

Brandschutznachweise

Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger
Dipl.-Ing. (FH) Martin Stadler

Lehrstuhl für Metallbau
Technische Universität München

Workshop Eurocode 3
Rechenbeispiele

08. November 2008
München

Inhalt

1	Einleitung	3
1.1	Brandschutz im Bauordnungsrecht.....	3
1.2	Europäische Normung.....	5
2	Grundlagen der Bemessung	7
2.1	Einwirkungen im Brandfall.....	7
2.1.1	Thermische Beanspruchungen.....	7
2.1.2	Mechanische Beanspruchungen.....	8
2.2	Temperaturabhängige Materialeigenschaften.....	10
3	Tragwerksbemessung für den Brandfall nach vereinfachten Verfahren	15
3.1	Entwicklung der Stahltemperatur.....	15
3.1.1	ungeschützte, innen liegende Stahlkonstruktionen.....	15
3.1.2	geschützte, innen liegende Stahlkonstruktionen.....	17
3.2	Nachweis auf Tragfähigkeitsebene.....	18
3.2.1	Querschnittsklassifizierung.....	18
3.2.2	Zugbeanspruchte Bauteile.....	18
3.2.3	Bauteile unter zentrischer Druckbeanspruchung.....	18
3.2.4	Biegung mit und ohne Querkraft.....	20
3.2.5	Beanspruchung durch ein- oder zweiachsige Biegung und Drucknormalkraft.....	21
3.3	Nachweis auf Temperaturebene.....	23
3.4	Bemessungshilfsmittel.....	24
3.4.1	Auf Zug oder Biegung beanspruchte Bauteile.....	24
3.4.2	Bauteile mit zentrischem Druck.....	28
4	Beispiele	31
4.1	ungeschützter Deckenträger.....	31
4.1.1	Nachweis unter Normaltemperatur.....	32
4.1.2	Ermittlung der Stahltemperatur.....	32
4.1.3	Nachweis im Brandfall auf Tragfähigkeitsebene.....	34
4.1.4	Nachweis im Brandfall auf Temperaturebene.....	35
4.1.5	Nachweis mit Bemessungs-Nomogramm.....	36
4.2	geschützte Stütze.....	37
4.2.1	Nachweis unter Normaltemperatur.....	38
4.2.2	Ermittlung der Stahltemperatur.....	38
4.2.3	Nachweis im Brandfall auf Tragfähigkeitsebene.....	40
4.2.4	Nachweis im Brandfall auf Temperaturebene.....	41
4.2.5	Nachweis mit Bemessungs-Nomogramm.....	41
5	Literatur	43

1 Einleitung

1.1 Brandschutz im Bauordnungsrecht

„Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind.“ (Art. 12: Brandschutz, BayBO)

Jedes Bundesland in Deutschland ist dafür verantwortlich, die öffentliche Sicherheit und Ordnung zu gewährleisten. Wesentlicher Bestandteil dieses Ordnungsrechts ist der Brandschutz. Die von den Ländern gegründete Musterbauordnungskommission hat eine Musterbauordnung (MBO) erarbeitet, deren Vorschläge zum Brandschutz weitestgehend von allen Ländern übernommen wurden. So sind in jeder Landesbauordnung Vorschriften zu finden, die das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen regeln. Je nach Gebäudeklasse und Bauteilart werden unterschiedliche Anforderungen an das Brandverhalten gestellt. Über die Landesbauordnungen hinaus existieren desweiteren Sonderverordnungen (Garagen- und Stellplatzverordnung, etc.), die ebenfalls Brandschutzvorschriften enthalten.

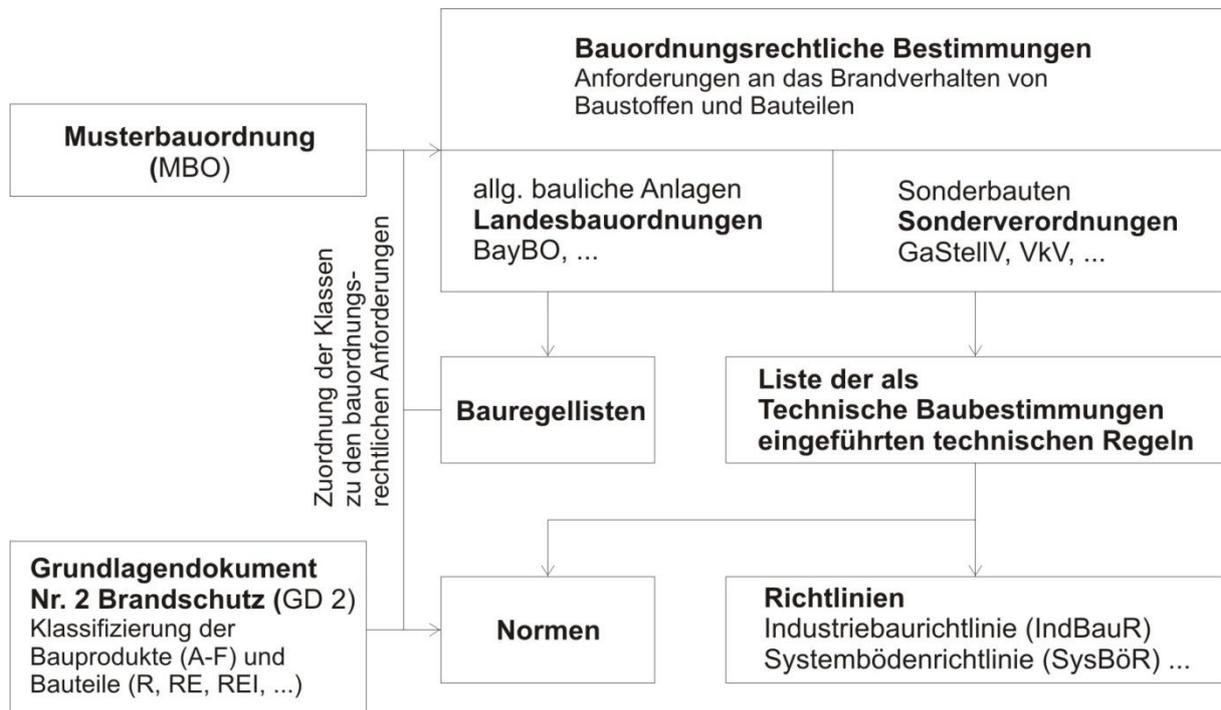


Bild 1.1: Übersicht über die Zusammenhänge der bauaufsichtlichen Vorschriften und technischen Regelungen

Die Umsetzung der bauordnungsrechtlichen Brandschutzvorschriften erfolgt über Normen und Richtlinien. Das Bayerische Staatsministerium des Innern veröffentlicht eine *Liste der als Technische Baubestimmungen eingeführten technischen Regeln*, die laut Art. 3 der BayBO beachtet werden müssen. Die europäischen Normen zum Brandschutz wurden auf Basis des Grundlagendokuments Nr. 2 „Brandschutz“ (GD 2) entwickelt, das unter anderem eine Klas-

sifizierung von Baustoffen und Bauteilen enthält. Die Verknüpfung zwischen den bauordnungsrechtlichen Bestimmungen und den technischen Regeln erfolgt über die Bauregellisten (vgl. Bild 1.2). In Bild 1.1 sind die Zusammenhänge zur Veranschaulichung nochmals dargestellt. Weiterführende Informationen sind in [2] zu finden.

Anlage 0.1.2 (2007/2)

Die nach DIN EN 13501-2 und DIN EN 13501-3 und DIN EN 13501-4¹ klassifizierten Eigenschaften zum Feuerwiderstandverhalten entsprechen folgenden Anforderungen in bauaufsichtlichen Verwendungsvorschriften:

Tabelle 1: Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen nach DIN EN 13501-2 und ihre Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile		Nichttragende Innenwände	Nichttragende Außenwände	Doppelböden	Selbständige Unterdecken
	ohne Raumabschluss ²	mit Raumabschluss ²				
feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i→o) und EI 30-ef (i←o)	REI 30	EI 30(a↔b)
hochfeuerhemmend	R 60	REI 60	EI 60	E 60 (i→o) und EI 60-ef (i←o)		EI 60(a↔b)
feuerbeständig	R 90	REI 90	EI 90	E 90 (i→o) und EI 90-ef (i←o)		EI 90(a↔b)
Feuerwiderstandsfähigkeit 120 Min.	R 120	REI 120	—	—		—
Brandwand	—	REI 90-M	EI 90-M	—		—

¹ zurzeit Entwurf, anwendbar mit Erscheinen der Norm

² Für die mit reaktiven Brandschutzsystemen beschichteten Stahlbauteile ist die Angabe IncSlow gemäß DIN EN 13501-2 zusätzlich erforderlich.

Bild 1.2: Verknüpfung der bauaufsichtlichen Anforderungen mit den technischen Regelungen (aus [1])

1.2 Europäische Normung

Die Klassifizierung der Bauprodukte und Bauteile auf Grundlage europäischer Normen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Das Brandverhalten von Bauprodukten wird vor allem über Versuche nachgewiesen. Die Klassifizierung erfolgt dann nach DIN EN 13501-1. Der Feuerwiderstand von Bauteilen kann ebenfalls durch Versuche nachgewiesen werden. Die entsprechende Norm zur Klassifizierung ist in diesem Fall DIN EN 13501-2. Für die Durchführung der Versuche selbst existiert in beiden Fällen eine Vielzahl von Normen (weiterführende Hinweise s. [2]).

Im Unterschied zur bisherigen Klassifizierung in Deutschland nach DIN 4102 werden nach europäischer Regelung unterschiedliche Zeiten für jedes einzelne Versagenskriterium angegeben. Nach DIN 4102 wurde ein Bauteil beispielsweise dann in F 30 eingeordnet, wenn alle Versagenskriterien mindestens 30 Minuten lang erfüllt waren. Im Gegensatz dazu kann nach dem europäischen Klassifizierungssystem ein Bauteil beispielsweise der Klasse REI 30 / RE 60 / R 90 zugeordnet werden, wenn das Bauteil bei der Prüfung zwar nach 90 Minuten noch eine ausreichende Tragfähigkeit besitzt (Kriterium R), jedoch bereits nach 60 Minuten seine raumabschließende Wirkung verliert (Kriterium E) und nach mehr als 30 Minuten die wärmedämmende Wirkung bei Brand nicht mehr gewährleistet ist (Kriterium I).

Die Tragfähigkeit eines Bauteils (Kriterium R) kann - neben Versuchen - auf Grundlage der Eurocodes erstmals auch rechnerisch nachgewiesen werden. In den Eurocodes sind grundsätzlich drei Nachweisebenen vorgesehen (vgl. Tabelle 1.1):

Ebene 1 Bemessungswerte in Tabellenform

Dieses Nachweisformat entspricht dem Vorgehen nach DIN 4102-4. Im Eurocode 3 für Stahlbauten ist diese Ebene nicht enthalten.

Ebene 2 einfache Bemessungsverfahren

In dieser Ebene wird von vereinfachten Annahmen ausgegangen. Bei den einfachen Verfahren stehen im Eurocode 3 zwei Möglichkeiten für die Bemessung zur Verfügung:

➤ Nachweis der Tragfähigkeit

Dieses Nachweisformat entspricht prinzipiell dem üblichen Vorgehen der Eurocodes bei Umgebungstemperatur. Der Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung im Brandfall $E_{fi,d,t}$ darf zu jedem Zeitpunkt t nicht größer sein als der entsprechende Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Stahlbauteils im Brandfall $R_{fi,d,t}$. Bei der Ermittlung der Beanspruchbarkeit muss das Materialverhalten des Stahls unter erhöhten Temperaturen über Abminderungsfaktoren berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Temperaturentwicklung im Stahlbauteil, die vereinfacht über den Querschnitt konstant angenommen wird, stehen im Eurocode Formeln für geschützte und ungeschützte Stahlbauteile zur Verfügung.

➤ Nachweis der kritischen Temperatur

Alternativ kann auch nachgewiesen werden, dass die Stahltemperatur im Bauteil $\theta_{a,d}$ einen kritischen Wert nicht überschreitet $\theta_{a,cr,d}$. Die kritische Temperatur ist dabei die Temperatur im Bauteil, bei welcher die Festigkeiten (oder Steifigkeiten) des Stahls soweit gesunken sind, dass der Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht ist.

Ebene 3 erweiterte Berechnungsmodelle

Dieses Nachweisformat erfordert eine vollständige thermische und mechanische Analyse mithilfe numerischer Simulationen (Finite Elemente). Der Nachweis der Tragfähigkeit kann entweder im Zeitbereich ($t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$), Festigkeitsbereich ($E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$) oder im Temperaturbereich ($\theta_d \leq \theta_{cr,d}$) erfolgen. Im derzeit noch gültigen nationalen Anwendungsdokument (DIN-Fachbericht 93) ist geregelt, dass

diese allgemeinen Rechenverfahren nur nach Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde angewendet werden dürfen.

Tabelle 1.1: Möglichkeiten der Brandschutznachweise nach Eurocode 3

Ebene	Bezeichnung	Nachweisformat		Abschnitt in DIN EN 1993-1-3
		Überprüfung maßgebender Parameter	Klassifizierung	
1	Bemessungswerte in Tabellenform	Überprüfung maßgebender Parameter	Klassifizierung	nicht vorgesehen
2	einfache Bemessungsverfahren	Tragfähigkeitsnachweis	$E_{f_i,d,t} \leq R_{f_i,d,t}$	4.2.3
		kritische Temperatur	$\theta_{a,d} \leq \theta_{a,cr,d}$	4.2.4
3	erweiterte Berechnungsmodelle	vollständige thermische und mechanische Analyse (FEM)	$t_{f_i,d} \geq t_{f_i,requ}$ $E_{f_i,d,t} \leq R_{f_i,d,t}$ $\theta_{a,d} \leq \theta_{a,cr,d}$	4.3

In den folgenden Abschnitten wird zuerst die Vorgehensweise bei der Bemessung nach Eurocode erläutert. Dabei wird nur auf die vereinfachten Bemessungsverfahren (Ebene 2) eingegangen, da derzeit keine Bemessungstabellen nach Eurocode 3 existieren (Ebene 1) und die erweiterten Berechnungsmodelle (Ebene 3) hauptsächlich nur von Forschungseinrichtungen und besonders spezialisierten Ingenieurbüros angewendet werden.

Die Einführung der Eurocodes ist derzeit noch nicht abgeschlossen (vgl. Tabelle 1.2). Deshalb existieren an einigen Stellen noch keine endgültigen Regelungen. Mit der Einführung der nationalen Anwendungsdokumente können sich noch einige Details ändern. In dieser Arbeit wird versucht, die aktuellsten Regelungen wiederzugeben, wie sie vermutlich nach Meinung des Autors künftig vorgeschrieben sein werden. Bei der praktischen Anwendung der Eurocodes muss jedoch immer überprüft werden, ob die hier angegebenen Regelungen noch gültig sind.

