drei Nachweisstufen ist so angelegt, dass das Bemessungsergebnis umso konservativer ausfällt, je einfacher das gewählte Nachweisverfahren ist, ggfs. auch um den Preis geringerer Wirtschaftlichkeit.

Für allgemeine Berechnungsverfahren (Ebene 3) werden im EC3-1-2 und EC4-1-2 die Grundlagen für rechnerische Simulationsverfahren definiert. Die Simulationsverfahren beziehen sich auf die Berechnung der zeitabhängigen Temperaturfelder im Bauteil einerseits und das mechanische Trag-



verhalten andererseits. Diese Nachweismethode darf nach den Eurocodes auf Bauteile, Tragwerksteile und Gesamtkonstruktionen angewendet werden. Im NAD wird geregelt, dass die Anwendung allgemeiner Berechnungsverfahren (Ebene 3) nur in Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde erfolgen darf. Für diese Verfahren sind geeignete Computerprogramme erforderlich, deren Anwendung z.Zt. praktisch auf einige spezialisierte Hochschulinstitute oder Ingenieurbüros begrenzt ist. Daher werden in diesem Beitrag schwerpunktmäßig die Nachweise auf der Ebene 2 angesprochen.

3 Einwirkungen im Brandfall

3.1 Thermische Einwirkungen

Die thermischen Einwirkungen auf Bauteile während eines Brandes werden gemäß EC1-2-2 durch Brandgastemperatur-Zeitkurven definiert. Diese werden entweder als nominelle Temperaturzeitkurven, wie z.B. die aus den Brandversuchen nach DIN 4102-2 [5] bekannte Einheits-Temperaturzeitkurve (s. Bild 1), angenommen oder aus den projektspezifischen physikalischen Parametern des Gebäudes - wie Brandbelastung, Ventilationsbedingungen und Wärmedämmung der Umfassungsbauteile - berechnet. Letztere Temperaturverläufe, sogenannte Naturbrandkurven, entsprechen eher den Verhältnissen bei realen Bränden.

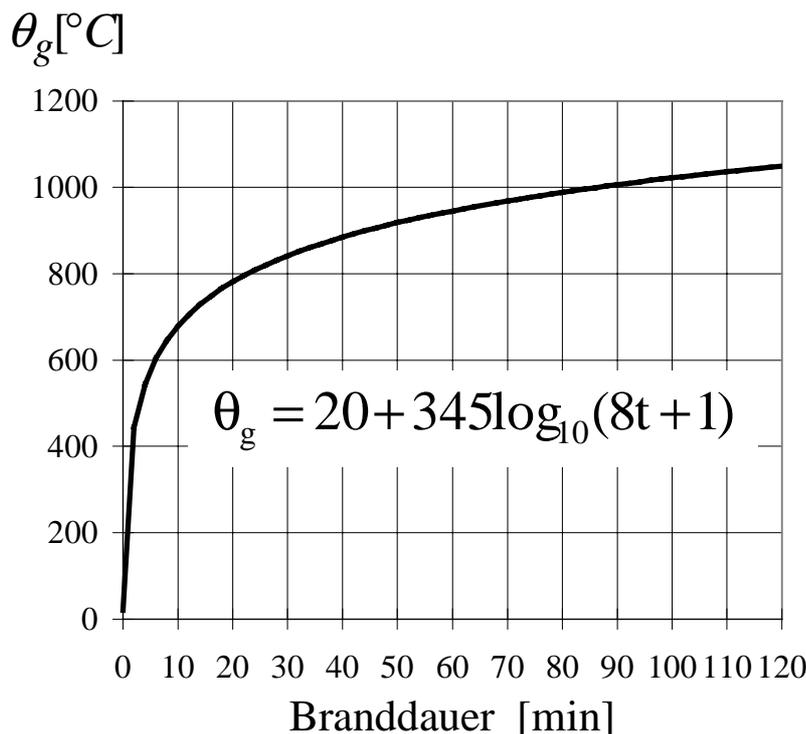


Bild 1

Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

t [min]	$\theta_g [^{\circ}\text{C}]$
5	576
10	678
20	781
30	841
60	945
90	1005
120	1050
180	1110

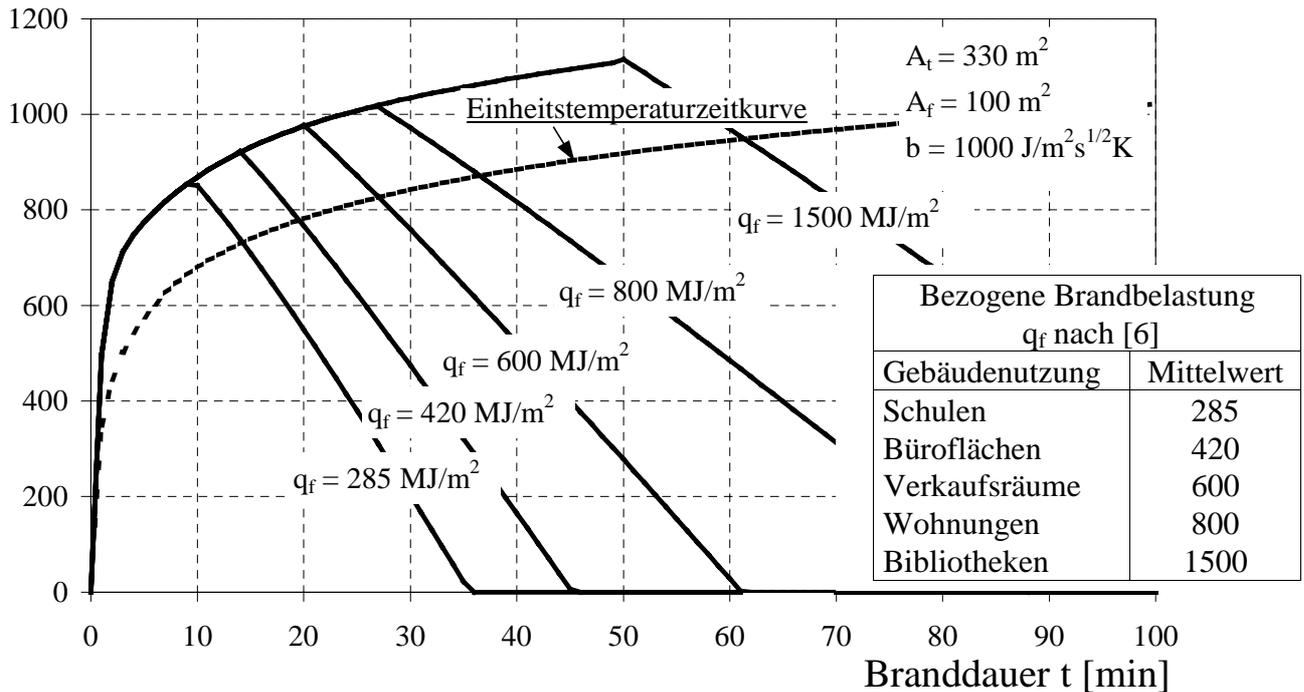


Bild 2 Parametrische Gastemperatur-Zeitkurven gemäß EC1-2-2 Anhang B

In EC1-2-2 Anhang B sind recht einfach anwendbare Berechnungsformeln zur Ermittlung parametrischer Brandgastemperatur-Zeitkurven angegeben. Sie gelten jedoch lediglich für einen sehr eingeschränkten Parameterbereich hinsichtlich der Raumgeometrie des Brandabschnittes, nämlich für maximale Grundflächen bis 100 m^2 und maximale Raumhöhen bis 4 m. Immerhin lässt sich der Einfluss wesentlicher Parameter, wie die Brandbelastung, verdeutlichen (s. Bild 2). Für größere Brandabschnitte mit ggfs. lokal begrenzten Bränden sind diese einfachen Berechnungsformeln ungeeignet. In solchen Fällen ist die Anwendung aufwendigerer Berechnungsverfahren für die Simulation von Naturbränden erforderlich.

Eine weitere Methode, die thermische Einwirkung zu beschreiben, ist die Ermittlung einer äquivalenten Branddauer. Die äquivalente Branddauer ist als diejenige Branddauer bei einem Brand nach Einheits-Temperaturzeitkurve definiert, bei der die gleiche Maximaltemperatur im Bauteilquerschnitt erreicht wird wie unter Naturbrandbedingungen. Mit Hilfe der äquivalenten Branddauer kann so die thermische Wirkung eines Naturbrandes durch die Einheits-Temperaturzeitkurve ausgedrückt werden. Im Gegensatz zu Verbundbauteilen ist die Anwendung der äquivalenten Branddauer bei Stahlbauteilen gut geeignet, da die Stahltemperaturen in den Bauteilen während des Brandes einigermaßen homogen sind. Dieses Verfahren ist Grundlage der DIN 18230 Brandschutz im Industriebau [7] und des in jüngerer Zeit propagierten „globalen Brandschutzkonzeptes“ [6].



