



Nationale brandschutztechnische Bemessung

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

Stahlbaukalender 2001

1	Einleitung	1
2	Brandschutzanforderungen nach Musterbauordnung	2
3	Die neue Muster-Industriebaurichtlinie (M IndBauRL)	2
3.1	Allgemeines	2
3.2	Vereinfachte Nachweismethode	4
1.3	Rechenverfahren nach DIN 18230-1	5
1.4	Methoden des Brandschutzingenieurwesens ⁶	
4	Eurocode 3 Teil 1-2 Brandschutztechnische Bemessung von Stahlbauten	6
4.1	Allgemeines	6
4.2	Einwirkungen im Brandfall	8
4.2.1	Thermische Einwirkungen	8
4.2.2	Mechanische Lasten im Brandfall	8
4.3	Temperaturabhängige Werkstoffkennwerte	9
4.4	Tragwerksbemessung im Brandfall für Stahlbauten	11
4.4.1	Allgemeines	11
4.4.2	Stahltemperaturen	12
4.4.3	Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren)	17
4.4.4	Nachweis auf Tragfähigkeitsebene	17
5	Zusammenfassung und Ausblick	18
6	Literatur	19
6.1	Normen und Richtlinien	19
6.2	Veröffentlichungen	20
7	Formelzeichen	21
8	Beispiel - Stahlträger	22
8.1	Aufgabenstellung	22
8.2	Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur	23
8.3	Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall	23
8.3.1	Einwirkungen im Brandfall	23
8.3.2	Berechnung der Stahltemperaturen	23
8.3.3	Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren)	25
8.3.4	Nachweis auf Tragfähigkeitsebene	26
9	Beispiel - Stahlstütze	27
9.1	Aufgabenstellung	27
9.2	Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur	28
9.3	Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall	28
9.3.1	Einwirkungen im Brandfall	28
9.3.2	Berechnung der Stahltemperaturen	28
9.3.3	Nachweis auf Temperaturebene (θ_{cr} -Verfahren)	30
9.3.4	Nachweis auf Tragfähigkeitsebene	31

1 Einleitung

Bei oberirdischen, offenen Parkgaragen werden keine Anforderungen an den Feuerwiderstand der tragenden Bauteile gestellt. Diese erst in jüngerer Zeit bundesweit vereinheitlichte Regelungssituation findet in ihrer Fortschrittlichkeit nur in wenigen europäischen Ländern ihre Parallelen. Die Folge ist eine eindrucksvolle Entwicklung des Marktanteils von Stahlbauten in diesem Marktsegment in den letzten Jahren. Damit wird deutlich, welche Optionen sich für den Stahlbau eröffnen, wenn es gelingt, die Anforderungen an den Feuerwiderstand von Stahlbauteilen auf das sicherheitstechnisch gebotene Maß zu reduzieren und – wenn möglich – ungeschützte Stahlkonstruktionen im Hochbau zu verwirklichen.



Bild 1-1 Parkhaus Nord, Hannover Messe
ungeschützte Stahlstützen und Verbundträger

Diese erfreuliche Entwicklung nährt die Hoffnung der Stahlbauunternehmen, dass auch in anderen Marktsegmenten eine Reduzierung von Anforderungen an den konstruktiven baulichen Brandschutz zu einer günstigeren Wettbewerbssituation führen könnte. Denn Brandschutzbekleidungen für Stahlkonstruktionen – gleich welcher Feuerwiderstandsklasse – bedeuten erhebliche Mehrkosten, die in der Größenordnung der Materialkosten für den Baustahl liegen.

Die Bauordnungen der Länder widmen sich in erster Linie den Gebäuden normaler Art und Nutzung. Damit sind vorrangig Wohnungsbauten gemeint. Die Regelungen zum vorbeugenden baulichen Brandschutz betreffen Anforderungen an Flucht- und Rettungswege, die Begrenzung der Brandausbreitung durch räumliche Trennung und Anforderungen an Baustoffe und Bauteile. Von den tragenden Bauteilen wird im Grundsatz Feuerbeständigkeit gefordert, was praktisch der Feuerwiderstandsklasse F 90 entspricht. Ausnahmen von dieser Regel bilden Gebäude geringer Höhe (ca. drei Geschosse) mit der

Feuerwiderstandsklasse F 30 und Einfamilienhäuser mit einer Wohnung, bei denen keine Anforderungen gestellt werden.