Tabelle 1.2: Normen für die Brandschutzbemessung im Stahlbau nach den Eurocodes

Norm	bauaufsichtlich eingeführt	veröffentlicht, nicht eingeführt
Grundlagen der Bemessung	DIN 1055-100	DIN EN 1990
Einwirkungen auf Tragwerke allgemein	DIN 1055	DIN EN 1991-1
Brandeinwirkung auf Tragwerke	DIN V ENV 1991-2-2 DIN-Fachbericht 91	DIN EN 1991-1-2
Tragwerksbemessung von Stahlbauten für den Brandfall	DIN V ENV 1993-1-2 DIN-Fachbericht 93	DIN EN 1993-1-2

2 Grundlagen der Bemessung

2.1 Einwirkungen im Brandfall

Die thermischen und mechanischen Einwirkungen sollten EN 1991-1-2 entnommen werden.

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 2.2 (1)

Dieser Satz bezieht sich jedoch vorwiegend auf die thermischen Einwirkungen. Die mechanischen Einwirkungen werden größtenteils nach den gleichen Normen ermittelt, die auch für die Lastannahmen unter normalen Temperaturen gelten. Nur einige Ergänzungen, die speziell den Brandfall betreffen, werden dort noch gegeben.

2.1.1 Thermische Beanspruchungen

Im Eurocode werden verschiedene nominelle Temperaturzeitkurven angeboten, um den Bemessungsbrand für ein Bauteil zu simulieren.

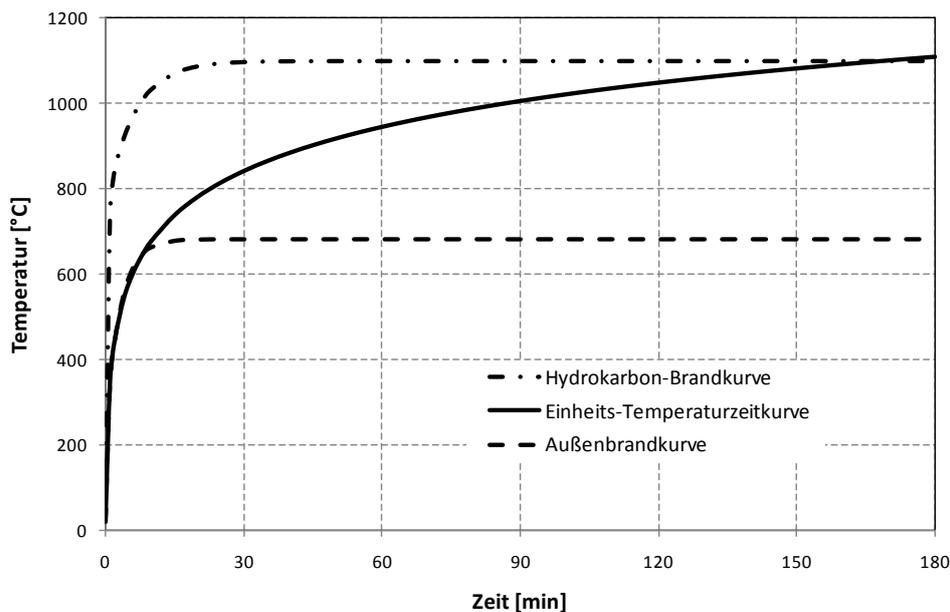


Bild 2.1: Nominelle Temperaturzeitkurven nach DIN EN 1991-1-2

- Einheits-Temperaturzeitkurve
Diese Kurve entspricht der ETK nach DIN 4102-2. Im NAD zur Vornorm ist festgelegt, dass diese Kurve grundsätzlich gilt.
- Außenbrandkurve
Diese Kurve soll laut NAD zur Vornorm zum Nachweis des Raumabschlusses bei nichttragenden Außenwänden und aufgesetzten Brüstungen angewendet werden.
- Hydrokarbon-Brandkurve
Diese sehr extreme Kurve simuliert Flüssigkeitsbrände und ist für Hochbauten in der Regel nicht anzuwenden (DIN-FB 91).

DIN EN 1991-1-2
Abschn. 3.2.1

Abschn. 3.2.2

Abschn. 3.2.3

d) Naturbrandmodelle

Diese Brandmodelle können zwar die Realität teilweise am genauesten abbilden. Sie sind jedoch derzeit grundsätzlich nicht zur Anwendung in Deutschland freigegeben (DIN-FB 91).

DIN EN 1991-1-2
Abschn. 3.3

Die durch die Kurven gegebenen Temperaturen entsprechen den Temperaturen im Brandraum. Durch Konvektion und Strahlung geht die Wärme in das Bauteil über. Der Verlauf der Bauteiltemperatur lässt sich dann allgemein über physikalische Gesetze der Thermodynamik berechnen. Im Abschnitt 3.1 der DIN EN 1991-1-2 sind hierfür Hilfestellungen gegeben. DIN EN 1993-1-2 gibt für Stahlbauteile vereinfachte Berechnungsformeln vor (s. Kapitel 3.1).

2.1.2 Mechanische Beanspruchungen

Der Eurocode unterscheidet zwischen zwei Arten von mechanischen Einwirkungen im Brandfall:

DIN EN 1991-1-2
Kapitel 4

a) Direkte Einwirkungen

Dies sind die bekannten Belastungen, wie sie auch bei Raumtemperatur berücksichtigt werden müssen (Eigengewicht, Verkehrslasten, Schnee, ...). Bis zur Einführung der DIN EN 1991-1 für Lastannahmen können die Belastungen der DIN 1055 entnommen werden.

b) Indirekte Einwirkungen

... sind Beanspruchungen, die durch die Temperaturänderung im Brandfall selbst hervorgerufen werden. Sie sind vor allem kritisch, wenn die - im Brandfall durchaus erheblichen - Temperaturdehnungen behindert werden und dadurch Zwangskräfte hervorrufen. Dies ist beispielsweise in statisch unbestimmten Systemen der Fall.

Die charakteristischen Einwirkungen werden dann, wie im semiprobabilistischen Sicherheitskonzept der Eurocodes üblich, zu einer maßgebenden Einwirkung $E_{fi,d,t}$ kombiniert. Im Brandfall handelt es sich hierbei um eine außergewöhnliche Bemessungssituation. Zu beachten ist, dass sich die Einwirkung zu jedem Zeitpunkt ändert (Index t), falls indirekte Einwirkungen zu beachten sind.

$$E_{fi,d,t} = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

DIN 1055-100
Abschn. 9.4 (4) b

mit

$\gamma_{GA} = 1,0$ Das Eigengewicht (ständige Einwirkungen) wird mit dem charakteristischen Wert berücksichtigt

$G_{k,j}$ charakteristische Werte der ständigen Einwirkungen

$A_d = \gamma_A \cdot A_k$ Bemessungswert der indirekten Einwirkungen ($\gamma_A = 1,0$)

$\psi_{1,1}$ Kombinationsbeiwert der veränderlichen Leiteinwirkung, in DIN 1055-100 wird der „häufige“-Wert verwendet (s. Tabelle 2.1) im Eurocode 1 wird für die Leiteinwirkung der „quasi-ständige“ Kombinationsbeiwert $\psi_{2,1}$ empfohlen

DIN-FB 91
Abschn. F.3.1

DIN 1055-100
Tabelle A.3

DIN EN 1991-1-2
Abschn. 4.3.1

$Q_{k,1}$ charakteristischer Wert der veränderlichen Leiteinwirkung

$\psi_{2,i}$ Kombinationsbeiwert der weiteren veränderlichen Einwirkungen, hier wird der „quasi-ständige“ Wert verwendet

$Q_{k,i}$ char. Wert der weiteren veränderlichen Einwirkungen

Tabelle 2.1: Kombinationsbeiwerte

DIN 1055-100
Tabelle A.2

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten ^{a,d}			
– Kategorie A – Wohn- und Aufenthaltsräume	0,7	0,5	0,3
– Kategorie B – Büros	0,7	0,5	0,3
– Kategorie C – Versammlungsräume	0,7	0,7	0,6
– Kategorie D – Verkaufsräume	0,7	0,7	0,6
– Kategorie E – Lagerräume	1,0	0,9	0,8
Verkehrslasten			
– Kategorie F, Fahrzeuglast ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
– Kategorie G, ≤ 30 kN \leq Fahrzeuglast ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
– Kategorie H – Dächer	0	0	0
Schnee- und Eislasten			
Orte bis NN + 1 000 m	0,5	0,2	0
Orte über NN + 1 000 m	0,7	0,5	0,2
Windlasten	0,6	0,5	0
Temperatureinwirkungen (nicht Brand) ^b	0,6	0,5	0
Baugrundsetzungen	1,0	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen ^c	0,8	0,7	0,5
^a Abminderungsbeiwerte für Nutzlasten in mehrgeschossigen Hochbauten siehe E DIN 1055-3 ^d ψ -Beiwerte für Maschinenlasten sind betriebsbedingt festzulegen. ^b Siehe E DIN 1055-7 ^c ψ -Beiwerte für Flüssigkeitsdruck sind standortbedingt festzulegen.			

Wenn indirekte Einwirkungen nicht berücksichtigt werden müssen, wenn es sich beispielsweise um ein statisch bestimmtes System handelt, erlaubt der Eurocode vereinfachte Regeln zur Ermittlung des Bemessungswertes der Einwirkungen. In diesem Fall resultieren keine mechanischen Beanspruchungen aus der Temperatureinwirkung ($A_d = 0$) und es wirken nur die äußeren Lasten auf das System. Die Beanspruchungen dürfen dann zum Zeitpunkt $t=0$ berechnet werden und als konstant über die Zeitdauer der Brandbeanspruchung angenommen werden. Die Einwirkungen im Brandfall können dann auch vereinfacht von den Einwirkungen unter normalen Temperaturen abgeleitet werden.

DIN EN 1991-1-2
Abschn. 4.3.2

$$E_{fi,d,t} = E_{fi,d} = \eta_{fi} \cdot E_d$$

mit

E_d Bemessungswert der Beanspruchungen nach der Grundkombination (für normale Temperaturen)

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}} \quad \text{Verhältnis der Belastungen im Brandfall zum „Kaltfall“}$$

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 2.4.2

Als weitere Vereinfachung kann η_{fi} konstant angenommen werden. Eurocode 3 empfiehlt allgemein $\eta_{fi} = 0,65$, für Nutzlasten der Kategorie E $\eta_{fi} = 0,7$. Das NAD zur DIN V ENV 1993-1-2 gibt als vereinfachten Wert $\eta_{fi} = 0,65$ vor.

Anmerkung 2

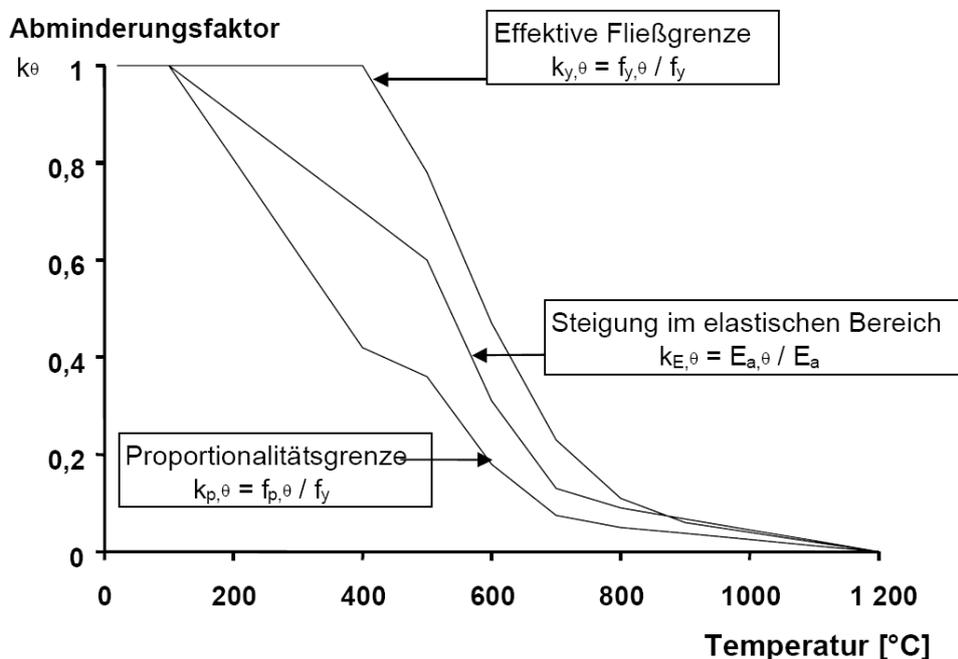
Die Verwendung des vereinfachten Wertes wird jedoch nicht empfohlen, da er oftmals viel zu ungünstig ist. Zum einen ist aufgrund von Gebrauchstauglichkeitsanforderungen (Schwingung, Durchbiegung) die Ausnutzung im Kaltfall häufig sehr gering. Zum anderen müssen im Brandfall die Verkehrslasten nur teilweise angesetzt werden, wodurch sich η_{fi} auf bis zu 0,15 reduzieren kann.

DIN-FB 93
Abschn. 2.4.3 (4)

2.2 Temperaturabhängige Materialeigenschaften

Bei steigender Temperatur ändern sich die Materialeigenschaften des Stahls. Bereits ab etwa 100 °C beginnt der E-Modul zu sinken und ab etwa 400 °C verringert sich auch die Fließgrenze. Bei Raumtemperatur verhält sich Stahl bis zur Fließspannung linear-elastisch, bei erhöhten Temperaturen fällt diese Proportionalitätsgrenze ab (s. Bild 2.2).

Diese Eigenschaften müssen bei der Bemessung im Brandfall berücksichtigt werden. Der Eurocode gibt hierfür Faktoren vor, mit denen die Materialkennwerte unter normalen Temperaturen abgemindert werden können (s. Tabelle 2.2). Diese Abminderungsfaktoren können bei den vereinfachten Bemessungsverfahren (Ebene 2, s. Kapitel 3) direkt verwendet werden. Für die allgemeinen Berechnungsverfahren (Ebene 3) können mit Hilfe dieser Abminderungsfaktoren temperaturabhängige Materialkennlinien erzeugt werden (s. Bild 2.3).