3.2 Mechanische Lasten im Brandfall

Im Brandfall gelten die Kombinationsregeln für aussergewöhnliche Einwirkungen gemäß EC1-2-2

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

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

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

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

Tab. 2: Kombinationsbeiwerte gemäß DAST-Ri 104 [8]

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

Besteht die gesamte Einwirkung aus einer ständigen und einer führenden veränderlichen Einwirkung, ergibt sich aus Gl. (1):

$$E_{fi,d,t} = \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \text{ mit } \xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k} \quad (3)$$

$$= G_k (\gamma_{GA} + \psi_{1,1} \cdot \xi) = G_k (1,0 + \psi_{1,1} \cdot \xi)$$

Für die Kaltbemessung gilt:

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} \text{ mit } \xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k} \quad (4)$$

$$= G_k (\gamma_G + \gamma_Q \cdot \xi) = G_k (1,35 + 1,5 \cdot \xi)$$



Daraus ergibt sich der Reduktionsfaktor in Abhängigkeit von ξ und $\psi_{1,1}$ zu (s. Bild 3):

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d,t}}{E_d} = \frac{G_k(1,0 + \psi_{1,1} \times \xi)}{G_k(1,35 + 1,5 \times \xi)} = \frac{1,0 + \psi_{1,1} \times \xi}{1,35 + 1,5 \times \xi} \quad (5)$$

Für hochbauübliche Lastzusammensetzungen darf nach den NAD pauschal im Stahlbau $\eta_{fi} = 0,65$ bzw. im Verbundbau $\eta_{fi} = 0,70$ angesetzt werden, wenn die Einwirkungen nicht genauer ermittelt werden.

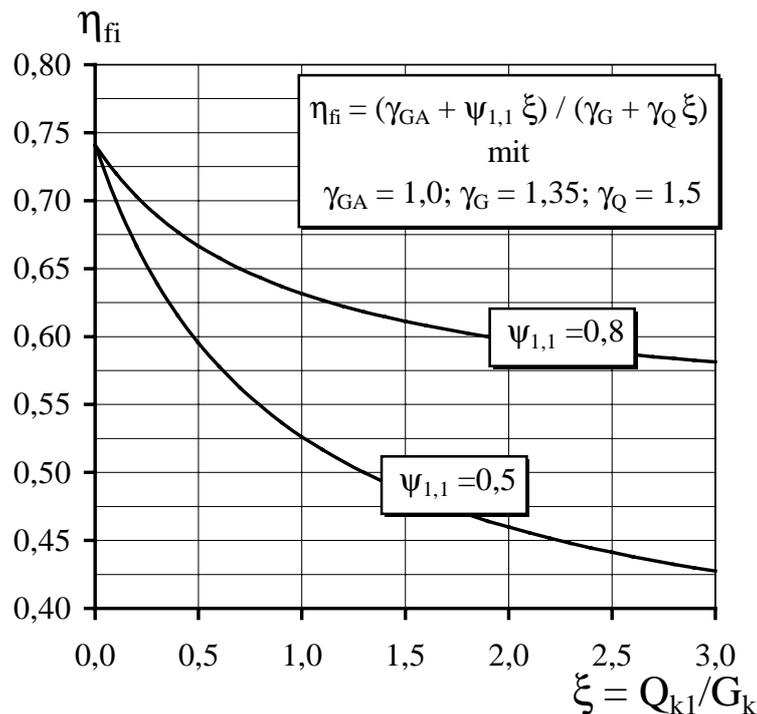
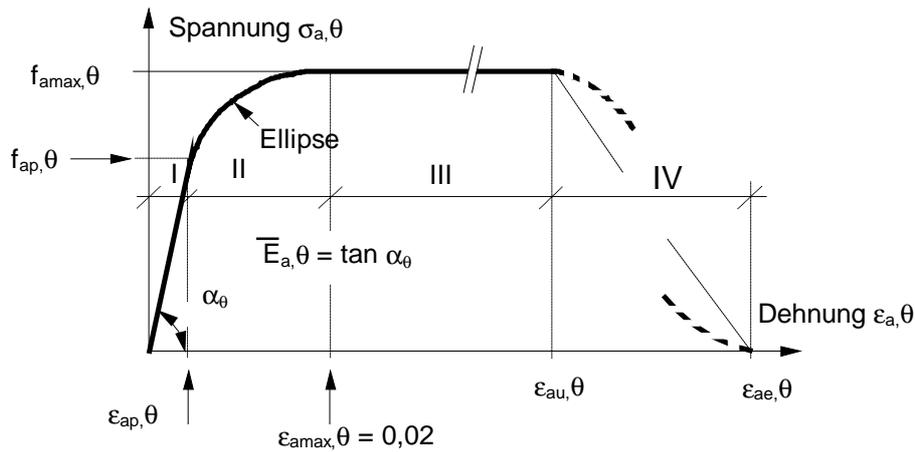


Bild 3 Reduktionsfaktor η_{fi} in Abhängigkeit vom Verhältnis Verkehrslast zu ständiger Last

4 Temperaturabhängige Werkstoffkennwerte

Wichtige Grundlage für die Berechnungsverfahren ist, dass in EC3-1-2 bzw. EC4-1-2 die Berechnungsansätze für die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffkennwerte festgelegt wurden. Dabei sind mechanische Kennwerte wie Spannungs-Dehnungsbeziehungen (σ - ϵ -Linien) und thermische Dehnungen ϵ_{th} als auch thermischen Kennwerte wie Wärmeleitfähigkeit λ , spez. Wärmekapazität c und Dichte ρ erfasst. Diese Werkstoffkennwerte werden als Rechenwertfunktionen für die Baustoffe Beton, Baustahl und Bewehrungsstahl angegeben.



Dehnungs-Bereich	Spannung σ	Tangentenmodul
I / elastisch $\epsilon \leq \epsilon_{ap,\theta}$	$\bar{E}_{a,\theta} \epsilon_{a,\theta}$	$\bar{E}_{a,\theta}$
II / Übergang elliptisch $\epsilon_{ap,\theta} \leq \epsilon$ $\epsilon \leq \epsilon_{amax,\theta}$	$\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\epsilon_{amax,\theta} - \epsilon_{a,q})^2} + f_{ap,\theta} - C$ mit $a^2 = (\epsilon_{amax,\theta} - \epsilon_{ap,\theta}) (\epsilon_{amax,\theta} - \epsilon_{ap,\theta} + C / \bar{E}_{a,\theta})$ $b^2 = \bar{E}_{a,\theta} (\epsilon_{amax,\theta} - \epsilon_{ap,\theta}) C + C^2$ $C = \frac{(f_{amax,\theta} - f_{ap,\theta})^2}{\bar{E}_{a,\theta} (\epsilon_{amax,\theta} - \epsilon_{ap,\theta}) - 2(f_{amax,\theta} - f_{ap,\theta})}$	$\frac{b(\epsilon_{amax,\theta} - \epsilon_{a,\theta})}{a \sqrt{a^2 - (\epsilon_{amax,\theta} - \epsilon_{a,\theta})^2}}$
III / plastisch $\epsilon_{amax,\theta} \leq \epsilon$ $\epsilon \leq \epsilon_{au,\theta}$	$f_{amax,\theta}$	0

Bild 4 Bild 3.1 und Tabelle 3.1 aus EC4-1-2
 Mathematisches Modell für die Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Baustahl bei erhöhten Temperaturen

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Baustahl gelten in gleicher Weise für den Bewehrungsstahl (Bild 4). Für eine bestimmte Stahltemperatur θ_a wird die Arbeitslinie durch drei Parameter definiert (s. Bild 5). Darin wird der Einfluss der erhöhten Stahltemperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Baustahl deutlich.

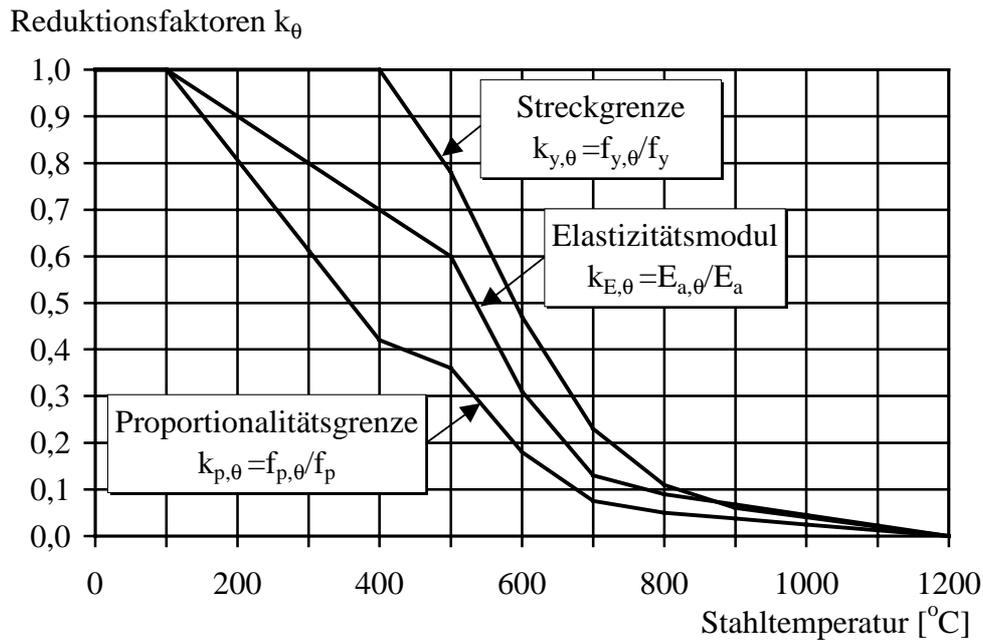


Bild 5 Abhängigkeit der Streckgrenze, der Proportionalitätsgrenze und des Elastizitätsmoduls von der Temperatur

Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften einachsiger beanspruchter Betons bei erhöhten Temperaturen entsprechen den Spannungs-Dehnungsbeziehungen nach Bild 6. Sie sind durch die Druckfestigkeit $f_{c,\theta}$ und die zu $f_{c,\theta}$ gehörende Betonstauchung $\epsilon_{cu,\theta}$ definiert.