Die Abstufung der Anforderungen an den Feuerwiderstand nach der Gebäudehöhe findet sich analog auch in den Sonderbauverordnungen wieder (s. dazu Kap. 2). Eine Sonderstellung nehmen in diesem Zusammenhang die Regelungen zum baulichen Brandschutz im Industriebau ein, die in diesem Jahr (2001) in die Liste der Technischen Baubestimmungen aufgenommen werden (s. dazu Kap. 3).

Nationale und internationale Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet des baulichen Brandschutzes tragen in jüngerer Zeit Früchte in Normen und Vorschriften und führen zu spürbaren Veränderungen auch für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen. Dazu gehören fraglos die Brandschutzteile der Eurocodes („heiße“ Eurocodes). Sie ermöglichen besonders für den Stahlbau und den Verbundbau die brandschutztechnische Bemessung auf der Basis rechnerischer Nachweisverfahren.

In den vergangenen Jahren wurden diese Berechnungsverfahren regelmäßig im Rahmen der Erarbeitung von Brandschutzkonzepten für Sonderbauten angewendet. Dabei wurden vielfach ungeschützte Stahlbauteile für Dachkonstruktionen von Atrien und großen Messe- oder Sporthallen ermöglicht; ein Beispiel zeigt Bild 1-2.



Bild 1-2 Verwaltungsgebäude der dvg, Hannover
ungeschütztes Stahlmodul-Dachtragwerk

Nachdem das Deutsche Institut für Normung (DIN) die „heißen“ Eurocodes im Jahr 1997 erstmalig in deutscher Sprache veröffentlicht hat, sind die Normen mit den zugehörigen Nationalen Anwendungsdokumenten im Jahr 2000 erschienen und werden in diesem Jahr (2001) in die Liste der Technischen Baubestimmungen aufgenommen. Damit wird der Kreis der Anwender dieser Vorschriften im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren sicherlich deutlich vergrößert.

Für Stahl- und Stahlverbundbauten im Hoch- und Ingenieurbau sind drei „heiße“ Eurocodes von Bedeutung. Die Einwirkungen im Brandfall werden

in DIN V ENV 1991-2-2 [1] (kurz: EC1-2-2) geregelt, während die Regeln zur brandschutztechnischen Tragwerksbemessung für Stahlbauten in DIN V ENV 1993-1-2 [2] (kurz: EC3-1-2) bzw. für Verbundtragwerke aus Stahl und Beton in DIN V ENV 1994-1-2 [3] (kurz: EC4-1-2) enthalten sind. Die zugehörigen Nationalen Anwendungsdokumente (NAD) wurden als DIN-Fachberichte veröffentlicht. Alle Eurocodes zur brandschutztechnischen Bemessung sind mit den NADs in [9] zusammengefasst.

Über die Brandsicherheit von Verbundtragwerken auf der Basis des EC4-1-2 wurde von FONTANA im Stahlbau-Kalender 2000 [10] ausführlich berichtet. Dieser Beitrag widmet sich daher schwerpunktmäßig im Kap. 4 und in den Beispielen Kap. 8 und 9 der brandschutztechnischen Bemessung von Stahlbauteilen auf der Grundlage von EC3-1-2.

2 Brandschutzanforderungen nach Musterbauordnung

Der Arbeitsausschuss Brandschutz hat unter dem Vorsitz des Verfassers eine Empfehlung erarbeitet [11], die Anforderungen an den Feuerwiderstand tragender Stahlbauteile ausgedrückt in Feuerwiderstandsklassen zusammenfasst. Grundlage dafür sind die Musterbauordnung (MBO) und die Muster-Sonderbauordnungen. Die Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Anforderungen.