DIN EN 1993-1-2
Bild 3.2

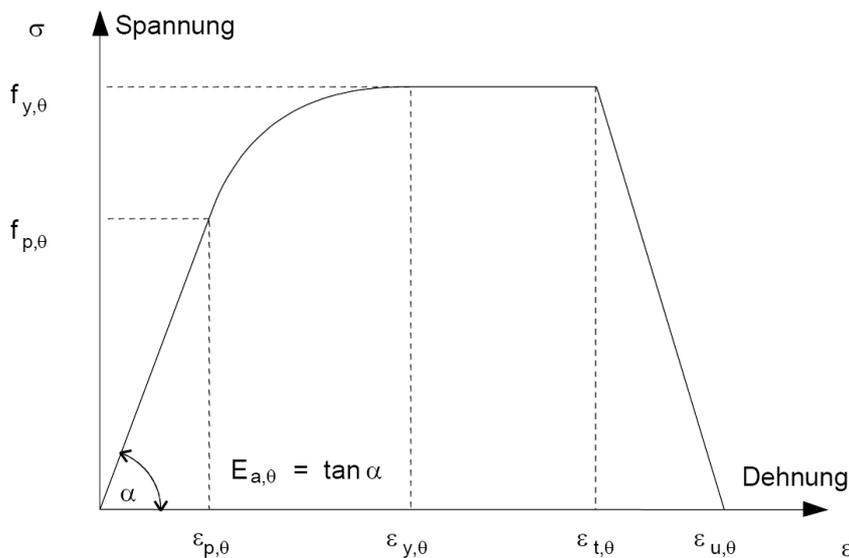
Bild 2.2: Grafik der Abminderungsfaktoren für die Materialkennwerte unter erhöhten Temperaturen

Tabelle 2.2: Abminderungsfaktoren für die Materialkennwerte unter erhöhten Temperaturen

Stahltemperatur θ_a	Abminderungsfaktoren bei Temperatur θ_a relativ zu dem Wert f_y oder E_a bei 20 °C		
	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die effektive Fließgrenze $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die Proportionalitätsgrenze $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu E_a) für die Steigung im elastischen Bereich $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

ANMERKUNG Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

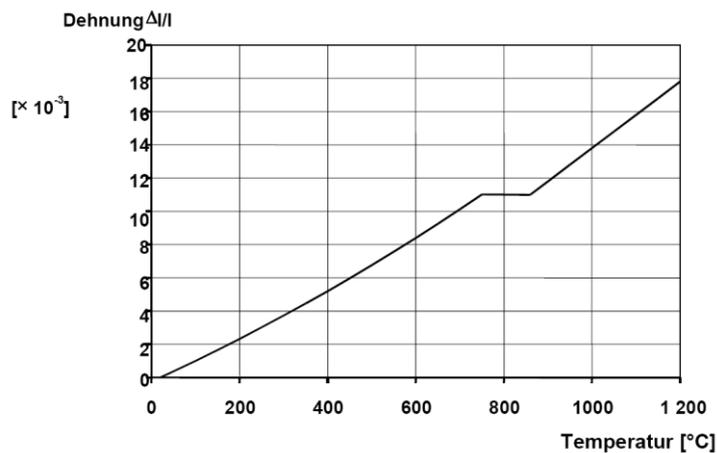
DIN EN 1993-1-2
Tabelle 3.1



DIN EN 1993-1-2
Bild 3.1

Bild 2.3: Spannungs-Dehnungs-Linie von Stahl unter erhöhten Temperaturen

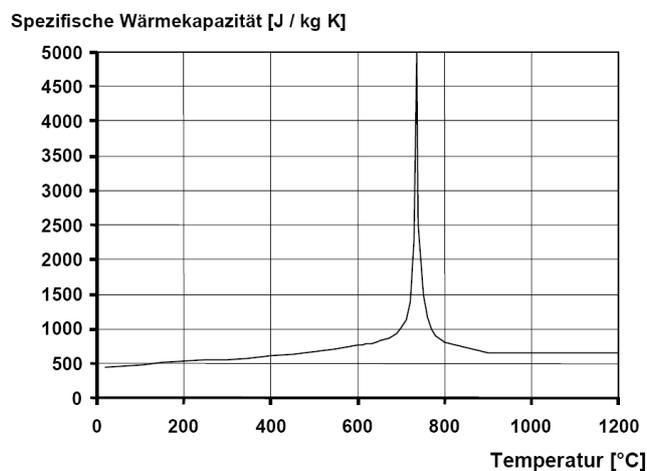
Zu beachten ist auch, dass sich bei steigender Temperatur auch die thermische Dehnung ändert. Bei der Bemessung unter normalen Temperaturen (<100 °C) wird vereinfacht nach DIN EN 1993-1-1 von einem Wärmeausdehnungskoeffizienten $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ausgegangen. Nach DIN EN 1993-1-2, 3.4.1.1 erhöht sich dieser Wert auf bis zu $\alpha = 15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ bei einer Stahltemperatur von 1200 °C. Dieser Effekt ist bei der Ermittlung der indirekten Einwirkungen (Zwängungen) zu berücksichtigen. In DIN EN 1993-1-2 ist anstatt des Wärmeausdehnungskoeffizienten α die thermische Dehnung $\Delta l/l$ gegeben (s. Bild 2.4). Die beiden Werte lassen sich jedoch einfach ineinander überführen: $\Delta l/l = \alpha \cdot \Delta \theta_a$



DIN EN 1993-1-2
Bild 3.3

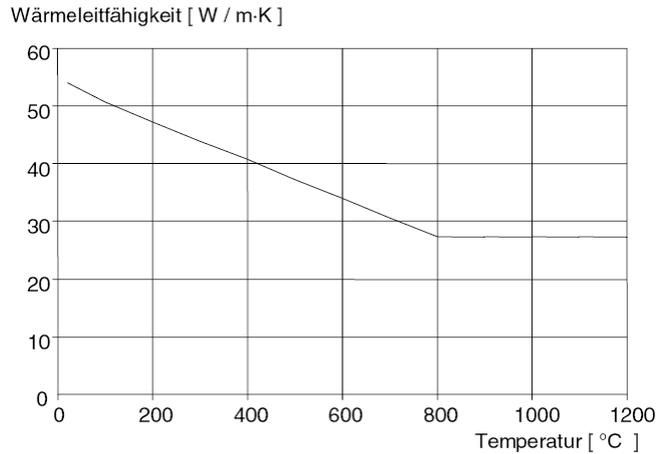
Bild 2.4: Temperaturabhängige thermische Dehnung von Stahl

Weiterhin ändert sich auch die spezifische Wärmekapazität c_a (s. Bild 2.5) und die Wärmeleitfähigkeit λ_a (s. Bild 2.6) bei zunehmender Temperatur. Dies ist jedoch vor allem bei den allgemeinen Berechnungsverfahren von Bedeutung. Nur bei der vereinfachten Berechnung der Entwicklung der Stahltemperatur (s. Kapitel 3.1) muss die spezifische Wärmekapazität berücksichtigt werden.



DIN EN 1993-1-2
Bild 3.4

Bild 2.5: Temperaturabhängige Spezifische Wärmekapazität von Stahl



DIN EN 1993-1-2
Bild 3.5

Bild 2.6: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Stahl

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Materialeigenschaften wurde sowohl in der Vornorm als auch in der endgültigen Fassung mit

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 2.3 (1)

$$\gamma_{M,fi} = 1,0$$

vorgeschlagen. Die Bemessungswerte entsprechen hier also den charakteristischen Werten.

Thermische Kennwerte für Brandschutzmaterialien sind in der DIN EN 1993-1-2 nicht angegeben, da sie von der Art des Materials und somit vom Hersteller abhängen. Sie werden jedoch benötigt, um den Temperaturverlauf von geschützten Stahlbauteilen zu ermitteln. Im NAD zur Vornorm war dennoch eine Tabelle mit solchen Kennwerten gegeben (s. Tabelle 2.3), die evtl. in das NAD zur endgültigen Norm übernommen wird. In [9] wurde eine ausführlichere Tabelle veröffentlicht (s. Tabelle 2.4).

Tabelle 2.3: Thermische Materialkennwerte von Brandschutzbekleidungen

DIN-FB 93
Tabelle R1

Brandschutzmaterial	Wärmeleitfähigkeit λ_p [W/(m x K)]	Spezifische Wärme c_p [J/(kg x K)]	Dichte ρ_p [kg/m³]
Putze:			
Mörtelgruppe P II, P Iva, b, c nach DIN 18550-2	0,12	1100	550
Vermiculite- und Perlitemörtel nach DIN 4102-4 3.1.6.5	0,12	1100	550
Platten:			
Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) nach DIN 18180	0,20	1700	945

Tabelle 2.4: Thermische Materialkennwerte von Brandschutzbekleidungen

aus [9]

Verkleidungs- material	Spez. Masse ρ_p [kg/m ³]	Wärme- leitfähigkeit λ_p [W/mK]	Spezifische Wärme c_p [J/kgK]
Spritzputze			
- Mineralfaser	300	0,12	1200
- Vermiculite, Perlite	350	0,12	1200
Spezialputze			
- Vermiculite (oder Perlite) und Zement	550	0,12	1100
- Vermiculite (oder Perlite) und Gips	650	0,12	1100
Platten			
- Vermiculite (oder Perlite) und Zement	800	0,20	1200
- Faser-Silikate oder Faser-Calcium-Silikate	600	0,15	1200
- Faser-Zement	800	0,15	1200
- Gipskarton	800	0,20	170
Matten			
- Faser-Silikate, Mineral- wolle, Steinwolle	150	0,20	1200
Beton	2300	1,60	1000
Leichtbeton	1600	0,80	840
Betonsteine	2200	1,00	1200
Isolierbacksteine	1000	0,40	1200
Bachsteine	2000	1,20	1200

3 Tragwerksbemessung für den Brandfall nach vereinfachten Verfahren

3.1 Entwicklung der Stahltemperatur

Die Entwicklung der Stahltemperatur in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs der Brandbeanspruchung kann mit dem Eurocode formelmäßig für zwei Fälle berechnet werden. In beiden Fällen wird von einer gleichmäßigen Verteilung der Temperatur über den Stahlquerschnitt ausgegangen, was aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Stahls gerechtfertigt ist. Die Stahltemperatur wird jeweils mit einem Zeitschrittverfahren ermittelt. Das heißt, ausgehend von Raumtemperatur ($\theta_g = \theta_a = 20 \text{ °C}$) wird in kleinen Zeitintervallen schrittweise die Brandgastemperatur und die sich daraus ergebende Stahltemperatur berechnet. Dieses Verfahren ist notwendig, da sich zum einen die Wärmekapazität des Stahls bei steigender Temperatur ändert, zum anderen ist der Wärmestrom zwischen Brandgas und Stahl abhängig von der Temperaturdifferenz beider Stoffe.

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 4.2.5

3.1.1 ungeschützte, innen liegende Stahlkonstruktionen

Abschn. 4.2.5.1

Der Temperaturanstieg im Stahlbauteil $\Delta\theta_{a,t}$ im Zeitintervall Δt kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

DIN EN 1993-1-2
Gl. 4.25

mit

A_m/V Profilmfaktor

Der Profilmfaktor wird als Verhältnis der beflammten Oberfläche zum Volumen des Bauteils angegeben. Er entspricht dem Verhältnis des Umfangs zur Fläche des Querschnitts. Durch ihn wird berücksichtigt, dass sich gedungen Querschnitte langsamer erwärmen als schlanke. In DIN EN 1993-1-2, Tabelle 4.2 sind einige Hilfestellungen zur Berechnung des Profilmfaktors gegeben.

Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V} \quad \text{für I-Querschnitte}$$

$$k_{sh} = \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V} \quad \text{für alle anderen Querschnitte}$$

DIN EN 1993-1-2
Gl. 4.26a
Gl. 4.26b

Mit diesem Faktor wird berücksichtigt, dass sich verzweigte Querschnitte langsamer erwärmen als geschlossene (bei gleichem Profilmfaktor), da manche Querschnittsteile vor direkter Beflammung geschützt werden (Abschattung). $(A_m/V)_b$ ist ein Profilmfaktor, der das Verhältnis zwischen dem Umfang eines imaginären, profilumschließenden Kastens zur Querschnittsfläche angibt. Bei geschlossenen Querschnitten ist $(A_m/V)_b = A_m/V$ und somit $k_{sh} = 1$.

spezifische Wärmekapazität von Stahl:

$$c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$$

für $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$$

für $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$$

für $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$

$$c_a = 650$$

für $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$

$$\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Rohdichte von Stahl

DIN EN 1993-1-2
Gl. 3.2a bis
Gl. 3.2d

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 3.2.2 (1)

Δt Zeitintervall (Schrittweite) in Sekunden

Die Schrittweite sollte nach DIN EN 1993-1-2, Abschn. 4.2.5.1 (4) nicht größer als 5 Sekunden gewählt werden. Größere Schrittweiten liefern zwar kaum abweichende Werte, da die Berechnung jedoch ohne EDV-Unterstützung kaum zu bewältigen ist, kann die Schrittweite ohne Mehraufwand beliebig klein gewählt werden.

Der Netto-Wärmestrom wird nach Eurocode 1 ermittelt:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \text{ [W/m}^2\text{]}$$

DIN EN 1991-1-2
Gl. 3.1

Wärmeübertragung durch Konvektion (convection):

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a)$$

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \text{ Brandgastemperatur nach ETK}$$

t Zeit der Brandeinwirkung in Minuten

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ konvektiver Wärmeübergangskoeffizient für ETK}$$

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, ist die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) derzeit in Deutschland regelmäßig anzuwenden. Sollte die Brandeinwirkung dennoch nach einer anderen Kurve erfolgen, sind die Werte entsprechend anzupassen.

Gl. 3.2

Gl. 3.4

Abschn. 3.2.1 (1)

Wärmeübertragung durch Strahlung (radiation):

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4]$$

ϕ Konfigurationsfaktor

Mit ihm können die Lage des Bauteils zur Brandquelle und Abschattungseffekte von Querschnitten berücksichtigt werden. Im Anhang G der DIN 1991-1-2 wird ein Verfahren zur Berechnung angegeben. Vereinfacht auf der „sicheren Seite“ kann $\phi = 1,0$ gesetzt werden.

$$\varepsilon_m = 0,7 \text{ Emissivität der Bauteiloberfläche}$$

Sie gibt den Grad der Wärmeabstrahlung an. Ein vollkommen schwarzer Körper hätte den Wert 1, eine vollkommen reflektierende Oberfläche den Wert 0.

$$\varepsilon_f = 1,0 \text{ Emissivität des Feuers}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 \text{ Stephan-Boltzmann-Konstante}$$

Gl. 3.3

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 2.2 (2)

DIN EN 1991-1-2
Abschn. 3.1 (6)

In der Vornorm war ε_m noch mit 0,5 angenommen und Abschattungseffekte nicht berücksichtigt. Berechnungshilfen, die auf dieser Norm basieren, wie das „Euro-Nomogramm“, müssen deshalb evtl. modifiziert werden oder können nicht mehr verwendet werden. In Kapitel 3.4 sind einige Bemessungshilfen auf Grundlage der aktuellen Normen ähnlich dem Euro-Nomogramm gegeben.