Der Werkstoff-Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{m,fi}$ darf im Brandfall bei der Berechnung der Beanspruchbarkeiten für alle Werkstoffe zu 1,0 angenommen werden.

In den Bildern 8 bis 13 sind die thermische Dehnungen ϵ_{th} , die Wärmeleitfähigkeit λ und die spezifische Wärmekapazität c von Bau- bzw. Betonstahl und Beton angegeben.

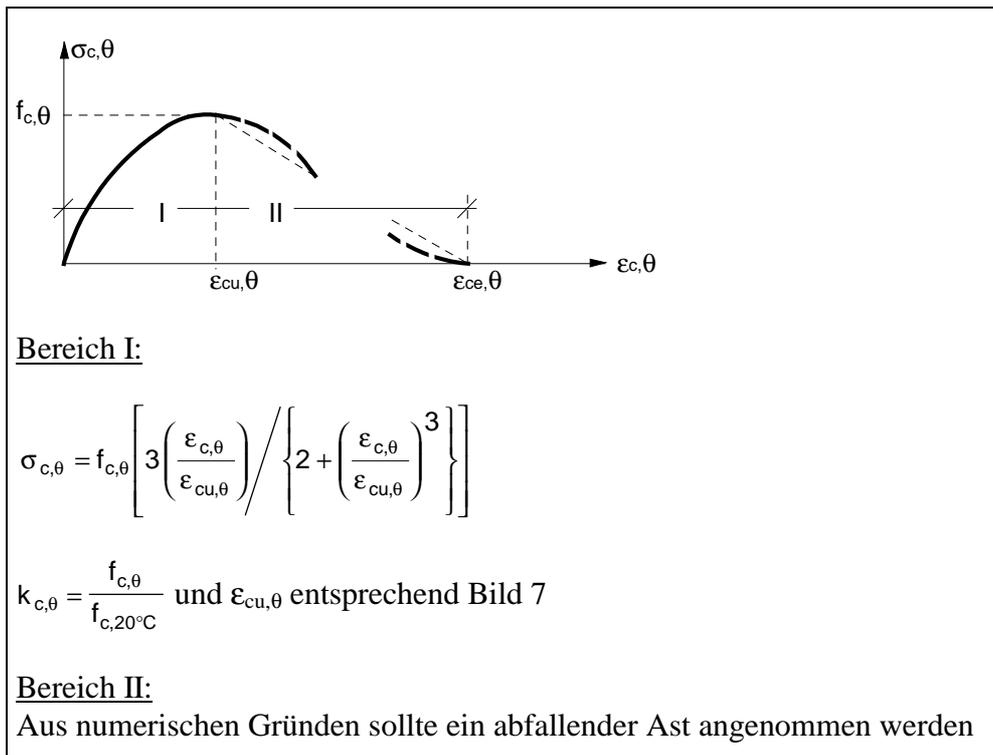


Bild 6 Mathematisches Modell der Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Beton im Druckbereich bei erhöhten Temperaturen

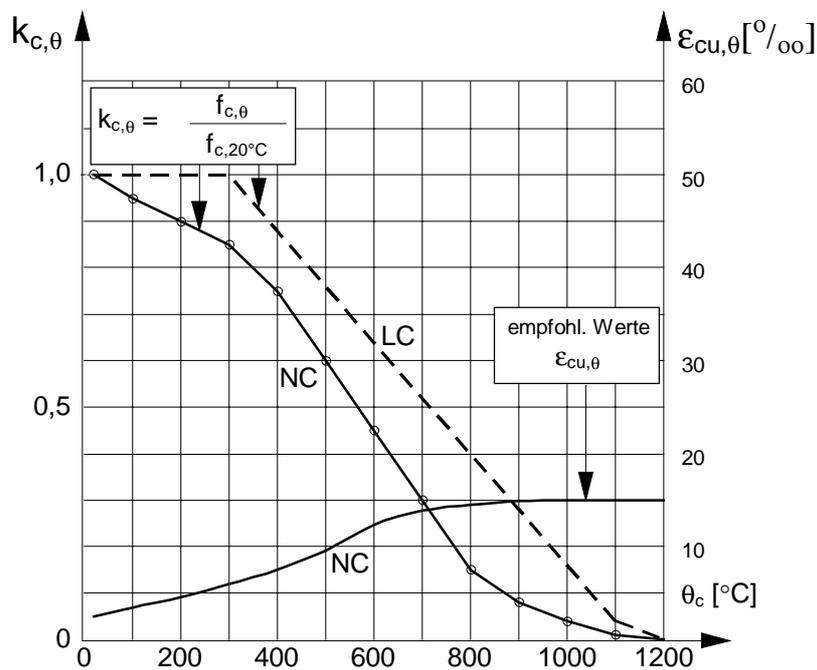


Bild 7 Parameter der Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Normalbeton (NC) und Leichtbeton (LC) bei erhöhten Temperaturen; die Druckfestigkeit $f_{c,\theta}$ und die korrespondierende Stauchung $\epsilon_{cu,\theta}$ definieren mit den Gleichungen in Bild 6 den Bereich I des Werkstoffmodells