Darüber hinaus sieht der Entwurf für die zukünftige Musterbauordnung zwischen den Feuerwiderstandsklassen F 30 (feuerhemmend) für Gebäude geringer Höhe und F 90 (feuerbeständig) für sonstige Gebäude die Zwischenstufe der Feuerwiderstandsklasse F 60 AB („hochfeuerhemmend“) vor. Diese Brandschutzanforderung soll für Gebäude mittlerer Höhe, deren höchste Aufenthaltsräume maximal 13,0 m (bezogen auf Fußboden) über Gelände liegen und deren Nutzungseinheiten in einem Geschoss nicht größer als 400 m² sind, gelten.

In [11] wird auch die in der Praxis häufig gestellte Frage nach den Brandschutzanforderungen an Balkone in Stahlbauweise angesprochen. Die ARGEBAU hat festgestellt, dass die Anforderungen der Landesbauordnungen an tragende und aussteifende Wände, Pfeiler, Stützen und Decken nicht für Balkone gelten und dass Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer von Balkonen nicht erforderlich sind.

3 Die neue Muster-Industriebaurichtlinie (M IndBauRL)

3.1 Allgemeines

In der Muster-Industriebaurichtlinie [4] werden die Mindestanforderungen an den Brandschutz von Industriebauten festgelegt. Industriebauten, die diesen Anforderungen hinsichtlich

- der Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile und der Brennbarkeit der Baustoffe,
- der Größe der Brandabschnitte bzw. Brandbekämpfungsabschnitte,
- der Anordnung, Lage und Länge der Rettungswege

entsprechen, erfüllen die Schutzziele des § 17 Abs. 1 MBO.

Für den Nachweis der Brandsicherheit von Industriebauten werden nunmehr drei Verfahren bereitgestellt:

- Vereinfachtes Nachweisverfahren ohne Brandlastermittlung,
- Nachweisverfahren mit Ermittlung der Brandlast auf Grundlage von DIN 18230-1 [5],
- Methoden des Brandschutzingenieurwesens.

Die Anwendung der Richtlinie setzt die Einhaltung allgemeiner Anforderungen voraus bezüglich des Löschwasserbedarfs, der Lage und Zugänglichkeit des Gebäudes, der Rettungswege sowie der Treppen und Treppenräume, des Rauchabzugs, der Brandmelde- und Feuerlöschanlagen, der Dächer und Wände sowie den betrieblichen Maßnahmen zum Brandschutz und zur Gefahrenverhütung.

In der Richtlinie werden Sicherheitskategorien K1 bis K4 zur Berücksichtigung einer Werkfeuerwehr und der in einem Brand- oder Brandbekämpfungsabschnitt vorhandenen brandschutztechnischen Infrastruktur definiert:

- Sicherheitskategorie K1:
Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte ohne besondere Maßnahmen für Brandmeldung und Brandbekämpfung.
- Sicherheitskategorie K2:
Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsabschnitte mit automatischer Brandmeldeanlage.