3.1.2 geschützte, innen liegende Stahlkonstruktionen

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 4.2.5.2

Die Berechnung erfolgt analog zu den ungeschützten Bauteilen.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \text{ aber } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ wenn } \Delta\theta_{g,t} > 0$$

DIN EN 1993-1-2
Gl. 4.27

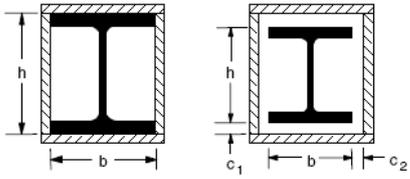
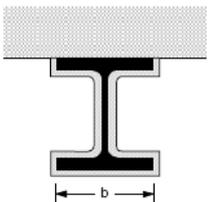
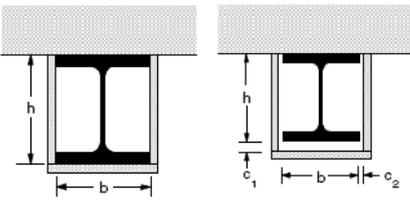
mit

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$$

A_p / V Profilmfaktor des wärmedämmten Stahlbauteils (s. Tabelle 3.1)

Tabelle 3.1: Profilmfaktor A_p / V

DIN EN 1993-1-2
Tabelle 4.3

Skizze	Beschreibung	Profilmfaktor (A_p / V)
	Profilmfolgende Verkleidung konstanter Dicke	$\frac{\text{Stahlumfang}}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$
	Kastenverkleidung ¹⁾ konstanter Dicke	$\frac{2(b+h)}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$
	Profilmfolgende Verkleidung konstanter Dicke mit dreiseitiger Brandbeanspruchung	$\frac{\text{Stahlumfang} - b}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$
	Kastenverkleidung ¹⁾ konstanter Dicke mit dreiseitiger Brandbeanspruchung	$\frac{2h+b}{\text{Fläche des Stahlquerschnitts}}$

¹⁾ Die Größe der Zwischenräume c_1 und c_2 sollte $h/4$ nicht überschreiten.

d_p Dicke des Brandschutzmaterials [m]

c_p, λ_p, ρ_p spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte des Brandschutzmaterials. Diese Werte können entweder von den Herstellerangaben übernommen werden oder aus den Tabellen 2.3 und 2.4.

$$\Delta t \leq 30 \text{ s}$$

Abschn. 4.2.5.2
(3)

Die restlichen Werte sind analog zur Berechnung für ungeschützte Bauteile.

3.2 Nachweis auf Tragfähigkeitsebene

Die Nachweise erfolgen analog den Verfahren bei normalen Temperaturen. Hier soll nur auf die Besonderheiten bei der Bemessung im Brandfall eingegangen werden.

3.2.1 Querschnittsklassifizierung

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 4.2.2

Die Querschnittsklassifizierung erfolgt wie unter Normaltemperatur, der Beiwert zur Berücksichtigung des Materials wird jedoch pauschal um 15% abgemindert, da im Brandfall größere Dehnungen auftreten können.

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y}$$

3.2.2 Zugbeanspruchte Bauteile

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 4.2.3.1

Die plastische Querschnittstragfähigkeit wird mit abgeminderter Streckgrenze berechnet. Der Abminderungsfaktor $k_{y,\theta}$ wird wie in Kapitel 2.2 beschrieben ermittelt.

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd}(\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi})$$

3.2.3 Bauteile unter zentrischer Druckbeanspruchung

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 4.2.3.2

Ähnlich wie bei Raumtemperatur wird beim „Knicknachweis“ die vollplastische Normalkrafttragfähigkeit mit einem Knickbeiwert χ abgemindert. Die geringere Streckgrenze im Brandfall wird mit dem Abminderungsfaktor $k_{y,\theta}$ berücksichtigt.

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}}$$

$$\varphi_{\theta} = 0,5(1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2)$$

Im Gegensatz zum Nachweis bei Normaltemperatur ist der Imperfektionsbeiwert α im Brandfall vom Material abhängig.

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y}$$

Bei der Ermittlung der bezogenen Schlankheit $\bar{\lambda}_{\theta}$ wird die Schlankheit unter Raumtemperatur $\bar{\lambda}$ (s. DIN EN 1993-1-1, Abschn. 6.3.1.3) aufgrund der geringeren Streckgrenze und Steifigkeit im Brandfall abgemindert.

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{k_{y,\theta}/k_{E,\theta}}$$

Die Knicklinie variiert mit der Streckgrenze des Stahls und der Stahltemper-

ratur. Sie verläuft unabhängig von der Querschnittsform etwa im Bereich der Knicklinie d der Bemessung im Kaltfall (s. Bild 3.1).

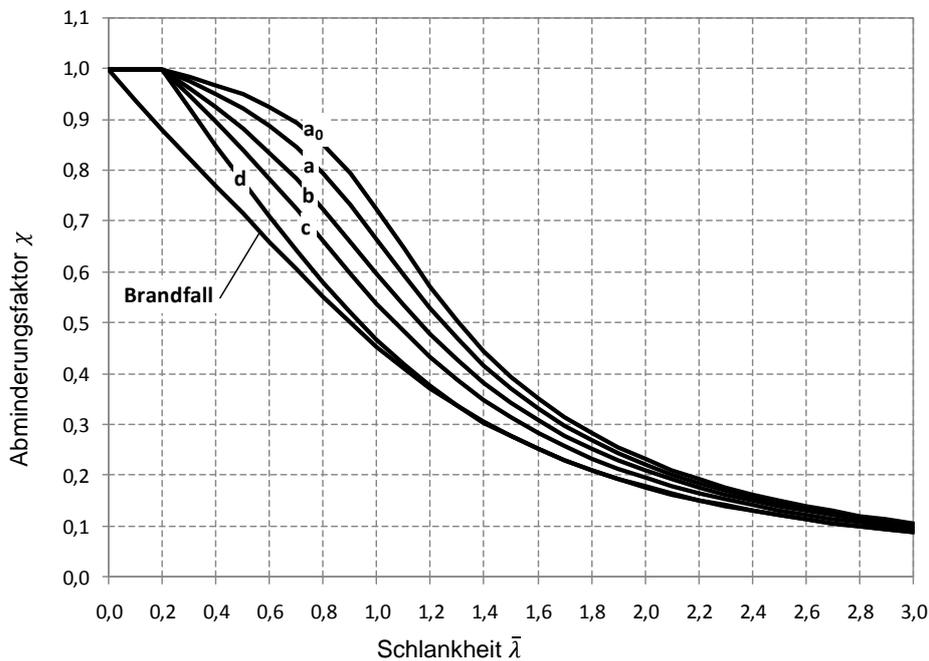
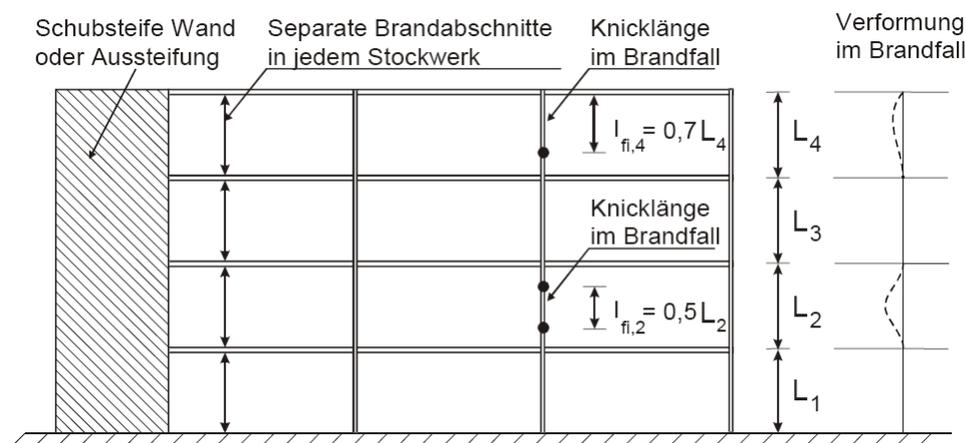


Bild 3.1: Knicklinien für Normaltemperatur und Brandfall (S235, $\theta_a = 500^\circ\text{C}$)

Bei Stützen, die über mehrere Stockwerke durchlaufen und bei denen jedes Stockwerk einen eigenen Brandabschnitt bildet, reduziert sich die Knicklänge im Brandfall (s. Bild 3.2). Dies kann dadurch begründet werden, dass die Steifigkeit der Stütze im beflamnten Bereich sehr viel geringer ist als in den darüber und darunter liegenden kalten Stockwerken, wodurch eine Einspannwirkung entsteht.



DIN EN 1993-1-2
Bild 4.1

Bild 3.2: Knicklängen von durchlaufenden Stützen im Brandfall

3.2.4 Biegung mit und ohne Querkraft

Die Momenten Tragfähigkeit, evtl. durch Querkraftinteraktion abgemindert, wird wie bei normalen Temperaturen ermittelt und über die Abminderungsfaktoren der Streckgrenze angepasst.

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta}(\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi})M_{Rd}$$

Im Allgemeinen kann zwar angenommen werden, dass die Temperatur gleichmäßig über den Querschnitt und die Bauteillänge verteilt ist. Eine ungleichmäßige Temperaturverteilung kann sich aber günstig auf das Tragverhalten auswirken, was im Eurocode über die Anpassungsfaktoren κ_1 und κ_2 berücksichtigt werden kann.

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2}$$

Mit κ_2 wird berücksichtigt, dass an den Auflagern von Durchlaufträgern die Temperatur im Bauteil geringer ist als in Feldmitte. Mit κ_1 wird berücksichtigt, dass der Obergurt von Trägern, auf denen eine Stahlbetondecke aufliegt, kälter ist als der direkt beflamnte Untergurt. Im NAD zur Vornorm durfte dieser Effekt (κ_1) nicht berücksichtigt werden.

Tabelle 3.2: Anpassungsfaktoren für ungleichmäßige Temperaturverteilung

Temperaturverteilung über den Querschnitt	κ_1
allseitige Brandbeanspruchung	1,0
ungeschützter Träger, dreiseitige Brandbeanspruchung, Betonplatte auf der vierten Seite	0,70
geschützter Träger, dreiseitige Brandbeanspruchung, Betonplatte auf der vierten Seite	0,85
Temperaturverteilung entlang des Trägers	κ_2
statisch unbestimmt gelagert	0,85
alle anderen Fälle	1,0

Wie im Kaltfall muss auch im Brandfall der Biegedrillknicknachweis geführt werden. Das Nachweisverfahren erfolgt analog über den Schlankheitsgrad und eine Knicklinie, wobei wiederum die verminderte Streckgrenze und Steifigkeit im Brandfall berücksichtigt wird. Die Knicklinien für das Biegeknicken und Biegedrillknicken sind wie im Kaltfall deckungsgleich (s. Bild 3.1). Der Abminderungsfaktor χ wird nur über unterschiedliche Schlankheiten ermittelt.

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}}$$

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5(1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y}$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{k_{y,\theta}/k_{E,\theta}}$$

$\bar{\lambda}_{LT}$ Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken unter Raumtemperatur
(s. DIN EN 1993-1-1, Abschn. 6.3.2.2)

3.2.5 Beanspruchung durch ein- oder zweiachsige Biegung und Drucknormalkraft

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 4.2.3.5

Für den Stabilitätsnachweis ist ähnlich dem Kaltfall ein kombinierter Biegeknick-Biegedrillknick-Nachweis zu führen. Für Querschnitte der Klasse 1 und 2 müssen folgende Bedingungen erfüllt sein (Klasse 3 und 4 hier nicht wiedergegeben):

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_{pl,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

mit

$\chi_{min,fi}$ Abminderungsfaktor für Knicken um die schwache Achse (meist $\chi_{z,fi}$)

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} \cdot \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

$$\mu_y = (1,2\beta_{M,y} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3$$

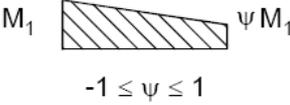
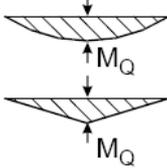
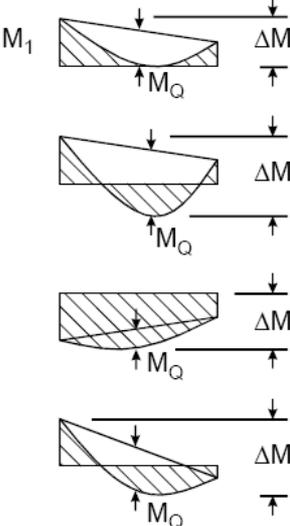
$$\mu_z = (2\beta_{M,z} - 5) \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \text{ und } \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1$$

$\beta_{M,y}, \beta_{M,z}$ Anpassungsfaktoren, die den Momentenverlauf berücksichtigen
(s. Bild 3.3)

Bei der Gleichung zur Berechnung von k_z wurde in der Norm offensichtlich der Beiwert μ_z vergessen. Wie in [3] gezeigt, wurde der Formelapparat aus der Vorstudie nicht korrekt in die Norm übernommen. Vor allem μ_y und μ_z wurden vertauscht (s. Tabelle 3.3). Wie in [3] beschrieben, hat das zwar keine Auswirkung auf das Sicherheitsniveau, da die Formulierung im Eurocode überwiegend konservativere Werte liefert als die im Original. Dennoch wird davon ausgegangen, dass in der Berichtigung des Eurocodes die Formulierungen aus der Vorstudie eingearbeitet werden.

Tabelle 3.3: Vergleich der Beiwerte μ_y und μ_z im Original und EC3 (aus [3])

	Original	DIN EN 1993-1-2
$\mu_y =$	$(2\beta_{M,y} - 5) \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,y} + 0,29$ aber $\mu_y \leq 0,8$ und $\bar{\lambda}_{z,20} \leq 1,1$	$(1,2\beta_{M,y} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,y} - 0,29$ aber $\mu_y \leq 0,8$
$\mu_z =$	$(1,2\beta_{M,z} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,71 \cdot \beta_{M,z} - 0,29$ aber $\mu_z \leq 0,8$	$(2\beta_{M,z} - 5) \cdot \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44 \cdot \beta_{M,z} - 0,29$ aber $\mu_z \leq 0,8$ und $\bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1$

Momentenverlauf	Anpassungsfaktor β_M
<p>Endmomente</p>  <p>$-1 \leq \psi \leq 1$</p>	$\beta_{M,v} = 1,8 - 0,7 \psi$
<p>Momente aus Querlasten in Tragwerksebene</p> 	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
<p>Momente aus Querlasten in der Tragwerksebene mit zusätzlichen Endmomenten</p> 	$\beta_M = \beta_{M,v} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,v})$ <p>$M_Q = \max M$ nur aus Querlast</p> $\Delta M \begin{cases} \max M & \text{bei Momentenverläufen ohne Vorzeichenwechsel} \\ \max M + \min M & \text{bei Momentenverläufen mit Vorzeichenwechsel} \end{cases}$

DIN EN 1993-1-2
Bild 4.2

Bild 3.3: Anpassungsfaktoren für den Momentenverlauf

3.3 Nachweis auf Temperaturebene

DIN EN 1993-1-2
Abschn. 4.2.4

Alternativ zum Nachweis der Tragfähigkeit, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, kann auch nachgewiesen werden, dass die maximale Temperatur im Bauteil den kritischen Wert nicht überschreitet, bei dem das Bauteil versagen würde. Für Bauteile, bei denen Einflüsse der Verformungen auf die Schnittgrößen (Th. II. O., Stabilität) nicht beachtet werden müssen, wird im Eurocode eine Formel zur Berechnung der kritischen Temperatur $\theta_{a,cr}$ in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades angegeben (vgl. Bild 3.4):