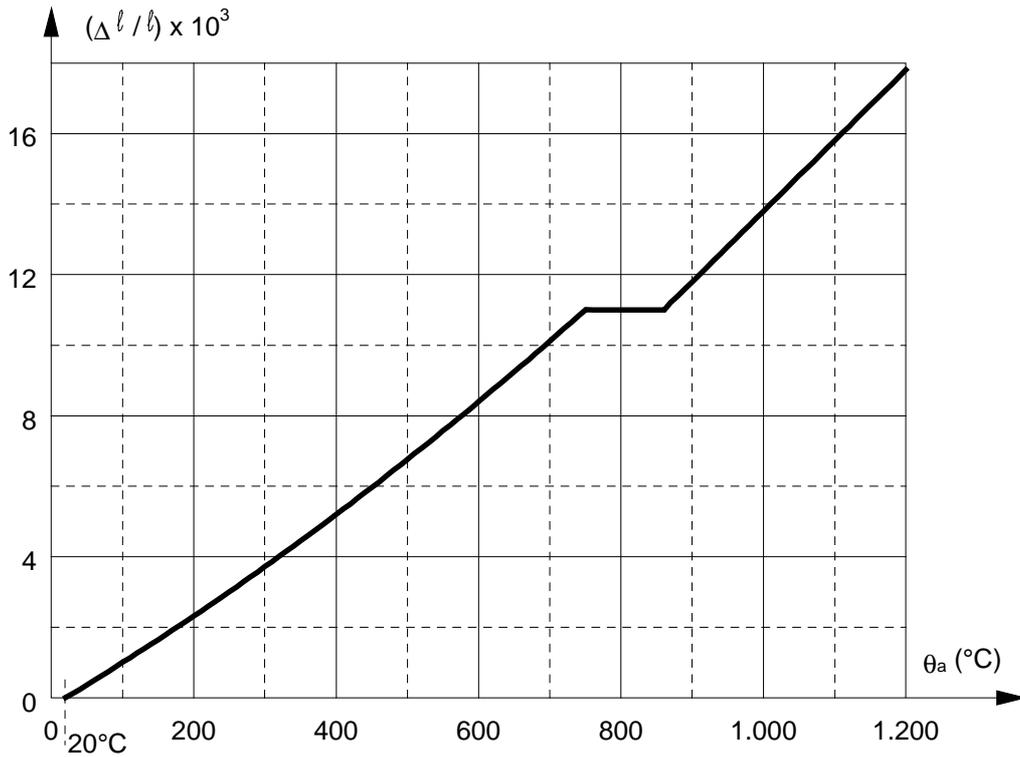


Bild 8 Thermische Dehnung von Stahl als Funktion der Temperatur

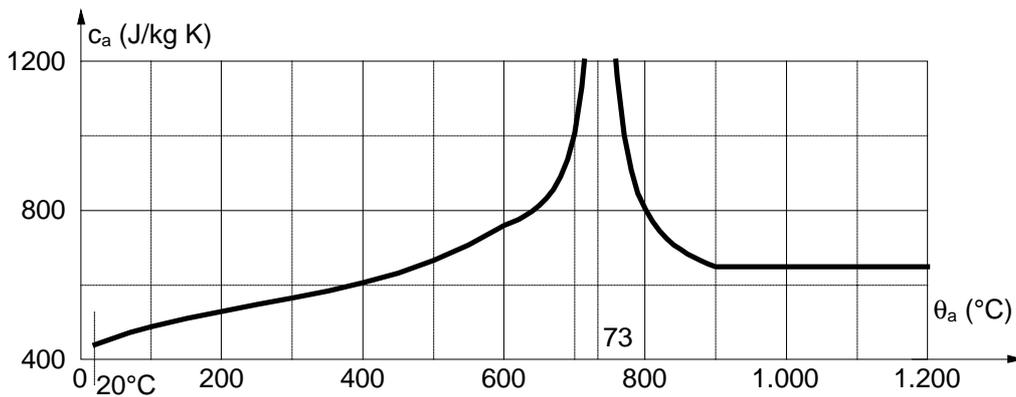


Bild 9 Spezifische Wärme von Stahl als Funktion der Temperatur

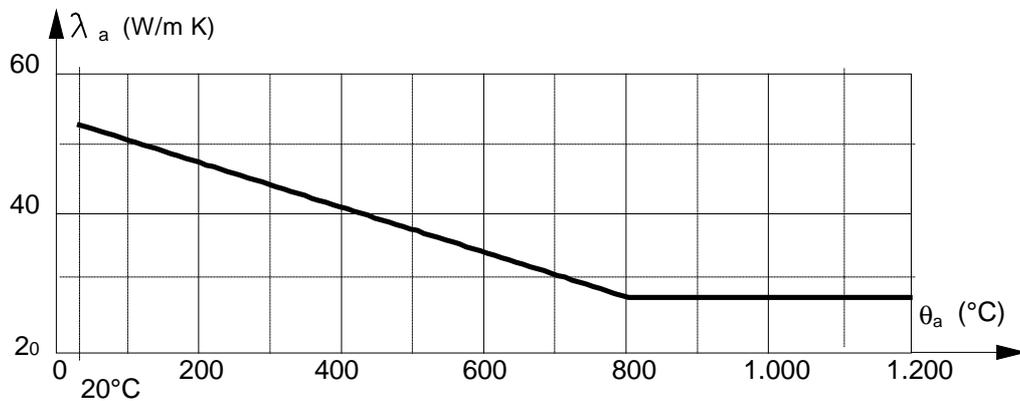


Bild 10 Wärmeleitfähigkeit von Stahl als Funktion der Temperatur

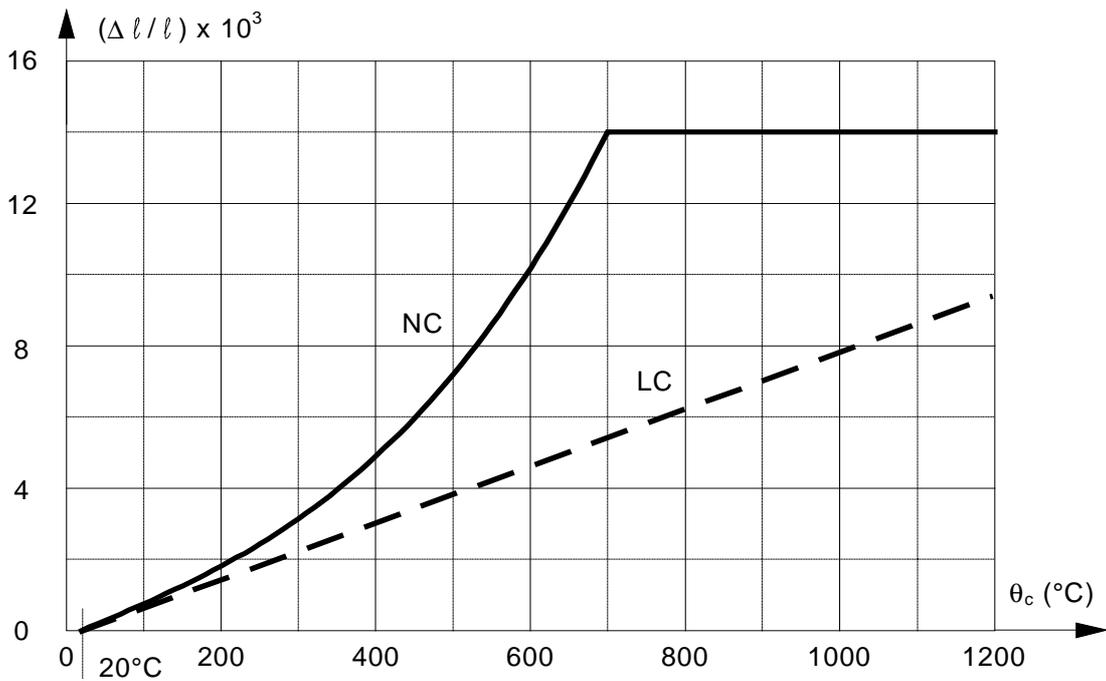


Bild 11 Thermische Dehnung von Normalbeton (NC) und Leichtbeton (LC) als Funktion der Temperatur

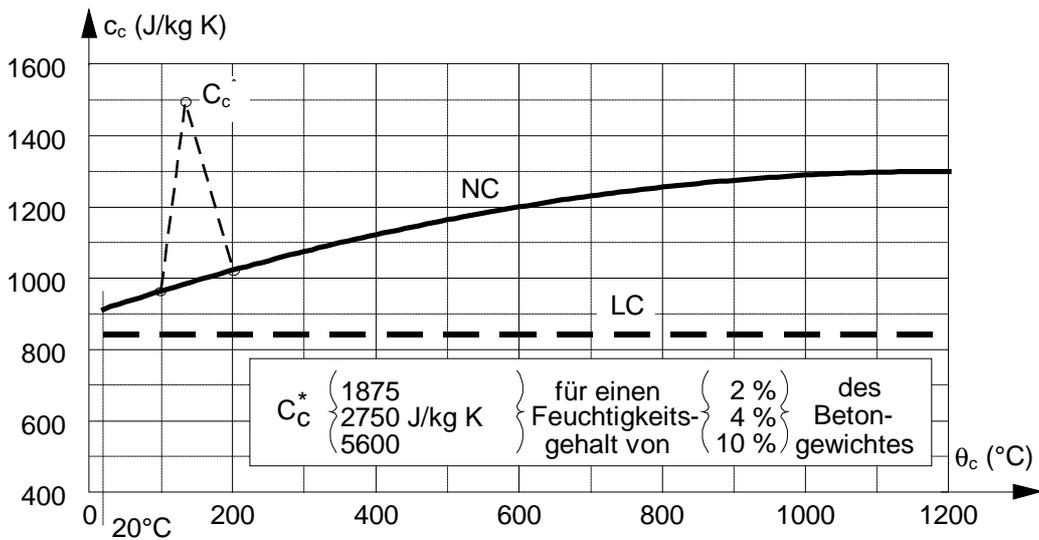


Bild 12 Spez. Wärme von Normalbeton (NC) und Leichtbeton (LC) als Funktion der Temperatur

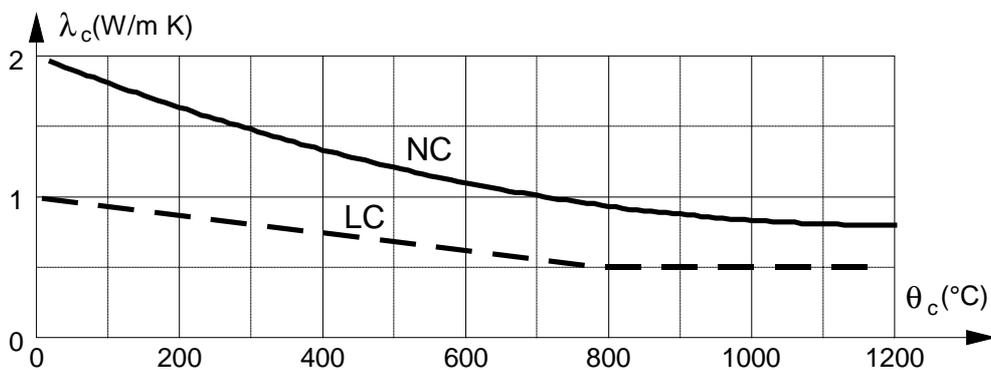


Bild 13 Wärmeleitfähigkeit von Normal- (NC) und Leichtbeton (LC) als Funktion der Temperatur



Brandschutzmaßnahmen werden im Stahlbau regelmäßig durch Bekleidungen und Beschichtungen nachträglich appliziert. Sie unterliegen traditionell Zulassungen durch Prüfung in autorisierten Prüfanstalten. Die Angaben der Hersteller sind daher exklusiv für ihr Produkt und beziehen sich meist auf Mindestdicken zugeordnet zu den Feuerwiderstandsklassen gemäß Normbrandversuch. Daher ist auch verständlich, dass im EC3-1-2 keine Materialkennwerte für Bekleidungen oder Beschichtungen geregelt werden. Die Folge davon ist, dass für die Berechnung der Erwärmungskurven geschützter Stahlbauteile wesentliche Parameter fehlen. Die deutsche Bauaufsicht hat diesen Mangel erkannt und hat, wenigstens für die bisher nach DIN 4102-4 geregelten Brandschutzmaterialien, entsprechende Angaben im NAD (s. Tab. 3) niedergelegt. Weitere Angaben finden sich bei dem Euronomogramm in [9]. Auf die Hersteller kommt die Aufgabe zu, solche Materialkennwerte aus ihren vorhandenen oder neuen Prüfergebnissen zu ermitteln und bereitzustellen. Das Verfahren für die Ermittlung ist auf europäischer Ebene bereits beschrieben [10].

Tab. 3: Thermische Materialkennwerte von Brandschutzbekleidungen

Brandschutzmaterial	Wärmeleitfähigkeit λ_p [W/(m*K)]	Spezifische Wärme c_p [J/(kg*K)]	Dichte ρ_p [kg/m ³]
Putze Mörtelgruppe P II, PIV a,b,c nach DIN 18550 Teil 2	0,12	1100	550
	Vermiculite- und Perlite- mörtel nach DIN 4102 Teil 4 Abschn. 3.1.6.5	0,12	1100
Platten Gipskarton- Feuerschutzplatten (GKF) nach DIN 18180	0,20	1700	945

5 Tragwerksbemessung im Brandfall für Stahlbauten

5.1 Allgemeines

Wenn laut Bauordnungen oder Sonderbauordnungen Anforderungen an den Feuerwiderstand von Stahlbauteilen gestellt werden (s. dazu [11]), so wird der Feuerwiderstand durch direkt am Bauteil angebrachte Brandschutzmaßnahmen oder durch Abschirmung, z.B. bei Trägern in Form von Unterdecken, erreicht. Diese Produkte sind entweder nach DIN 4102-4 klassifiziert oder sie bedürfen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung, eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses oder einer Zustimmung im Einzelfall.