Tabelle 2-1. Brandschutzanforderungen an tragende und aussteifende Bauteile

Gebäudetyp		Rechtsgrundlage	Brandschutzanforderung			
Wohngebäude und Gebäude geringer Höhe			Gebäudehöhe ¹⁾			
			h < 7 m		7 m < h < 22 m	
	Kellergeschosse	§ 25 (2) MBO	F 90		F 90	
	Wände, Pfeiler, Stützen	§ 25 (1) MBO	F 30 keine ²⁾		F 90	
	Decken, Träger	§ 25 (1) + (4) MBO	F 30 ³⁾		F 90	
Geschosse von Dachräumen	§ 25 (1) MBO	keine		keine		
Mittel- und Groß- garagen			offene ⁴⁾		geschlossene ⁵⁾	
	Wände, Pfeiler, Stützen und Decken, Träger	§10 (1) GarVO Zeile 1a 1b 1c	A A A		F 30 – A F 90 – AB F 30 – B oder A	
Versammlungs- stätten			1– geschossig		mehrgeschossig	
	Wände, Pfeiler, Stützen	§ 16 VstättVO	F 30 ⁶⁾		F 90	
	Decken, Träger	§ 17 VstättVO	F 30 – A ⁷⁾		F 90	
Krankenhäuser			1– geschossig		mehrgeschossig	
	Wände, Pfeiler, Stützen	§ 7 (1) + (2) KhBau- VO	F 30 – A		F 90 ⁸⁾	
	Decken, Träger und Dächer	§ 8 KhBauVO	F 30 – A		F 90	
	Dachtragwerke	KhBauVO	F 30		F 90	
Gaststätten			1– geschossig		mehrgeschossig	
	Wände, Pfeiler, Stützen	§ 6 GastBauVO	F 30		F 90	
	Decken, Träger	§ 7 GastBauVO	F 30 – A		F 90 – AB ⁹⁾	
Schulen			Gebäudehöhe			
			h < 7 m		7 m < h < 22 m	
	Wände, Pfeiler, Stützen	§ 25 (1) + (2) MBO	F 30		F 90	
Decken, Träger	§ 29 (1) + (2) MBO	F 30		F 90		
Verkaufsstätten			1– geschossig		mehrgeschossig	
			Ohne Sprinkler	mit Sprinkler	ohne Sprinkler	mit Sprinkler
	Wände, Pfeiler, Stützen	§ 3 VkVO	F 30	keine	F 90	F 90
	Decken, Träger	§ 7 VkVO	F 30 – A	A	F 90–A ¹⁰⁾	F 90–A ¹¹⁾
Dächer ¹²⁾	§ 8 VkVO	F30	keine	F 90	A	
Hochhäuser			Gebäudehöhe			
			h < 60 m		h > 60 m	
	Wände und Stützen	§ 3 (1) HochHR	F 90 – A		F 120 – A	
Decken, Träger und Dächer	§ 4 und § 5 (2) HochHR	F 90 – A		F 90 – A		

Anmerkungen zu Tabelle 2-1:

- 1) Die Gebäudehöhe h bezieht sich auf die Höhe des Fußbodens des obersten Geschosses über Gelände.
- 2) Ausnahme für freistehende Wohngebäude mit nicht mehr als einer Wohnung, deren Aufenthaltsräume in nicht mehr als zwei Geschossen liegen, sowie für freistehende Gebäude ähnlicher Größe (z.B. bis zu 300 m²) und für landwirtschaftliche Gebäude.
Hinweis:
Gebäude ähnlicher Größe sind z.B. kleine Verwaltungsgebäude nach § 51 Abs. 1 Nr. 4 MBO in Verbindung mit Abs. 2 Nr. 4 (Büro- und Verwaltungsgebäude) und Nr. 8 (z.B. kleine bauliche Anlagen und Räume, die für gewerbliche Zwecke bestimmt sind).
- 3) siehe Anmerkungen zu 2)
- 4) § 2 Abs. 3 GarVO, offene Mittel- und Großgaragen sind Garagen, die unmittelbar ins freie führende, unverschließbare Öffnungen in einer Größe von insgesamt mindestens einem Drittel der Gesamtfläche der Umfassungswände haben, bei denen mindestens zwei gegenüberliegende Umfassungswände mit den ins Freie führenden Öffnungen nicht mehr als 70 m voneinander entfernt sind und bei denen eine ständige Querlüftung vorhanden ist. Offene Garagen sind auch Stellplätze mit Schutzdächern (überdachte Stellplätze).
- 5) siehe Anmerkung zu 4)
- 6) Ausnahme F 30 für erdgeschossige Gebäude
- 7) § 17 VstättVO, Ausnahmen von den Anforderungen können in erdgeschossigen Versammlungsstätten gestattet werden, wenn sie nicht mehr als 800 Personen fassen (siehe Hinweise der SBV).
- 8) Wände mit brennbaren Baustoffen können gestattet werden, wenn der Feuerwiderstand dieser Wände mindestens dem feuerbeständiger Wände entspricht und Bedenken wegen des Brandschutzes nicht bestehen.
- 9) wenn sich darüber Aufenthaltsräume befinden
- 10) Öffnungen sind unzulässig, Ausnahme bilden nichtnotwendige Treppen.
- 11) Öffnungen sind zulässig zwischen Verkaufsräumen, Verkaufsräumen und Ladenstraßen, sowie Ladenstraßen.
- 12) Bedachungen müssen mit Ausnahme der Dachhaut und der Dampfsperre aus A1 Baustoffen bestehen.