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

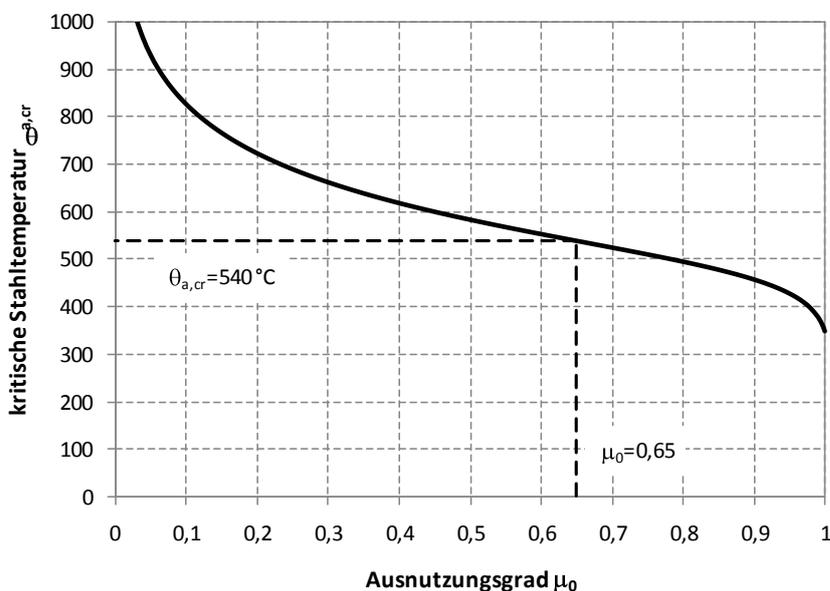


Bild 3.4: kritische Stahltemperatur in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrades

Bei Bauteilen, bei denen Biegedrillknicken als maßgebende Versagensform ausgeschlossen werden kann, darf der Ausnutzungsgrad vereinfacht folgendermaßen angenommen werden:

$$\mu_0 = \eta_{fi} (\gamma_{M,fi} / \gamma_{M,0})$$

Zur Berechnung von η_{fi} siehe Kapitel 2.1.2. Nach derzeitigem Stand der Normung kann auch vereinfacht

$$\mu_0 = 0,65 \cdot (1,0/1,0) = 0,65$$

angenommen werden. Damit ergibt sich die kritische Temperatur im ungünstigsten Fall zu $\theta_{a,cr} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.4 Bemessungshilfsmittel

Da auch die vereinfachten Berechnungsverfahren noch relativ aufwendig in der Anwendung sind, werden hier Nomogramme zur Bemessung gegeben, in denen die vereinfachten Verfahren grafisch ausgewertet sind. Die Nomogramme sind ähnlich dem Euro-Nomogramm. Sie wurden jedoch weiterentwickelt und auf den aktuellen Stand der Normung angepasst.

3.4.1 Auf Zug oder Biegung beanspruchte Bauteile

In der linken Diagrammhälfte ist jeweils die kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$ zum Ausnutzungsgrad μ_0 aufgetragen. Die Kurven ergeben sich aus dem Nachweisverfahren auf Temperaturebene (s. Kap. 3.3). Zusätzlich ist der Anpassungsfaktor

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$$

für Biegeträger mit ungleichmäßiger Temperaturverteilung integriert (s. Kap. 3.2.4). Mit dem Ausnutzungsgrad, der vereinfacht folgendermaßen berechnet werden kann (s. Kap. 2.1.2)

$$\mu_0 = \eta_{fi}(\gamma_{M,fi}/\gamma_{M,0}) = \frac{G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}}{\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}}$$

lässt sich die kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$ ablesen. Wie beim Nachweisverfahren auf Temperaturebene dürfen diese Nomogramme nur angewendet werden, wenn Stabilitätsversagen (Knicken, Biegedrillknicken) ausgeschlossen werden kann.

Die rechte Seite der Bilder 3.5 und 3.7 geben die Erwärmungskurven von geschützten und ungeschützten Stahlbauteilen für verschiedene Profilmomente wider (s. Kap 3.1). Die Brandeinwirkung ist die Einheits-Temperaturzeitkurve. Die Bilder 3.6 und 3.8 enthalten die gleichen Werte, nur dass dort der Profilmoment auf der horizontalen Achse angetragen ist und die verschiedenen Kurven für die üblichen Feuerwiderstandsdauern von 30, 60, 90 und 120 Minuten stehen. Bei den Kurven für geschützte Bauteile (Bild 3.7 und 3.8) ist zu beachten, dass vereinfacht $\phi = 0$ gesetzt wurde. Das ist der Fall, wenn die spezifische Wärmekapazität der Verkleidung $c_p = 0$ wäre. Die Bauteiltemperaturen liegen somit etwas zu hoch und auf der sicheren Seite.

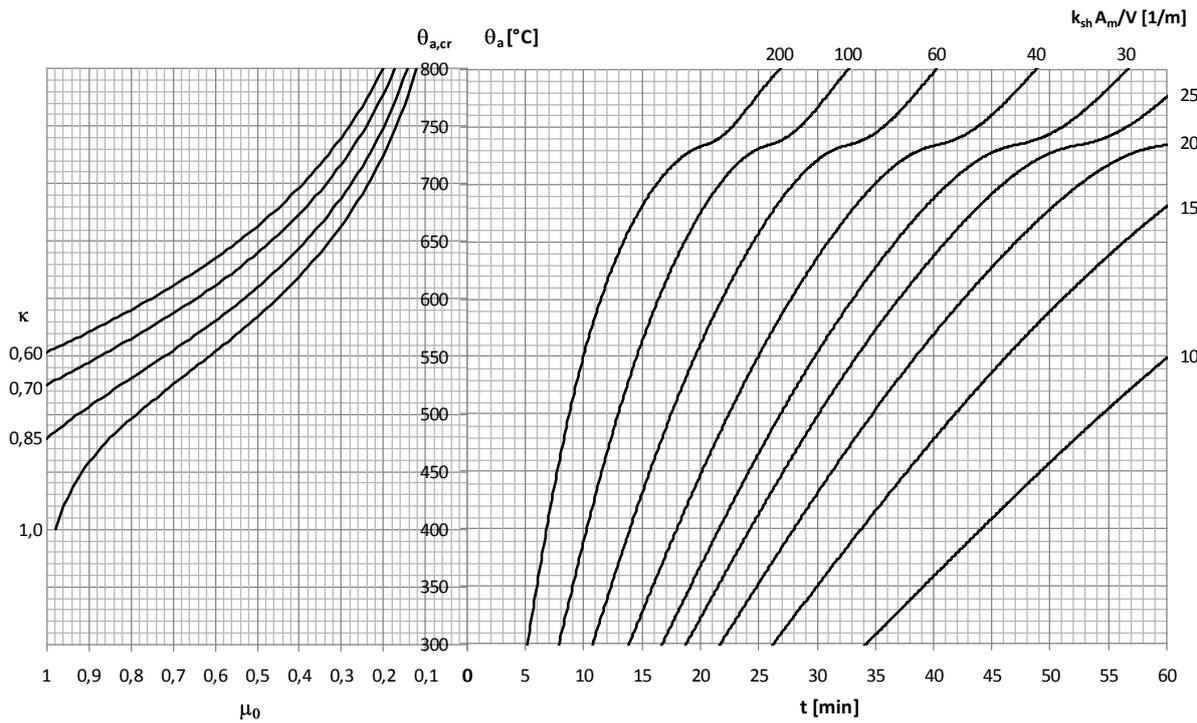


Bild 3.5: Temperatur-Zeit-Ausnutzungsgrad Nomogramm für ungeschützte Stahlbauteile

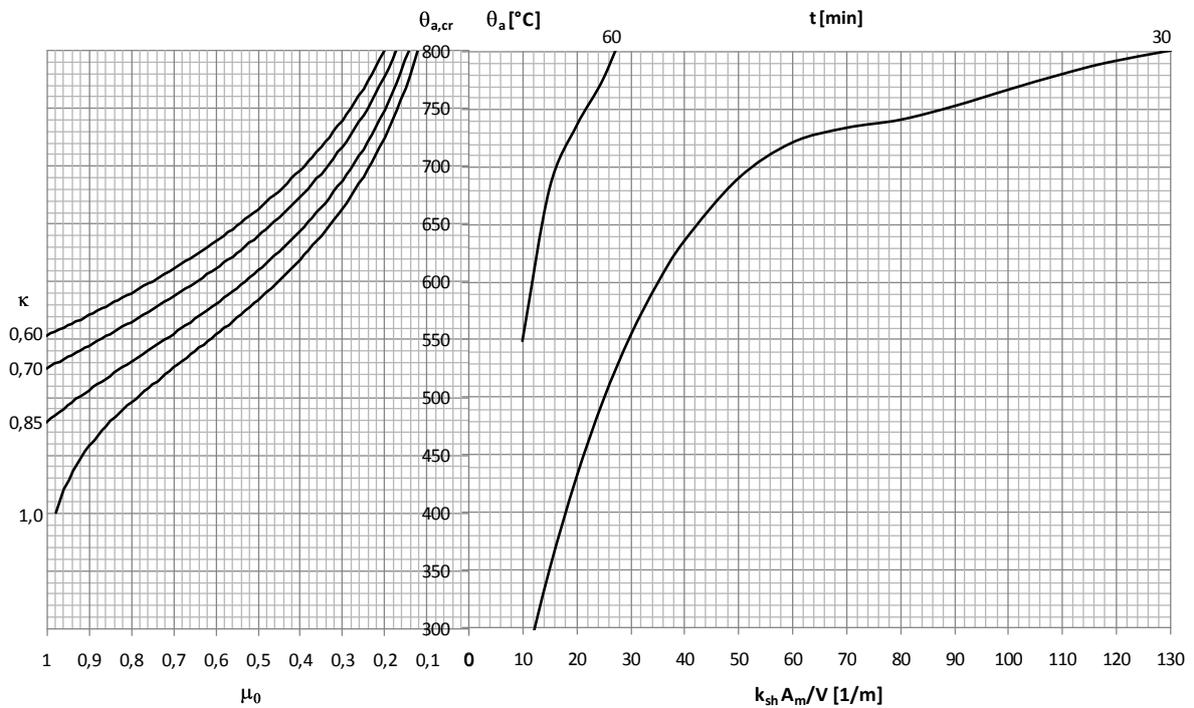


Bild 3.6: Temperatur-Profilfaktor-Ausnutzungsgrad Nomogramm für ungeschützte Stahlbauteile

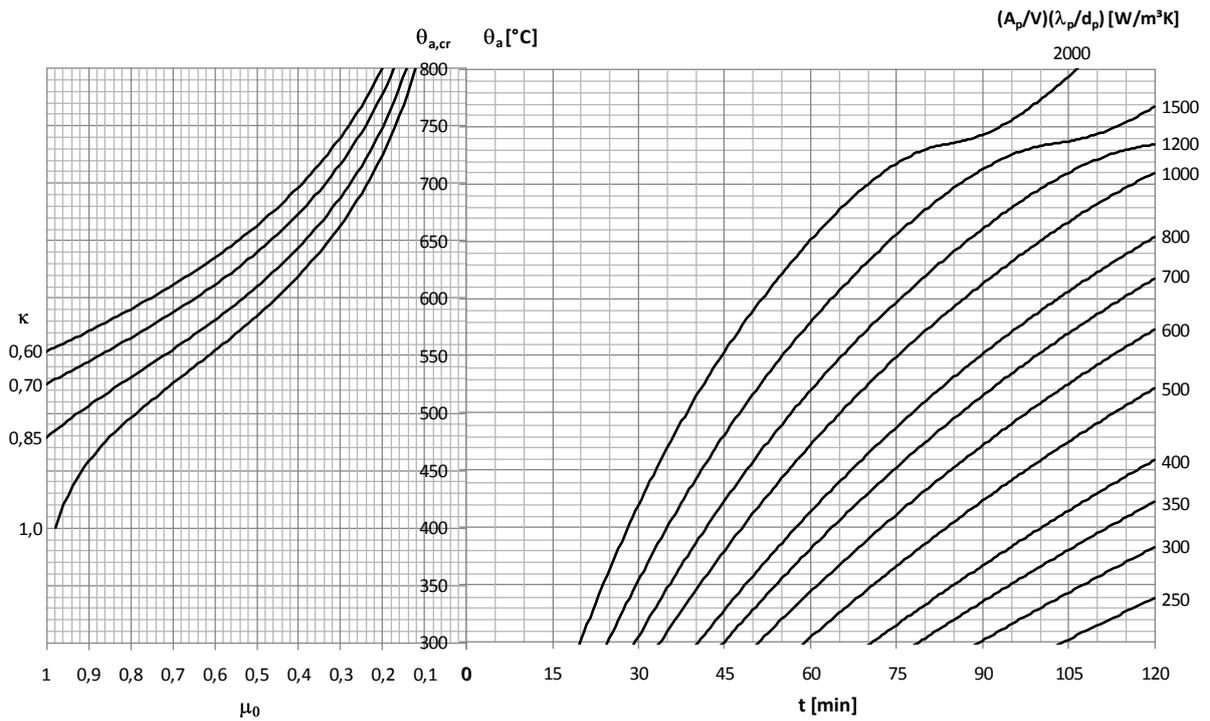


Bild 3.7: Temperatur-Zeit-Ausnutzungsgrad Nomogramm für Stahlbauteile mit Brandschutzmaterial geschützt

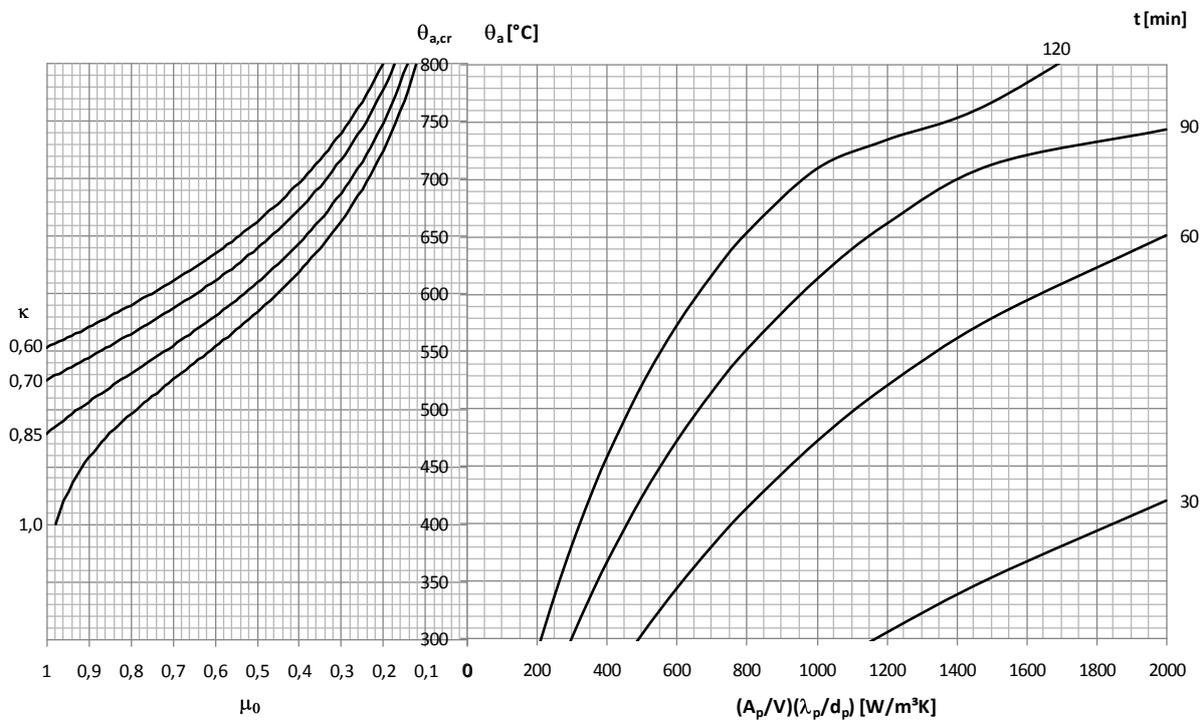
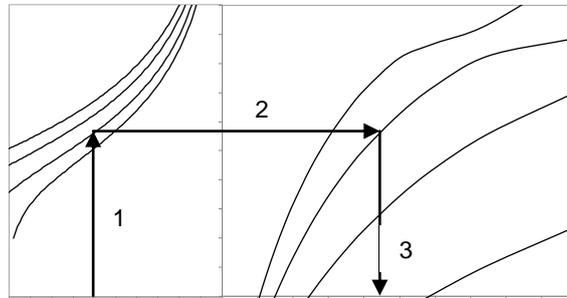