Zu den direkt am Stahlbauteil wirkenden Brandschutzmaßnahmen gehören

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

Während dämmschichtbildende Anstriche lediglich bei geringeren Anforderungen bis etwa F 60 zu Anwendung kommen, können mit plattenförmigen Bekleidungen und Putzen leicht Feuerwiderstandsklassen bis F 120 erreicht werden. In Deutschland liegen die Kosten für diese Brandschutzmaßnahmen für übliche Hochbaukonstruktionen leider in der Größenordnung der Kosten für den Baustahl. Dabei ist der Grad der Anforderung, ob F 30 oder F 90, im Hinblick auf die Kosten nicht ausschlaggebend. Bereits die niedrigste Feuerwiderstandsklasse erfordert Aufwendungen von etwa 1000 DEM pro t Stahlkonstruktion.

Die bisherige Praxis trennt die Dimensionierung von Stahlbauteilen auf der Basis der statischen Berechnung unter normalen Temperaturbedingungen weitgehend von der brandschutztechnischen Auslegung. Das übliche Verfahren ist, die Brandschutzmaßnahmen erst dann zu planen, wenn die Konstruktion festgelegt ist. Ziel dieser Planungsaufgabe ist es, die Art der Brandschutzmaßnahme (DSB, Platten oder Putz) und deren erforderliche Mindestdicke festzulegen. Dabei gehen neben der Funktion des Bauteils, ob Träger oder Stütze, als wesentliche Eingangsgrößen die erforderliche Feuerwiderstandsklasse sowie der Profilmfaktor ein (s. z.B. Bild 14).

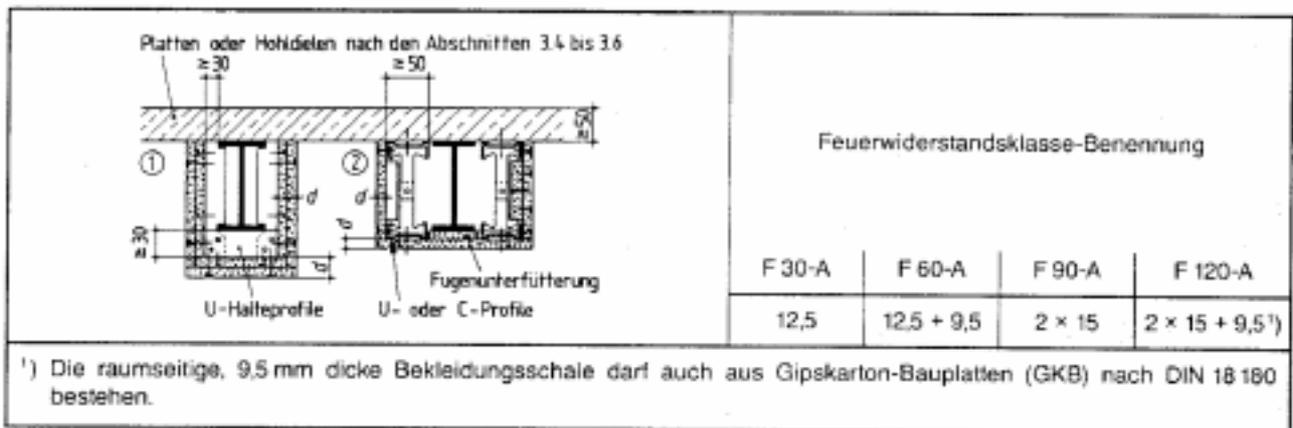


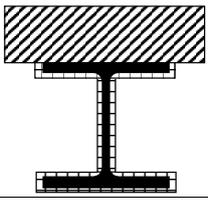
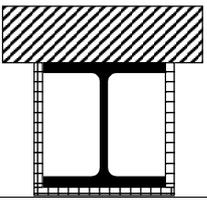
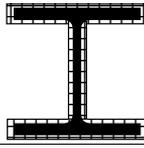
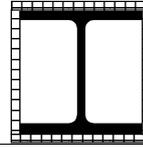
Bild 14 Tabelle 90 der DIN4102-4

Mindestdickendicken d in mm von Stahlträgern mit $U/A \leq 300 \text{ m}^{-1}$ mit einer Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) nach DIN 18180 mit geschlossener Fläche

Der Profilmfaktor A_m/V ist nach EC3-1-2 als Verhältnis von brandbeanspruchter Oberfläche A_m zum Volumen V des Stahlbauteiles definiert. Für Bauteile mit über die Länge gleichbleibendem Querschnitt ist der Profilmfaktor identisch mit dem Wert U/A nach DIN 4102-4. Beispiele für die Ermittlung des Profilmfaktors bei I-Profilen zeigt Tabelle 4.



Tabella 4: Ermittlung des Profilfaktors

Brandbeanspruchung	Dreiseitig		allseitig	
Art der Bekleidung	profilfolgend 	kastenförmig 	profilfolgend 	kastenförmig 
Profilfaktor $A_m/V =$	$\frac{\text{Mantelfläche} - b}{A}$	$\frac{2h + b}{A}$	$\frac{\text{Mantelfläche}}{A}$	$\frac{2h + 2b}{A}$

Das bisherige Vorgehen sieht vor, dass die erforderliche Minstdicke für das jeweils gewählte Brandschutzmaterial nach der Ermittlung des Profilfaktors lediglich noch von der gewünschten Feuerwiderstandsklasse abhängig ist. Die Materialdicken sind entweder wie in Bild 14 in der DIN 4102-4 oder in den Herstellerprospekten angegeben. Basis dieser Werte ist der Normbrandversuch nach DIN 4102-2. Dazu gehört bei Stützen ab der Feuerwiderstandsklasse F 90 auch der sogenannte Löschwasserversuch, der in den zukünftigen europäischen Prüfnormen entfallen wird. Damit ist zukünftig mit Erleichterungen bei Brandschutzbekleidungen für Stützen zu rechnen.

In EC3-1-2 stehen für den Nachweis des Feuerwiderstands tragender Stahlbauteile (Träger und Stützen) allgemein Nachweise auf der Ebene 2, das heißt mit vereinfachten Berechnungsverfahren, zur Verfügung. Bemessungstabellen für bestimmte Brandschutzbekleidungen sind aus den in Kap. 4 genannten Gründen nicht enthalten. Bezüglich der Nachweise auf Ebene 3 wird auf Kap. 2 verwiesen.

Diese Nachweise mit vereinfachten Berechnungsverfahren können auf

- Temperaturebene oder auf
- Tragfähigkeitsebene

erfolgen.

Beim Nachweis auf Temperaturebene, dem θ_{cr} -Verfahren, wird gezeigt, dass die höchste im Brandfall auftretende Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ unterhalb der kritischen Stahltemperatur θ_{cr} bleibt. Die kritische Stahltemperatur θ_{cr} ist die Temperatur, bei der der Bauteilwiderstand gerade noch so groß ist wie die Beanspruchung infolge mechanischer Lasten.

$$\theta_{a,max} \leq \theta_{cr} \tag{6}$$



Beim Nachweis auf Tragfähigkeitsebene wird, dem neuen Bemessungskonzept der Eurocodes folgend, im Brandfall der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (7)$$

mit

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

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

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

5.2 Stahltemperaturen

Mit den Brandgastemperatur-Zeitkurven nach Kap. 3.1 lässt sich die Erwärmung ungeschützter und geschützter Stahlbauteile durch numerische Lösung der *Fourier*-Differentialgleichung für die Wärmeleitung in festen Stoffen bestimmen. Die dazu benötigten Werkstoffkennwerte für Baustahl sowie die Berechnungsformeln sind in EC3-1-2 angegeben. Wärmequelle für das Bauteil sind die umgebenden Brandgase. Der Wärmestrom in das Bauteil setzt sich aus dem konvektiven und dem radiativen Wärmeübergang (Strahlung) zusammen, die in EC1-2-2 geregelt sind. Die genannten Angaben basieren im Wesentlichen auf den Erfahrungen an Bauteilversuchen unter Normbrandbedingungen.

Bei Stahlbauteilen vereinfacht sich der numerische Aufwand für die Lösung der *Fourier*gleichung durch die Annahme einer über den Stahlquerschnitt gleichmäßigen Temperatur. Infolge der hohen Wärmeleitfähigkeit ist diese Annahme häufig gerechtfertigt. Die Erwärmung als Funktion der Branddauer lässt sich dann wie in Bild 7 als eine Bauteiltemperatur-Zeitkurve darstellen. Bild 15 zeigt, dass unter der Einheits-Temperaturzeitkurve lediglich massige, ungeschützte Stahlbauteile so langsam erwärmt werden, dass die Stahltemperaturen bis zu 30 Minuten Branddauer unterhalb der Versagenstemperaturen bleiben.

Für ungeschützte Stahlbauteile hat der Verfasser in [12] Näherungsformeln angegeben, mit denen die Temperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer und dem Profilmfaktor unter Einheits-Temperaturzeitkurve schnell errechnet werden können (s. Tab. 5). Diese Kurven sind insbesondere für geringe Brandbelastungen mit äquivalenten Branddauern bis 30 min nützlich.