- Sicherheitskategorie K3:
Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsschnitte mit automatischer Brandmeldeanlage in Industriebauten mit Werkfeuerwehr.
Eine weitere Unterteilung in die Kategorien K3.1 bis K3.4 erfolgt in Abhängigkeit der Mannschaftsstärke der Werkfeuerwehr.
- Sicherheitskategorie K4:
Brandabschnitte oder Brandbekämpfungsschnitte mit selbsttätiger Feuerlöschanlage.

Die Forderung nach einer automatischen Brandmeldeanlage kann durch eine ständige Personalbesetzung kompensiert werden, wenn eine sofortige Brandentdeckung und Meldung an die Feuerwehr gewährleistet ist. Die Sicherheitskategorien stellen eine wesentliche Eingangsgröße für die im folgenden vorgestellten Nachweismethoden dar.

In diesem Beitrag wird schwerpunktmäßig auf die Regelungen für erdgeschossige Industriebauten eingegangen.

3.2 Vereinfachte Nachweismethode

Der Vereinfachte Nachweis nach Abschnitt 6 der Richtlinie basiert auf der Einhaltung zulässiger Größen der Brandabschnittsflächen in Abhängigkeit von der Sicherheitskategorie, der Anzahl der Geschosse des Gebäudes und der Feuerwiderstandsklasse der tragenden und aussteifenden Bauteile. Diese Angaben sind für erdgeschossige Industriebauten in Tab. 3-1 zusammengefasst. Für solche Industriebauten der Sicherheitskategorie K4 lässt sich laut Tab. 3-1 eine maximale Brandabschnittsfläche von 10.000 m² realisieren ohne Anforderungen an den Feuerwiderstand der tragenden und aussteifenden Bauteile. Das ermöglicht den Bau ungeschützter Stahlkonstruktionen.

Tab. 3-1 Auszug aus Tab. 1 der Muster-Industriebaurichtlinie [4], zulässige Größe der Brandabschnittsflächen für erdgeschossige Industriebauten in m²

Sicherheitskategorie		Feuerwiderstandsklasse der tragenden und aussteifenden Bauteile	
		ohne Anforderung	F 30
K 1	Ohne besondere Maßnahmen für Brandmeldung und Brandbekämpfung	1800 ¹⁾	3000
K 2	mit automatischer Brandmeldeanlage	2700 ¹⁾	4500
K 3.1	mit automatischer Brandmeldeanlage und Werkfeuerwehr in mindestens Staffelstärke	3200 ¹⁾	5400
K 3.2	mit automatischer Brandmeldeanlage und Werkfeuerwehr in mindestens Gruppenstärke	3600 ¹⁾	6000
K 3.3	mit automatischer Brandmeldeanlage und Werkfeuerwehr mit mindestens zwei Staffeln	4200 ¹⁾	7000
K 3.4	mit automatischer Brandmeldeanlage und Werkfeuerwehr mit mindestens drei Staffeln	4500 ¹⁾	7500
K 4	mit selbsttätiger Löschanlage	10000	10000

¹⁾ Breite des Industriebaus ≤ 40 m und Wärmeabzugsfläche (nach DIN 18230-1) ≥ 5% der Brandabschnittsfläche

3.3 Rechenverfahren nach DIN 18230-1

Für Industriebauten, die nicht nach dem vereinfachten Verfahren (siehe Tab. 3-1) beurteilt werden können, kann basierend auf einer Brandlastermittlung das Berechnungsverfahren der DIN 18230-1 angewendet werden. Mit diesem Verfahren wird zunächst die äquivalente Branddauer t_a berechnet.

Mit der äquivalenten Branddauer t_a wird ein Zusammenhang zwischen der Brandwirkung eines Naturbrandes und der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102-2 [6] hergestellt wobei sich die Äquivalenz auf die maximale Bauteiltemperatur unter Naturbrand bezieht. Als äquivalente Branddauer ist diejenige Zeitdauer definiert nach der ein Bauteil unter ETK-Beflammung die Temperatur erreicht, die es in einem Naturbrandereignis maximal erreichen würde. Dieser Zusammenhang ist in Bild 3-1 dargestellt.