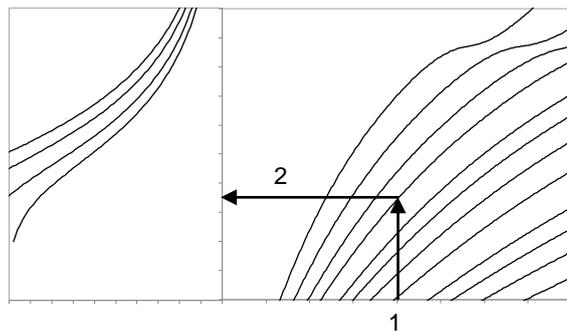
Bild 3.8: Temperatur-Profilfaktor-Ausnutzungsgrad Nomogramm für Stahlbauteile mit Brandschutzmaterial geschützt

Die Nomogramme können für die unterschiedlichsten Aufgabenstellungen genutzt werden. Einige Beispiele:

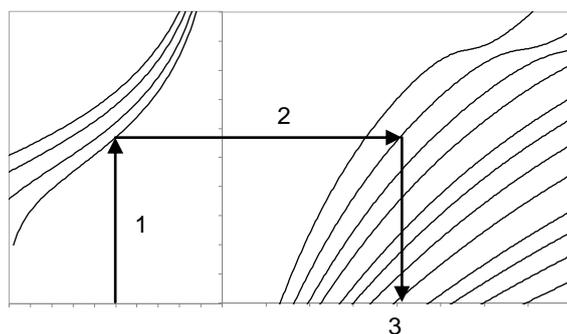
1. gegeben: Stahlquerschnitt, Ausnutzungsgrad, geforderte Feuerwiderstandsdauer
gesucht: erforderliche Verkleidung (Berechnung aus Profilmfaktor)



2. gegeben: Profilmfaktor, Branddauer
gesucht: Temperatur im Stahlquerschnitt



3. gegeben: Profilmfaktor des verkleideten Profils, Ausnutzungsgrad
gesucht: Feuerwiderstandsdauer



3.4.2 Bauteile mit zentrischem Druck

Muss bei Bauteilen der Einfluss der Verformungen auf die Tragfähigkeit berücksichtigt werden (Th. II. O., Stabilität), kann die kritische Temperatur nicht ohne weiteres aus dem Ausnutzungsgrad unter Raumtemperatur wie in Kapitel 3.3 beschrieben ermittelt werden, da zu der materiellen Nichtlinearität zusätzlich eine geometrische Nichtlinearität hinzu kommt. Nach Eurocode kann hierfür folglich nur die Bemessung auf Tragfähigkeitsebene durchgeführt werden. Für die Ermittlung der erforderlichen Dicke der Brandschutzverkleidung ist das jedoch sehr aufwendig, da der Nachweis nur iterativ möglich ist. Für eine geschätzte Verkleidung muss die Stahltemperatur berechnet werden, der Stabilitätsnachweis geführt werden, die Dicke der Verkleidung evtl. angepasst und die Berechnung wiederholt werden.

Deshalb werden hier Diagramme zur Ermittlung der kritischen Stahltemperatur für zentrisch gedrückte Bauteile vorgestellt, mit welcher durch die Bemessungs-Nomogramme einfach die erforderliche Brandschutzverkleidung ermittelt werden kann. Die geometrische Nichtlinearität wird hierbei über die Schlankheit im Kaltzustand berücksichtigt. Drei verschiedene Diagramme stehen zur Verfügung:

1. Für den allgemeinen Fall, wenn die Knicklänge im Brandfall und Kaltfall gleich groß sind (Pendelstützen, Fachwerkdiagonalen, etc., s. Bild 3.9)
2. Für durchlaufende Stützen, bei der sich im Brandfall die Knicklänge wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben reduziert.
 - a) Es entsteht eine Einspannung an einem Ende der Stütze (s. Bild 3.10)
 - b) Es entsteht eine Einspannung an beiden Enden der Stütze (s. Bild 3.11)

Folgende Eingangsparameter sind erforderlich:

Ausnutzungsgrad

$$\mu_0 = \frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,0,Rd}}$$

$N_{b,fi,0,Rd}$ ist die Normalkrafttragfähigkeit unter Raumtemperatur, die mit der Knicklänge $L_{cr,0} = 1,0L$ wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben ermittelt wird.

$\bar{\lambda}_0$ ist die bezogene Schlankheit unter Raumtemperatur mit $L_{cr,0} = 1,0L$ ermittelt.

Die Knicklinie und somit auch die kritische Temperatur ist genau genommen nach Eurocode Abhängig vom Material. Für die üblichen Baustähle liegt der Fehler jedoch unter 0,5%, wenn dieser Effekt vernachlässigt wird. Die Diagramme sind für einen Stahl S235 ermittelt.

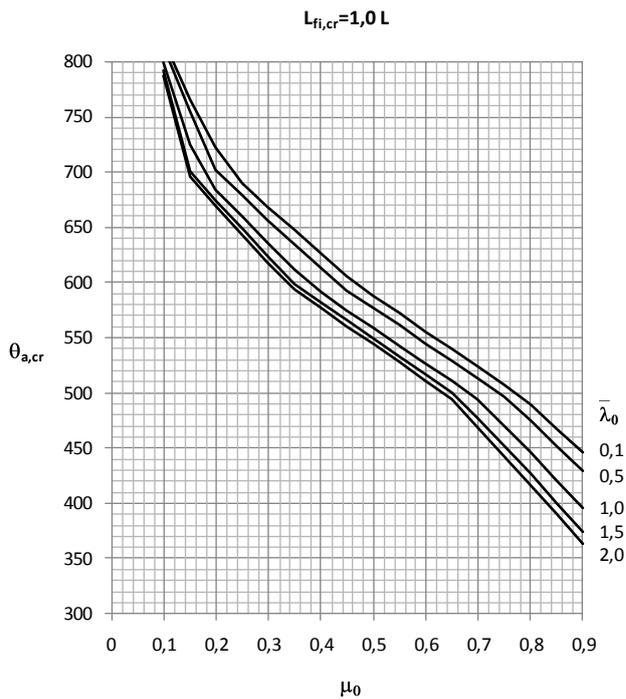


Bild 3.9: kritische Temperatur für Druckbeanspruchte Bauteile mit gleicher Knicklänge im Kalt- und im Brandfall ($L_{fi,cr}=1,0\text{ L}$)

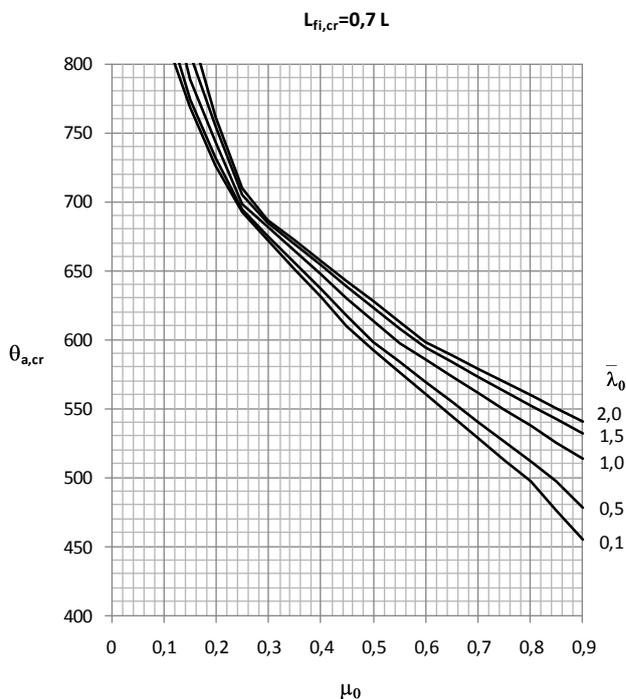


Bild 3.10: kritische Temperatur für rein auf Druck beanspruchte, durchlaufende Stützen mit reduzierter Knicklänge im Brandfall durch einseitige Einspannung ($L_{fi,cr}=0,7\text{ L}$)

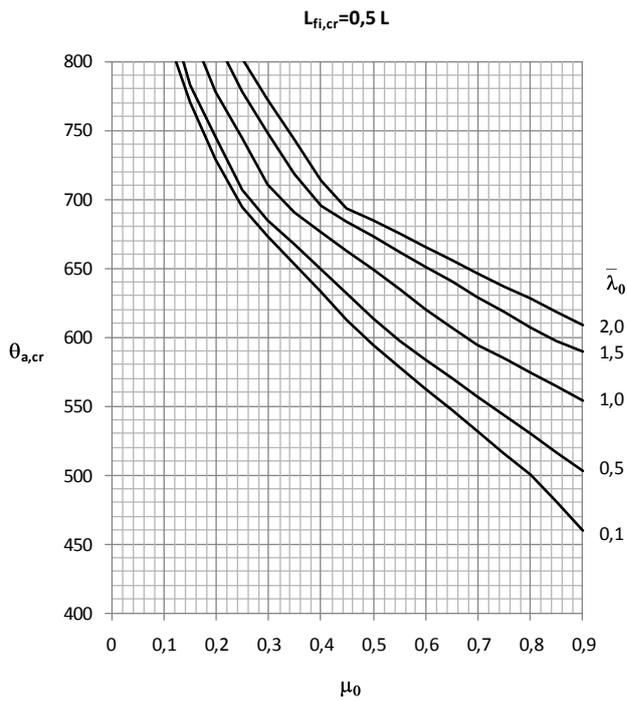


Bild 3.11: kritische Temperatur für rein auf Druck beanspruchte, durchlaufende Stützen mit reduzierter Knicklänge im Brandfall durch beidseitige Einspannung ($L_{fi,cr}=0,5 L$)

4 Beispiele

4.1 ungeschützter Deckenträger

Betrachtet wird ein Nebenträger einer Zwischendecke. Die Träger sind im Abstand von 2,50 m verlegt. Die Stahlbetondecke ist nicht schubfest mit dem Stahlträger verbunden, der Obergurt kann aber zur Verhinderung von Biegedrillknicken als seitlich gehalten betrachtet werden. Die erforderliche Feuerwiderstandsklasse beträgt R30. Es soll der Nachweis erbracht werden, dass die geforderte Feuerwiderstandsdauer ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen erreicht werden kann.

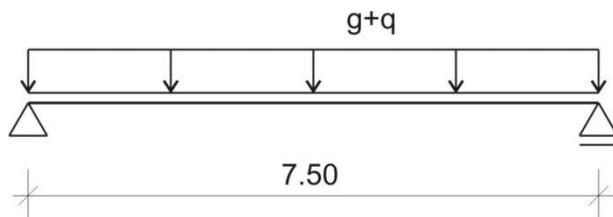


Bild 4.1: statisches System

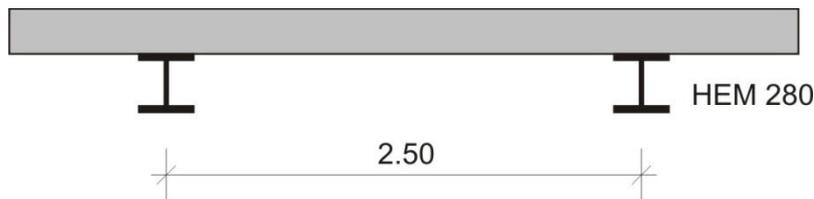


Bild 4.2: Querschnitt

Querschnitt:

HEM 280

S235

$W_{pl,y} = 2965 \text{ cm}^3$

Lasten:

$g_k = 6,5 \text{ kN/m}^2$

$q_k = 20,0 \text{ kN/m}^2$ Nutzlast Kategorie G

je Träger:

$g_k = 6,5 \cdot 2,5 = 16,25 \text{ kN/m}$

$q_k = 20,0 \cdot 2,5 = 45,0 \text{ kN/m}$

4.1.1 Nachweis unter Normaltemperatur

Maßgebende Einwirkung ist das Moment in Feldmitte.

$$M_{Ed} = (\gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k) \cdot l^2 / 8 = (1,35 \cdot 16,25 + 1,5 \cdot 45,0) \cdot 7,50^2 / 8 = 629 \text{ kNm}$$

Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot f_y / \gamma_{M0} = 2965 \cdot 23,5 / 1,0 \cdot 10^{-2} = 697 \text{ kNm}$$

Nachweis:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{629}{697} = 0,90 < 1,0$$

4.1.2 Ermittlung der Stahltemperatur

Der Temperaturverlauf über die Zeit wird wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben ermittelt.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

Der Profilmfaktor gibt das Verhältnis der beflamnten Oberfläche zum Volumen wider. Hier ist er gleich dem Umfang des Stahlprofils abzüglich der Breite des oberen Flansches, der durch die Decke abgeschattet ist, im Verhältnis zur Querschnittsfläche.

$$\frac{A_m}{V} = \frac{U - b}{A} = \frac{1,694 - 0,288}{0,02402} = 58,5 \frac{1}{m}$$

Der Profilmfaktor für den das Profil umschließenden Kasten ergibt sich zu:

$$\left(\frac{A_m}{V}\right)_b = \frac{2(b+h)}{A} = \frac{2(0,288 + 0,310)}{0,02402} = 49,8 \frac{1}{m}$$

Daraus folgt für den Korrekturfaktor zur Berücksichtigung von Abschattungseffekten des Profils:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{(A_m/V)_b}{A_m/V} = 0,9 \cdot \frac{49,8}{58,5} = 0,766$$

Die spezifische Wärmekapazität von Stahl c_a ist abhängig von der Stahltemperatur (s. Kapitel 3.1.1). Die Schrittweite Δt für das Zeitschrittverfahren wird zu 5 s gewählt. Die Rohdichte von Stahl beträgt $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$. Als Brandlast ist die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) vorgeschrieben:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8 t + 1)$$

Mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für die ETK $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$, der Emisivität der Bauteiloberfläche $\varepsilon_m = 0,7$, der Emisivität der Flamme $\varepsilon_f = 1,0$ und der Stephan-Boltzmann-Konstanten $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ kann der Netto-Wärmestrom berechnet werden. Der Konfigurationsfaktor wird vereinfacht $\phi = 1,0$ angenommen.

$$\begin{aligned} \dot{h}_{net} &= \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \\ \dot{h}_{net,c} &= \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \\ \dot{h}_{net,r} &= \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \end{aligned}$$

Als Anfangstemperatur wird für den Stahl θ_a und für die Brandgastemperatur θ_g jeweils von Raumtemperatur 20 °C ausgegangen. Die Erwärmung des Stahls $\Delta\theta_{a,t}$ kann Schrittweise für jeden Zeitabschnitt Δt berechnet werden. Die Stahltemperatur für den nächsten Zeitschritt ergibt sich aus der Summe der Stahltemperatur des vorhergehenden Schritts und der Erwärmung $\Delta\theta_{a,t}$. In Tabelle 4.1 ist ausschnittsweise die Entwicklung der Stahltemperatur wiedergegeben. In Bild 4.3 ist ihr Verlauf bis zur geforderten Feuerwiderstandsdauer von 30 min im Vergleich zur ETK dargestellt.