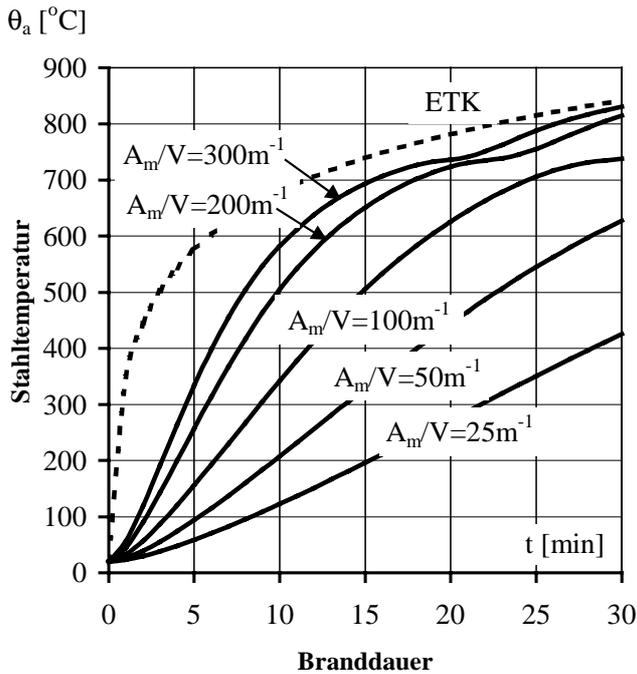


Bild 15

Erwärmungskurven ungeschützter Stahlquerschnitte unter Einheits-Temperaturzeitkurve; Kurvenparameter: Profilmfaktor $A_m/V [m^{-1}]$

Tabelle 5: Temperaturen ungeschützter Stahlbauteile als Funktion der Branddauer $t [min]$ und des Profilmfaktors $A_m/V [m^{-1}]$ unter ETK (Näherung)

$\theta_{a,t} = \frac{c_1 \cdot c_2 + c_3 \cdot t^{c_4}}{c_2 + t^{c_4}} \text{ [}^\circ\text{C]}; \text{ mit } t \text{ in min}$	
$c_1 = \theta_0 = 20^\circ\text{C}$	$c_2 = 15780 \cdot \left(\frac{A_m}{V}\right)^{-1,13}$
$c_3 = \frac{10000}{0,3 + 1,896 \cdot \ln\left(\frac{A_m}{V}\right)}$	$c_4 = 1,248 + 0,069 \cdot \ln\left(\frac{A_m}{V}\right)$
Gültigkeitsgrenzen:	
Profilfaktor	$25 \text{ m}^{-1} \leq A_m/V \leq 300 \text{ m}^{-1}$
Branddauer	$t \leq 30 \text{ min}$
Stahltemperatur	$\theta_a \leq 700^\circ\text{C}$

Für bekleidete Stahlbauteile ergeben sich beispielsweise mit den Materialkennwerten nach Tab. 3 (untere Zeile) Erwärmungskurven nach Bild 16. Dabei wird deutlich, dass die Erwärmung durch größere Plattendicken verzögert wird (vgl. auch Bild 14).

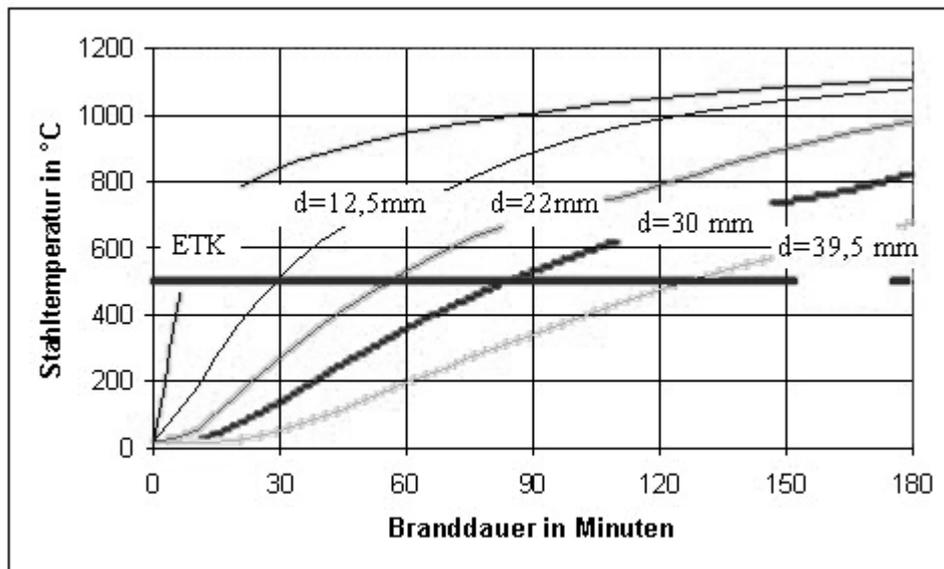


Bild 16 Rechnerisch ermittelte Erwärmungskurven für Stahlbauteile mit GKF-Platten und Profilfaktor $A_m/V = 300 \text{ m}^{-1}$ in Abhängigkeit von der Plattendicke d

5.3 Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren)

Beim θ_{cr} -Verfahren wird nachgewiesen, dass die unter Kap. 5.2 errechneten Stahltemperaturen, die für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer (R-Klasse) oder für eine äquivalente Branddauer ermittelt wurden, unterhalb der kritischen Stahltemperaturen bleiben. Letztere können in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad nach Bild 17 einfach bestimmt werden. Der Ausnutzungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis von Einwirkungen und Tragwiderstand zu Beginn der Brandbelastung ($t=0$):

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,t=0}} = \frac{\eta_{fi}}{\gamma_{M,20^\circ\text{C}}} = \frac{\eta_{fi}}{1,1} \tag{8}$$

Auf der sicheren Seite liegend darf dieser Ausnutzungsgrad mit $\eta_{fi}=0,65$ (s. Kap. 3.2) zu $\mu_0=0,59$ angesetzt werden. Dabei ergibt sich eine kritische Stahltemperatur von 557°C .

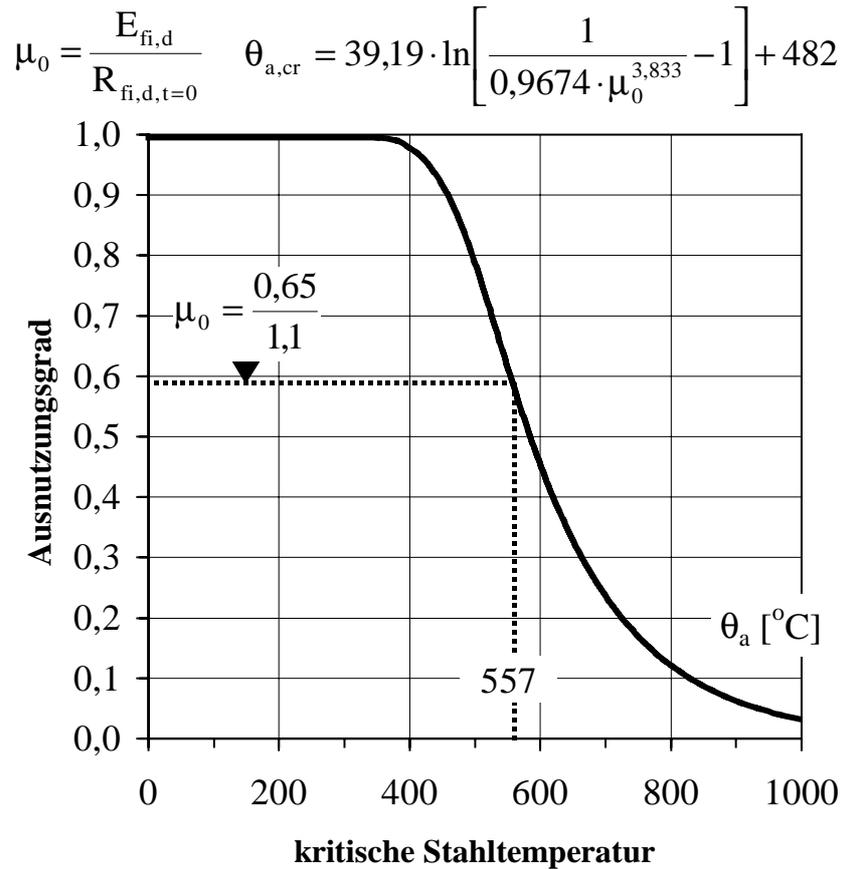


Bild 17 Kritische Stahltemperaturen in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad μ_0

5.4 Nachweis auf Tragfähigkeitsebene

Der Nachweis auf Tragfähigkeitsebene erfolgt analog den Nachweisverfahren bei Raumtemperatur. Es wird jedoch berücksichtigt, dass sich Streckgrenze und Elastizitätsmodul infolge der erhöhten Temperaturen verringert haben. Maßgeblich ist wie beim θ_{cr} -Verfahren die Bemessungs-Stahltemperatur nach Kap. 5.2, die homogen über den Querschnitt und über die Stablängsachse angenommen wird. Diese Annahme liegt in bestimmten Fällen, z.B. beim Träger mit aufliegender Betonplatte, auf der sicheren Seite. Vereinfachend darf hier die Tragfähigkeit im Brandfall unter Berücksichtigung eines Anpassungsfaktors κ (s. Tab. 5) ermittelt werden.