Tabelle 4.1: Entwicklung der Stahltemperatur

t	θ_g	θ_a	$h_{net,c}$	$h_{net,r}$	h_{net}	c_a	$\Delta\theta_a$
[min]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[J/kgK]	[°C]
0,000	20	20,00	0	0	0	440	0
0,083	97	20,00	1913	448	2361	440	0,15
0,167	147	20,15	3170	941	4111	440	0,27
0,250	185	20,42	4105	1446	5551	440	0,36
0,333	215	20,78	4847	1949	6797	440	0,44
0,417	240	21,22	5462	2445	7907	441	0,51
0,500	261	21,73	5985	2931	8917	441	0,58
⋮							
29,833	841	663	4447	30641	35087	840	1,19
29,917	841	664	4427	30577	35004	842	1,19
30,000	842	665	4408	30513	34920	845	1,18

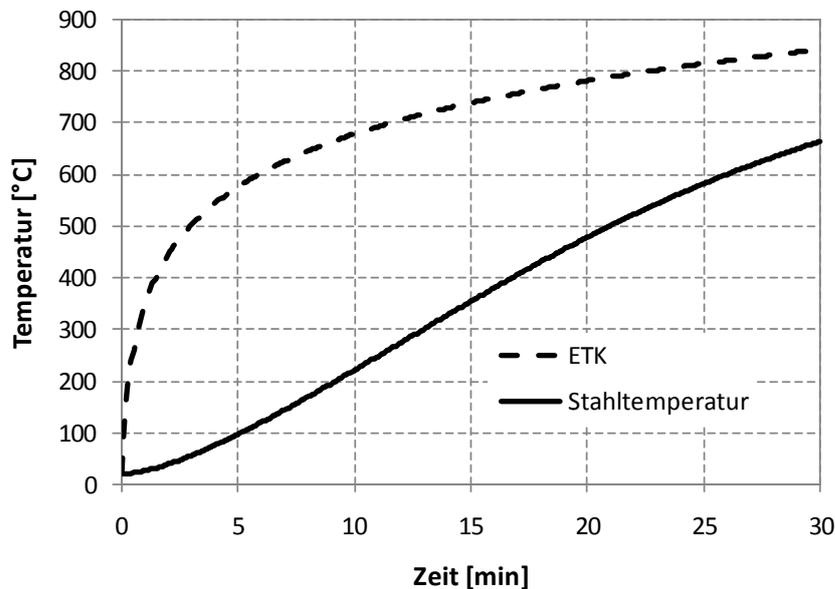


Bild 4.3: Entwicklung der Stahltemperatur im Vergleich zur ETK

Die maßgebende Stahltemperatur ergibt sich somit zum Zeitpunkt $t = 30 \text{ min}$:

$$\theta_{a,d} = 665 \text{ }^\circ\text{C}$$

Die gleiche Temperatur könnte auch aus Bild 3.6 mit

$$k_{sh} \cdot A_m/V = 0,766 \cdot 58,5 = 44,8 \text{ m}^{-1}$$

abgelesen werden.

4.1.3 Nachweis im Brandfall auf Tragfähigkeitsebene

Für die mechanischen Einwirkungen im Brandfall ist ebenfalls das Moment in Feldmitte maßgebend. Die Lasten werden nach der Vorschrift für außergewöhnliche Bemessungssituationen kombiniert. Es treten keine indirekten Einwirkungen auf $A_d = 0$, da es sich um ein statisch bestimmtes System handelt und somit keine Zwangskräfte aus Verformung entstehen.

$$M_{fi,Ed} = (\gamma_{GA} \cdot g_k + \psi_1 \cdot q_k) \cdot l^2/8 = (1,0 \cdot 16,25 + 0,5 \cdot 45,0) \cdot 7,50^2/8 = 272 \text{ kNm}$$

Querschnittsklassifizierung:

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{235/f_y} = 0,85 \sqrt{235/235} = 0,85$$

$$\text{Flansch: } c/t = 3,36 < 9\varepsilon = 7,65$$

$$\text{Steg: } c/t = 10,6 < 72\varepsilon = 61,2$$

Der Querschnitt kann auch im Brandfall der Klasse 1 zugeordnet werden.

Bei der Ermittlung des Bemessungswertes der Momententragfähigkeit muss die Streckgrenze aufgrund der erhöhten Temperatur abgemindert werden. Bei einer Stahltemperatur $\theta_{a,d} = 665 \text{ }^\circ\text{C}$ (s. o.) ergibt sich der Abminderungsfaktor für die Streckgrenze interpoliert aus Tabelle 4 zu:

$$k_{y,\theta} = 0,314$$

Desweiteren wird berücksichtigt, dass die Temperatur im Querschnitt wegen der Betondecke ungleichmäßig verteilt ist ($\kappa_1 = 0,7$). Über die Länge ist die Temperatur gleichmäßig verteilt ($\kappa_2 = 1,0$).

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2}$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} (\gamma_{M,0}/\gamma_{M,fi}) M_{Rd} = 0,314 (1,0/1,0) \cdot 697 = 219 \text{ kNm}$$

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{219}{0,7 \cdot 1,0} = 313 \text{ kNm}$$

Nachweis:

$$\frac{M_{fi,Ed}}{M_{fi,t,Rd}} = \frac{272}{313} = 0,87 < 1,0$$

Die Träger erfüllen ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen die Feuerwiderstandsklasse R30.

4.1.4 Nachweis im Brandfall auf Temperaturebene

Für den Nachweis auf Temperaturebene wird der Ausnutzungsgrad im Brandfall benötigt. Dieser kann vereinfacht folgendermaßen berechnet werden:

$$\mu_0 = \eta_{fi}(\gamma_{M,fi}/\gamma_{M,0})$$

Den Abminderungsfaktor erhält man mit (s. Kapitel 2.1.2):

$$\eta_{fi} = \frac{g_k + \psi_1 \cdot q_k}{\gamma_G \cdot g_k + \gamma_Q \cdot q_k} = \frac{6,5 + 0,5 \cdot 20,0}{1,35 \cdot 6,5 + 1,5 \cdot 20,0} = 0,426$$

Um die ungleichmäßige Temperaturverteilung im Querschnitt zu berücksichtigen, wird der Ausnutzungsgrad noch mit

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,7 \cdot 1,0 = 0,7$$

multipliziert. Damit ergibt sich für den Ausnutzungsgrad:

$$\mu_0 = \kappa \cdot \eta_{fi}(\gamma_{M,fi}/\gamma_{M,0}) = 0,7 \cdot 0,426 (1,0/1,0) = 0,298$$

Damit lässt sich die kritische Temperatur berechnen.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,298^{3,833}} - 1 \right] + 482$$
$$\theta_{a,cr} = 665 \text{ °C}$$

Nachweis:

$$\frac{\theta_{a,d}}{\theta_{a,cr}} = \frac{665}{665} = 1,0 \leq 1,0$$

4.1.5 Nachweis mit Bemessungs-Nomogramm

Der Nachweis kann sehr einfach mit Hilfe von Bild 3.6 geführt werden. Mit dem Ausnutzungsgrad

$$\mu_0 = \eta_{fi} = \frac{6,5 + 0,5 \cdot 20,0}{1,35 \cdot 6,5 + 1,5 \cdot 20,0} = 0,426$$

und dem Abminderungsfaktor

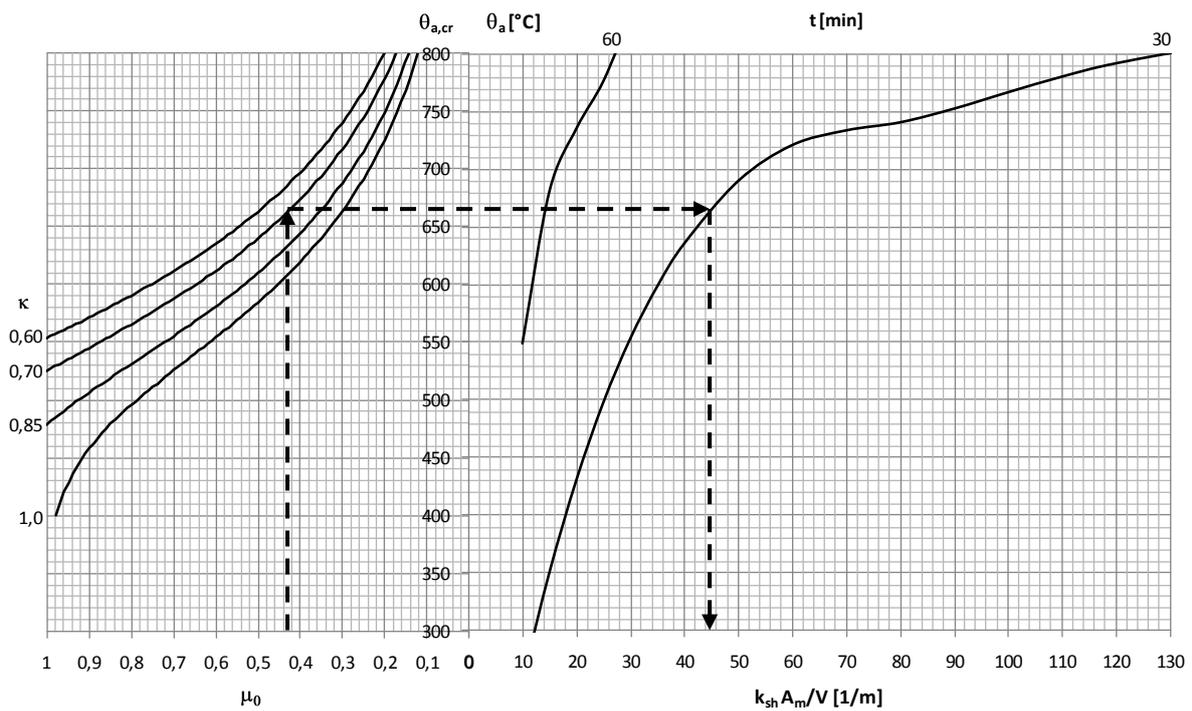
$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,7 \cdot 1,0 = 0,7$$

kann man bei einer geforderten Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten aus Bild 3.6 den maximal möglichen Profilfaktor ablesen.

$$k_{sh} \cdot A_m/V \approx 45 \text{ m}^{-1}$$

Der vorhandene Profilfaktor ist geringer und der Nachweis somit erbracht (s. Kap. 4.1.2)

$$k_{sh} \cdot A_m/V = 0,766 \cdot 58,5 = 44,8 \text{ m}^{-1} < 45$$



4.2 geschützte Stütze

Nun soll die Stütze im 1. Obergeschoss eines Bürogebäudes für den Brandfall nachgewiesen werden. Die Geschosshöhe beträgt $L = 4,00\text{ m}$. Als Brandschutzmaßnahme wurde eine Verkleidung mit feuerhemmenden Gipskartonplatten gewählt. Die geforderte Feuerwiderstandsklasse beträgt R90.

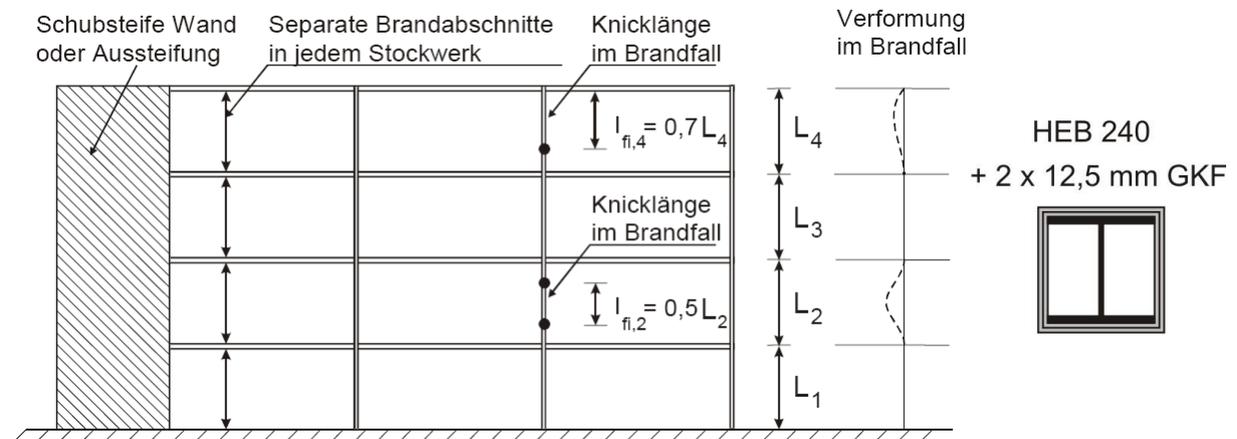


Bild 4.4: System und Querschnitt

Querschnitt:

HEB 240
S235

Brandschutzverkleidung:

$d_p = 25\text{ mm}$
 $\lambda_p = 0,20\text{ W/mK}$
 $c_p = 1700\text{ J/kgK}$
 $\rho_p = 945\text{ kg/m}^3$

Lasten:

$G_k = 850\text{ kN}$
 $Q_k = 350\text{ kN}$ Nutzlast Kategorie B
 $S_k = 50\text{ kN}$

4.2.1 Nachweis unter Normaltemperatur

maßgebende Einwirkung:

$$N_{Ed} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q(Q_k + \psi_0 \cdot S_k) = 1,35 \cdot 850 + 1,5(350 + 0,5 \cdot 50) = 1710 \text{ kN}$$