Im Folgenden wird am Beispiel des Nachweises für zentrisch gedrückte Stützen die Tragfähigkeit unter der Bemessungs-Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ angegeben:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi}}{\kappa(=1,2)} \cdot N_{pl,\theta_{a,max},Rd} = \frac{\chi_{fi}}{1,2} \cdot \frac{A \cdot f_{ay,20^\circ C} \cdot k_{y,\theta_{a,max}}}{\gamma_{M,fi}(=1,0)} \tag{9}$$



Tab. 6: Anpassungsfaktoren $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$ nach EC3-1-2

Bauteil	Statisches System	Beflammung	Anpassungs-faktor κ
Träger	Einfeldträger (statisch bestimmt)	allseitig	1,0
		dreiseitig mit Beton- oder Verbunddeckenplatte	1,0*)
	statisch unbestimmte Träger	allseitig	0,8
		dreiseitig mit Beton- oder Verbunddeckenplatte	0,8*)
Stützen	alle Lagerungsbedingungen	allseitig	1,2
Zugglieder	-	allseitig	1,0

*) durch NAD gegenüber EC3-1-2 geändert

Wie bei Raumtemperatur ergibt sich die Tragfähigkeit unter zentrischem Druck aus dem Produkt der vollplastischen Normalkraft und einem Abminderungsfaktor χ . Bei der vollplastischen Normalkraft ist die Verringerung der Streckgrenze mit dem Reduktionsfaktor k_y (s. Bild 5) zu berücksichtigen. Der Abminderungsfaktor χ wird aus dem bezogenen Schlankheitsgrad mit der Knickspannungskurve c (im Brandfall immer c) bestimmt (s. Bild 18). Bei dem Schlankheitsgrad ist die temperaturbedingte Verminderung von Streckgrenze und E-Modul anzusetzen. Günstig darf ggfs. eine kleinere Knicklänge im Brandfall nach Bild 19 angesetzt werden. Schlussendlich wird in Gl. (9) noch der Anpassungsfaktor $\kappa=1,2$ nach Tab. 6 berücksichtigt.

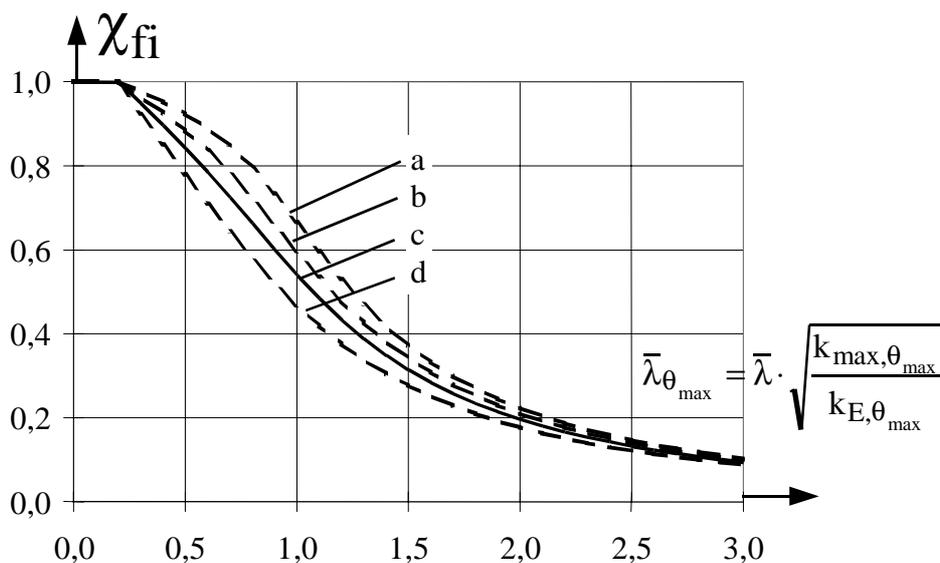


Bild 18 Knickspannungslinie im Brandfall (Kurve c)

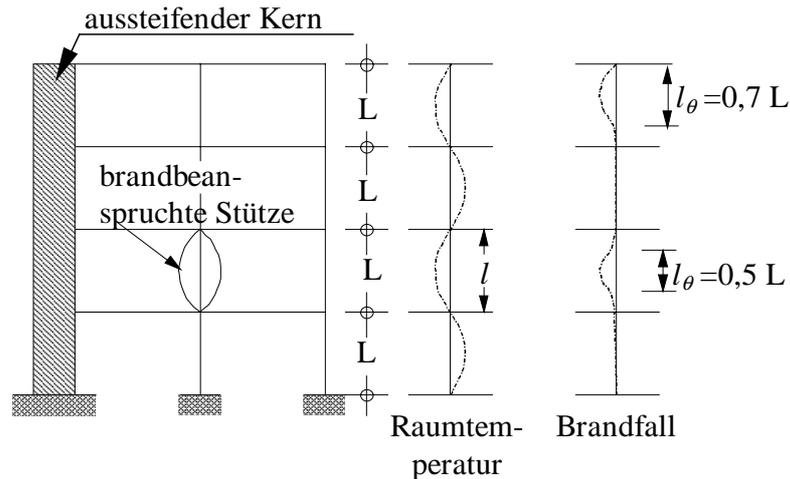


Bild 19 Knicklängen im Brandfall in ausgesteiften Rahmentragwerken

6 Tragwerksbemessung im Brandfall für Verbundtragwerke

6.1 Allgemeines

Der brandschutztechnische Nachweis von Verbundbauteilen wurde in Deutschland seit 1988 offiziell für das bauaufsichtliche Genehmigungsverfahren ermöglicht [13]. Der Nachweis durch Klassifizierung der Bauteile mit Hilfe von Tabellen ist in DIN 4102-4, Abschnitt 7 eingeflossen. Darin werden Tabellen angegeben, die Bemessungsvorschriften, z.B. Mindestabmessungen, Mindestbetondeckungen und Bewehrungsverhältnisse, für Verbundbauteile zur Einstufung in die Feuerwiderstandsklassen enthalten (s. Tab. 7). Dabei wurden insbesondere die Angaben für kammerbetonierte Verbundträger gegenüber [13] erweitert. Zum einen wurden Werte für die Feuerwiderstandsklasse F 180 ergänzt, zum anderen wurde eine neue Tabelle hinzugefügt, die bei Beachtung besonderer konstruktiver Randbedingungen günstigere Werte für die Längsbewehrung in den Kammern enthält.

Tab. 7 Übersicht über die in DIN 4102-4 klassifizierten Verbundbauteile

Bauteil	Tabelle
Verbundträger mit ausbetonierten Kammern ohne besondere konstruktive Anforderungen	Tab. 103
mit besonderen konstruktiven Anforderungen	Tab. 104
Verbundstützen aus betongefüllten Hohlprofilen	Tab. 105
aus vollständig einbetonierten Stahlprofilen	Tab. 106
aus Stahlprofilen mit ausbetonierten Seitenteilen	Tab. 107 + 108

Verbunddecken werden in DIN 4102-4 nicht behandelt. Für Verbunddecken gibt es jedoch Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt).



Die starke Forcierung rechnerischer Nachweisverfahren für die brandschutztechnische Bemessung hat schwerpunktmäßig im Bereich des Verbundbaus stattgefunden. Neben den Bemessungsverfahren, die nun im EC4-1-2 niedergeschrieben sind, sind im deutschsprachigen Raum das DHMS-Verfahren [14] für Verbundträger, das in [15] auf Durchlaufträger erweitert wurde, und das vereinfachte Rechenverfahren für Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen in [16] zu erwähnen.

6.2 Nachweisverfahren

Im EC4-1-2 werden für den Verbundbau neben Trägern und Stützen auch brandschutztechnische Nachweise für Decken geregelt (s. Tab. 8).

Tab. 8 Anwendungsbereich des EC4-1-2
Brandschutztechnische Tragwerksbemessung im Verbundbau

Verbunddecken	Verbundträger	Verbundstützen

Neben den allgemeinen Berechnungsverfahren werden folgende Verfahren für den Nachweis des Feuerwiderstands von Verbundbauteilen zur Verfügung gestellt:

Ebene 1 (Klassifizierung)

- Verbundträgern
 - aus kammerbetonierten Stahlprofilen der Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 180
 - aus betonummantelten Stahlprofilen der Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 180, bei denen der Beton nur isolierende und keine tragende Funktion hat,



- Verbundstützen
 - aus vollständig einbetonierten Stahlprofilen der Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 240,
 - aus vollständig einbetonierten Stahlprofilen der Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 180 mit ausschließlich isolierender Funktion des Betons,
 - aus kammerbetonierten Stahlprofilen der Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 120,
 - aus betongefüllten Hohlprofilen der Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 180.

Hier wurden die in der DIN 4102-4 enthaltenen Bemessungstabellen, abgestimmt auf das veränderte Sicherheitskonzept der Eurocodes, aus den deutschen Regelungen übernommen. Beispielhaft ist in Bild 20 ein Ausschnitt aus der Bemessungstabelle für kammerbetonierte Verbundträger wiedergegeben.