Im Kaltfall wird für die Knicklänge L_{cr} vereinfacht die Stockwerkshöhe angenommen, obwohl eine gewisse Einspannwirkung aufgrund der geringeren Belastung der darüber liegenden Stützen vorhanden ist. Der Schlankheitsgrad für Ausweichen senkrecht zur z-Achse ergibt sich damit zu

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{400}{6,084 \cdot 93,9} = 0,70$$

Mit der Knickspannungslinie c erhält man für den Knickbeiwert (Berechnung nicht vorgeführt):

$$\chi = 0,725$$

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit ergibt sich damit zu:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,725 \cdot 106 \cdot 23,5 / 1,0 = 1806 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{1710}{1806} = 0,95 < 1,0$$

4.2.2 Ermittlung der Stahltemperatur

Der Temperaturverlauf über die Zeit wird wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben ermittelt. Der Profilmfaktor für einen allseitig beflamten Querschnitt mit Kastenverkleidung konstanter Dicke ergibt sich zu (s. Tabelle 3.1):

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2(b+h)}{A} = \frac{4 \cdot 0,24}{0,0106} = 90,6 \frac{1}{m}$$

Die spezifische Wärmekapazität von Stahl c_a ist abhängig von der Stahltemperatur (s. Kapitel 3.1.1). Die Schrittweite Δt für das Zeitschrittverfahren wird zu 30 s gewählt. Die Rohdichte von Stahl beträgt $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$. Als Brandlast ist die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) vorgeschrieben:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

Zusammen mit den Materialkennwerten der Brandschutzverkleidung (s. Angabe), kann das Zeitschrittverfahren durchgeführt werden. Als Starttemperatur beträgt wieder 20 °C. In Tabelle 4.2 ist die Berechnung ausschnittsweise wiedergegeben und in Bild 4.5 grafisch dargestellt.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p c_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \geq 0 \quad \text{mit } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p / V$$

Tabelle 4.2: Entwicklung der Stahltemperatur

t	θ_g	θ_a	c_a	ϕ	$\Delta\theta_a$
[min]	[°C]	[°C]	[J/kgK]	[-]	[°C]
0,0	20	20,00	440	1,0540	0,00
0,5	261	20,00	440	1,0540	0,00
1,0	349	20,00	440	1,0540	0,00
1,5	404	20,00	440	1,0540	0,00
2,0	445	20,00	440	1,0540	0,00
2,5	476	20,00	440	1,0540	0,00
3,0	502	20,00	440	1,0540	0,00
3,5	525	20,00	440	1,0540	0,00
4,0	544	20,00	440	1,0540	0,29
⋮					
89,0	1004	423	618	0,7505	2,02
89,5	1005	425	619	0,7492	2,01
90,0	1006	427	620	0,7479	2,01

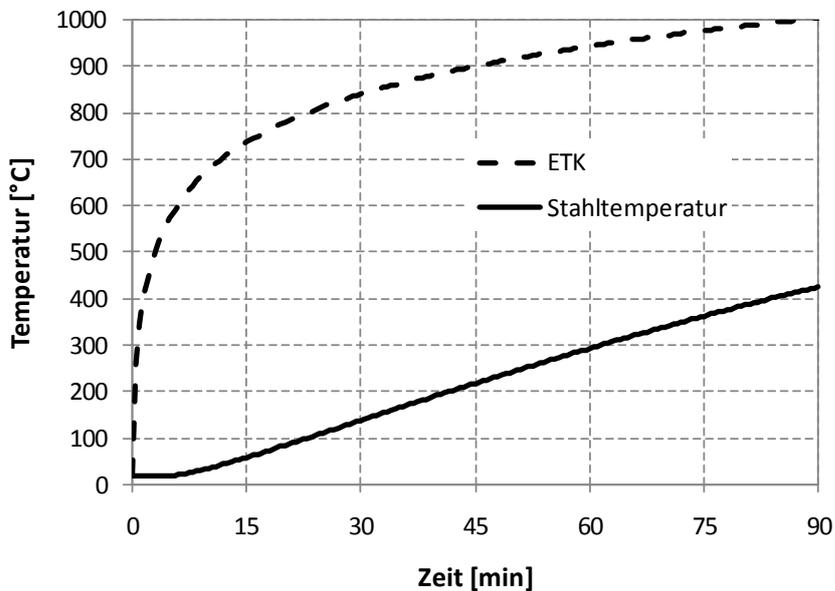


Bild 4.5: Entwicklung der Stahltemperatur im Vergleich zur ETK

Die maßgebende Stahltemperatur zum Zeitpunkt $t = 90 \text{ min}$ beträgt:

$$\theta_{a,d} = 427 \text{ °C}$$

Vereinfacht könnte die Stahltemperatur auch mit Bild 3.8 ermittelt werden. Mit

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 90,6 \cdot \frac{0,20}{0,025} = 725 \frac{W}{m^3K}$$

kann für eine Branddauer von 90 Minuten folgende Temperatur abgelesen werden:

$$\theta_{a,d} \approx 525 \text{ °C}$$

Wie in Kapitel 3.4 erläutert, liegt die Temperatur aus dem Nomogramm wegen der Vereinfachung $\phi = 0$ etwas zu hoch.

4.2.3 Nachweis im Brandfall auf Tragfähigkeitsebene

Für die mechanischen Einwirkungen im Brandfall werden die Lasten nach der Vorschrift für außergewöhnliche Bemessungssituationen kombiniert. Es treten keine indirekten Einwirkungen auf $A_d = 0$, da Verformungen aus Temperatur nicht behindert werden und somit keine Zwangskräfte entstehen.

$$N_{fi,Ed} = \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_1 \cdot Q_k + \psi_2 \cdot S_k = 1,0 \cdot 850 + 0,5 \cdot 350 + 0 \cdot 50 = 1025 \text{ kN}$$

Der Querschnitt kann im Brandfall der Klasse 1 zugeordnet werden (Berechnung nicht vorgeführt).

Mit einer Stahltemperatur von 427 °C erhält man für die Abminderungsfaktoren der Materialkennwerte aus Tabelle 2.2 interpoliert:

$$k_{y,\theta} = 0,941 \text{ und } k_{E,\theta} = 0,673$$

Da die Stütze biegesteif über die gesamte Gebäudehöhe durchläuft, der Brand aber nur im 1. Obergeschoss angenommen wird, ergibt sich aufgrund der Steifigkeitsunterschiede der heißen und kalten Stützen Einspannwirkung am Stützenkopf und -fuß. Die Knicklänge reduziert sich dadurch auf

$$L_{cr} = 0,5 \cdot 4,00 = 2,00 \text{ m}$$

Mit dieser Knicklänge kann die Schlankheit der Stütze für eine Stahltemperatur von 427 °C ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = \frac{L_{cr}}{i_z \cdot \lambda_1} \cdot \sqrt{\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}}} = \frac{200}{6,084 \cdot 93,9} \cdot \sqrt{\frac{0,941}{0,673}} = 0,414$$

Mit $\alpha = 0,65 \sqrt{235/f_y} = 0,65$ und

$$\varphi_\theta = 0,5(1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2) = 0,5(1 + 0,65 \cdot 0,414 + 0,414^2) = 0,720$$

erhält man für den Abminderungsbeiwert für Biegeknicken

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} = \frac{1}{0,720 + \sqrt{0,720^2 - 0,414^2}} = 0,764$$

Der Bemessungswert der Drucknormalkraft-Beanspruchbarkeit zum Zeitpunkt $t = 90 \text{ min}$ ergibt sich somit zu

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} = 0,764 \cdot 106 \cdot 0,941 \cdot 23,5 / 1,0 = 1791 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{1025}{1791} = 0,57 < 1,0$$

4.2.4 Nachweis im Brandfall auf Temperaturebene

Der Nachweis kann bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen nicht ohne weiteres auf Temperaturebene geführt werden. Mit den Diagrammen aus Kapitel 3.4.2 ist dies jedoch möglich (s. Kap. 4.2.5).

4.2.5 Nachweis mit Bemessungs-Nomogramm

Die kritische Temperatur wird mit Bild 3.11 ermittelt. Mit der Knicklänge $L_{cr,0} = 1,0L$ erhält man für die Schlankheit unter Raumtemperatur:

$$\bar{\lambda}_0 = \frac{L_{cr,0}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{400}{6,084 \cdot 93,9} = 0,70$$

Damit wird der Ausnutzungsgrad ermittelt.

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235 / f_y} = 0,65 \sqrt{235 / 235} = 0,65$$

$$\varphi_0 = 0,5(1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_0 + \bar{\lambda}_0^2) = 0,5(1 + 0,65 \cdot 0,70 + 0,70^2) = 0,973$$

$$\chi_0 = \frac{1}{\varphi_0 + \sqrt{\varphi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2}} = \frac{1}{0,973 + \sqrt{0,973^2 - 0,70^2}} = 0,607$$

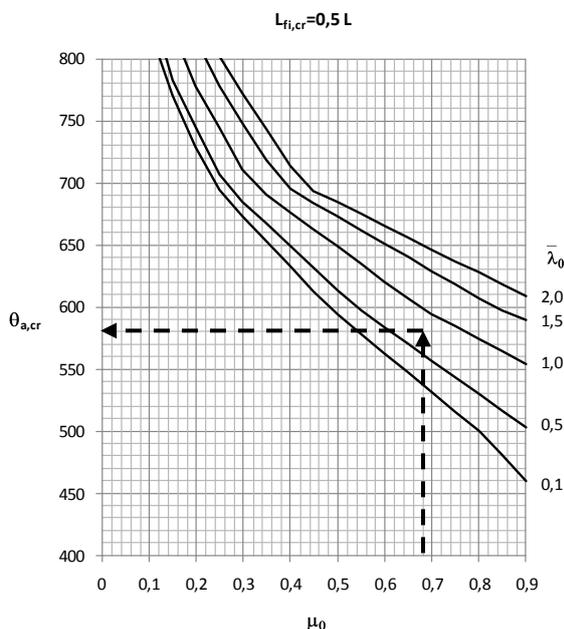
$$N_{b,fi,0,Rd} = \chi_0 \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M,fi} = 0,607 \cdot 106 \cdot 23,5 / 1,0 = 1512 \text{ kN}$$

$$N_{fi,Ed} = 1025 \text{ kN (s. Kap. 4.2.3)}$$

$$\mu_0 = \frac{N_{fi,Ed}}{N_{b,fi,0,Rd}} = \frac{1025}{1512} = 0,68$$

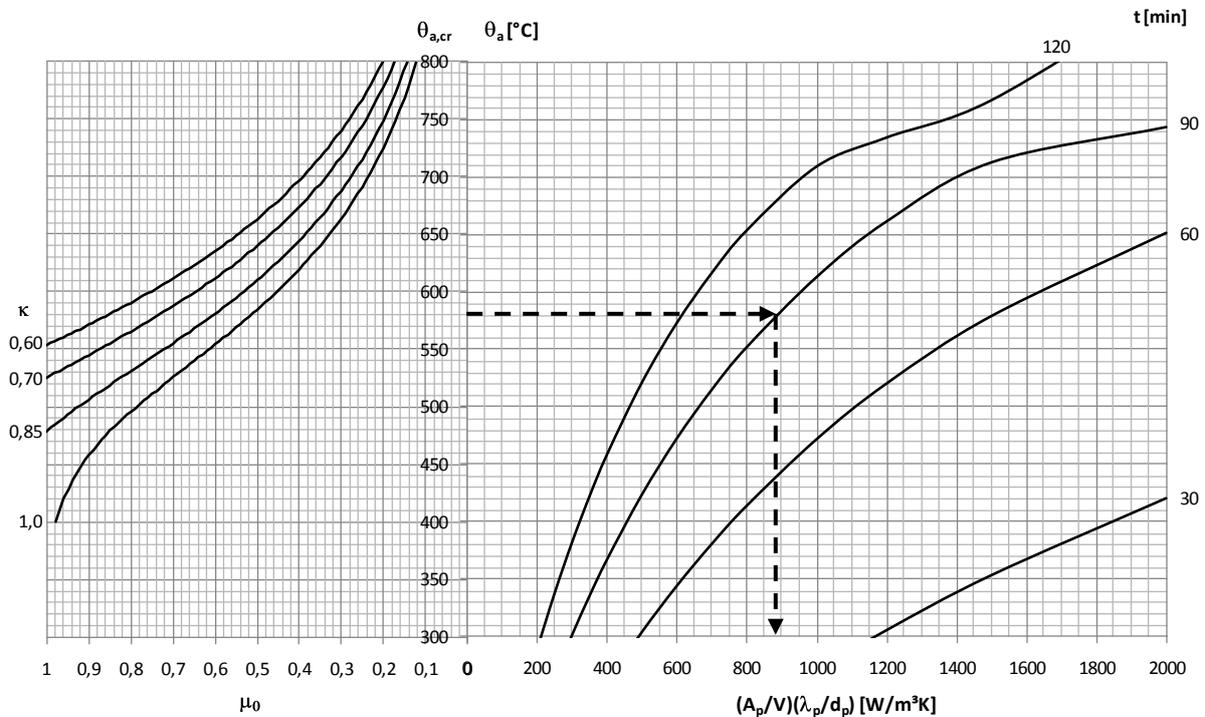
Aus Bild 3.11 wird abgelesen:

$$\theta_{a,cr} \approx 580^\circ \text{C}$$



Aus Bild 3.8 kann hiermit der erforderliche Profilfaktor für die Brandschutzverkleidung abgelesen werden.

$$\text{erf} \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \approx 890 \text{ W} / \text{m}^3 \text{K}$$



Mit $A_p / V = 90,6 \text{ m}^{-1}$ für den verkleideten HEB 240 (s. Kap. 4.2.2) und $\lambda_p = 0,20 \text{ W} / \text{mK}$ für Gipskartonplatten kann die erforderliche Dicke der Verkleidung ermittelt werden.

$$\text{erf} d_p = 90,6 \cdot \frac{0,20}{890} = 0,0204 \text{ m} = 20,4 \text{ mm} < \text{vorh} d_p = 25 \text{ mm}$$

5 Literatur

- [1] DIBt Mitteilungen Sonderheft 36: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C - Ausgabe 2008/1 -. 39. Jahrgang, Ernst & Sohn, Berlin 2008
- [2] Bauphysik-Kalender 2006, Ernst & Sohn, Berlin 2006
- [3] Talamona, D., et. al.: Comparison between EC3 and the original proposal for beam-columns in case of fire. Eurosteel 2008, Graz, Austria
- [4] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln. März 2001
- [5] DIN EN 1991-1-2 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkung auf Tragwerke. September 2003
- [6] DIN EN 1993-1-2 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln, Tragwerksbemessung für den Brandfall. Oktober 2006
- [7] DIN-Fachbericht 91: Nationales Anwendungsdokument (NAD), Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2:1997-05, Eurocode 1. 1. Auflage 2000
- [8] DIN-Fachbericht 93: Nationales Anwendungsdokument (NAD), Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1993-1-2:1997-05, Eurocode 3. 1. Auflage 2000
- [9] Steeldoc 02/06: Brandschutz im Stahlbau, Grundlagen, Brandschutzplanung, Bemessung (tec 02). SZS Stahlbauzentrum Schweiz, Zürich, 2006