		Feuerwiderstandsklasse R90
3	für den Ausnutzungsfaktor $\eta_{fi,t} = 0,7$	
	min b [mm] und min (A_s / A_f)	
3.1	$h \geq 0,9 \cdot \min b$	300/0,6
3.2	$h \geq 1,5 \cdot \min b$	270/0,4
3.3	$h \geq 2,0 \cdot \min b$	210/0,4
3.4	$h \geq 3,0 \cdot \min b$	190/0,4

Bild 20 EC4-1-2 Tabelle 4.1

Mindestquerschnittsabmessungen min b und erforderliche Verhältnisse min (A_s / A_f) von Zulagebewehrung zur Untergurtfläche für Verbundträger mit ausbetonierten Kammern

Der Ausnutzungsfaktor $\eta_{fi,t}$ in den Tabellen kennzeichnet den Quotienten zwischen Bemessungswert der Beanspruchungen im Brandfall und der Beanspruchbarkeit für Normaltemperatur

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{fi,d,t}}{R_d} \tag{10}$$



Ebene 2 (Vereinfachte Berechnungsverfahren)

- Verbunddecken
- Verbundträger
 - mit bekleidetem oder unbekleidetem Stahlprofil
 - mit ausbetonierten Kammern
- Verbundstützen
 - aus Stahlprofilen mit ausbetonierten Seitenteilen
 - aus betongefüllten Hohlprofilen

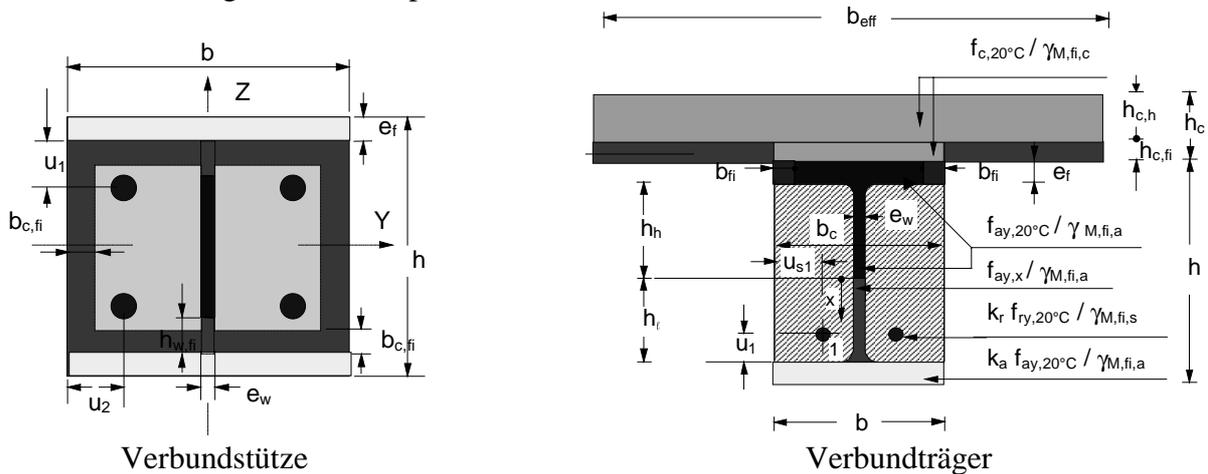


Bild 21 Beispiele für brandreduzierte Verbundquerschnitte mit Kammerbeton

Die vereinfachten Berechnungsverfahren der Ebene 2 ermöglichen dem Tragwerksplaner mehr als die Tabellenverfahren, den Feuerwiderstand der Verbundbauteile rechnerisch nachzuweisen. Der Verbundquerschnitt kann den Anforderungen somit besser angepasst werden kann.

Bei den vereinfachten Rechenverfahren erfolgt zunächst eine Berechnung der Querschnittstragfähigkeit des zu bemessenden Bauteils für die Branddauer unter Einheits-Temperaturzeitkurve, die der angestrebten Feuerwiderstandsdauer entspricht. In diesem Zusammenhang wird von sogenannten „brandreduzierten“ Querschnitten gesprochen (s. Bild 21). Die Vereinfachung gegenüber allgemeinen Rechenverfahren besteht darin, dass die Temperaturberechnung zur Bestimmung der Querschnittstemperaturen überbrückt wird, indem die Festigkeitsabminderung für festgelegte Querschnittsbereiche in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsdauer und z. B. der Bauteilmassigkeit (U/A-Wert) direkt vorgegeben ist.

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



7 Zusammenfassung und Ausblick

Die brandschutztechnischen Nachweise im Stahl- und Verbundbau erfahren durch die heißen Eurocodes EC3-1-2 und EC4-1-2 zusammen mit den zugehörigen Nationalen Anwendungsdokumenten gegenüber der DIN 4102-4 eine wesentliche Erweiterung. Beim Brandschutz der Bauteile hält der rechnerische Nachweis analog zum Standsicherheitsnachweis bei Normaltemperatur Einzug. Die für den Brandschutz erforderlichen passiven Maßnahmen lassen sich auf dieser Grundlage im Sinne einer Bemessung optimieren.

Die heißen Eurocodes dürfen nun im Einzelfall angewendet werden und stellen eine technisch gleichwertige Lösung im Sinne von §3 Abs. 3 MBO dar. Als weiterer Schritt soll der Beschluss zur Aufnahme in die Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen folgen. Darüber wird voraussichtlich im Frühjahr 2000 in der Fachkommission Bautechnik beraten.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick, wie nach den heißen Eurocodes die Einwirkungen im Brandfall ermittelt werden. Für den Stahlbau und den Verbundbau werden die Verfahren dargestellt, mit denen die Beanspruchbarkeiten der Bauteile im Brandfall berechnet werden können.

Die vorliegenden Brandschutzteile der Eurocodes sind als Europäische Vornormen parallel zu den nationalen Vorschriften gültig. Bereits in etwa zwei bis drei Jahren sollen sie ihren Vornormcharakter verlieren und in überarbeiteter Fassung als Europäische Norm veröffentlicht werden. Möglicherweise fallen dann die Einschränkungen, die zur Zeit durch die Nationalen Anwendungsdokumente hinsichtlich der Berücksichtigung von Naturbränden auf Seite der Einwirkungen und der allgemeinen Berechnungsverfahren auf Seite der Beanspruchbarkeiten formuliert werden.

8 Literatur

- [1] DIN V ENV 1991-2-2 Eurocode 1 - Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke - Einwirkungen im Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1991-2-2 : 1995, Mai 1997, Beuth Verlag, Berlin
- [2] DIN V ENV 1993-1-2 Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1993-1-2 : 1995, Mai 1997, Beuth Verlag, Berlin
- [3] DIN V ENV 1994-1-2 Eurocode 4 - Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1994-1-2 : 1994, Juni 1997, Beuth Verlag, Berlin
- [4] DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Ausgabe 03.94



- [5] DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe 09.77
- [6] Schleich, J.-B.: Globales Brandsicherheitskonzept, Stahlbau 67, Heft 2, S. 81 bis 96, 1998
- [7] DIN 18230-1, Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Beuth Verlag, Berlin, 05.1998
- [8] DASt-Richtlinie 104 - Nationales Anwendungsdokument (NAD), Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1994 Teil 1-1, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 1994
- [9] Fontana, M.: Das Euronomogramm – ein praktisches Hilfsmittel zur Berechnung des Feuerwiderstandes von Bauteilen aus Stahl nach Eurocode 3, Stahlbau 65, Heft 2, S. 57 bis 59, 1996
- [10] EKS N°92, Explanatory Document for ECCS N°89 „Euro-Nomogramm“ Fire Resistance of Steel Structures, Brüssel, 1996
- [11] Halfkann, K.-H.; Heinemeyer, C.; Schaumann, P.; Stöber, W.; Upmeyer, J.: Brandschutz im Stahlbau nach Musterbauordnung, Empfehlungen des DSTV-Arbeitsausschusses Brandschutz, Deutscher Stahlbau-Verband, Düsseldorf, 1. Auflage, Oktober 1999
www.stahlbau.uni-hannover.de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen.htm
- [12] Schaumann, P.: Brandschutznachweise für ungeschützte Stahlkonstruktionen - Näherungsformeln für die Erwärmung nach ETK, BundesBauBlatt, Heft 7, S. 69 bis 71, 1999
- [13] Dorn, T., Haß, R., Kordina, K.: Brandverhalten von Verbundstützen und -trägern, Mitteilungen des Instituts für Bautechnik, Heft 4, 1988, S. 104 bis 105
Amtlicher Teil: Angaben über Brandverhalten von Verbundstützen und Verbundträgern, S. 106 bis 109
- [14] Dorn, Th., Hosser, D., Muess, J., Schaumann, P.: Ein rechnerisches Verfahren zum brandschutztechnischen Nachweis von kammerbetonierten Verbundträgern, STAHLBAU 59 (1990), H. 12, S. 359 bis 368, 1990
- [15] Hosser, D.; Dorn, T.; El-Nesr, O.: Ein rechnerisches Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von kammerbetonierten Verbundträgern, Teil 2: Durchlaufträger, STAHLBAU 63, Heft 8, 1994
- [16] Hosser, D.; Dorn, T.; El-Nesr, O.: Vereinfachtes Rechenverfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Verbundstützen aus kammerbetonierten Stahlprofilen, STAHLBAU 63, Heft 3 und 4, 1994

Zahlenbeispiele zur Brandschutzbemessung im Stahl- und Verbundbau:

- [17] Schaumann, P.: Brandschutzbemessung im Stahlbau – DIN V ENV 1993-1-2 - Eurocode 3 Teil 1-2, in: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes – Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6, Beuth Verlag, 2000
- [18] Bock, M.; Schaumann, P.: Erläuterungen und Anwendungshilfen für die brandschutztechnische Bemessung mit Eurocode 3 Teil 1-2
Dorn, Th.; Schaumann, P.: Erläuterungen und Anwendungshilfen für die brandschutztechnische Bemessung mit Eurocode 4 Teil 1-2
in Hosser, D. et al.: Gleichwertigkeit von Brandschutznachweisen nach Eurocode und DIN 4102-4. Forschungsbericht im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik. iBMB Braunschweig, November 1998