Bei der Berechnung der äquivalenten Branddauer nach DIN 18230-1 werden die Höhe der Brandlast, die thermischen Eigenschaften der Umfassungsbau-teile sowie die Ventilationsverhältnisse berücksichtigt. Sie ergibt sich gemäß Gl. (3-1).

$$t_a = q_R \cdot c \cdot w \quad [\text{min}] \quad (3-1)$$

mit

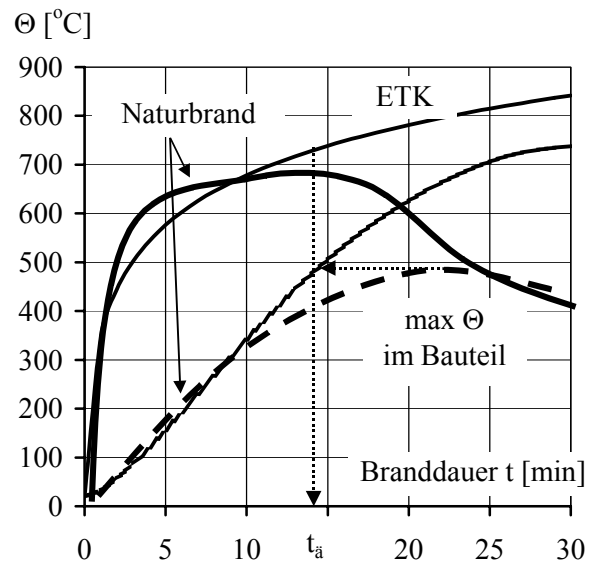


Bild 3-1 Ermittlung der äquivalenten Branddauer aus dem Vergleich der Bauteiltemperaturverläufe unter Naturbrand und unter ETK

- q_R rechnerische Brandbelastung [kWh/m²]
- c Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften der Umfassungsbau-teile [min·m²/kWh]
- w Wärmeabzugsfaktor zur Berücksichtigung der Ventilationsverhältnisse [-]

Unter Berücksichtigung der so ermittelten äquivalenten Branddauer und der Sicherheitskategorie

können aus Tab. 3-2 die zulässigen Größen von Brandbekämpfungsabschnitten entnommen werden, für die bei erdgeschossigen Industriebauten die tragenden und aussteifenden Bauteile ohne Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit ausgeführt werden dürfen. Hierbei sind die erforderlichen Mindestgrößen der Wärmeabzugsflächen im Dach sowie die zulässigen Breiten des Industriebaus zu beachten.

Gemäß Tab. 3-2 sind bei erdgeschossigen Industriebauten Brandbekämpfungsabschnitte mit einer Fläche von bis zu 30.000 m² ohne Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der tragenden und aussteifenden Bauteile zulässig, wenn die äquivalente Branddauer 15 Minuten nicht übersteigt. Das ist regelmäßig mit entsprechend kleinen Brandbelastungen verbunden.

Wird zusätzlich zur äquivalenten Branddauer die erforderliche Feuerwiderstandsdauer t_F berechnet, können sich Flächen ergeben, die erheblich größer sind, als die in Tab. 3-2 angegeben. Günstigstenfalls kann bei Ausführung der tragenden und aussteifenden Bauteile in der erforderlichen Feuerwiderstandsklasse, eine zulässige Größe des Brandbekämpfungsabschnitts von bis zu 60.000 m² erreicht werden.

Die Berechnung von t_F aus t_a erfolgt nach Gl. (3-2) unter Berücksichtigung der Brandsicherheitsklasse, mit der die brandschutztechnische Bedeutung eines Bauteils erfasst wird und der vorhandenen brandschutztechnischen Infrastruktur.

$$\text{erf } t_F = t_a \cdot \gamma \cdot \alpha_L \quad [\text{min}] \quad (3-2)$$

mit

γ [-] ($\gamma > 1$) Sicherheitsbeiwert für die Brandsicherheitsklasse SK_{b3}, wird für SK_{b2} und SK_{b1} ersetzt durch δ

α_L [-] ($\alpha > 1$) Zusatzbeiwert zur Berücksichtigung des günstigen Einflusses der brandschutztechnischen Infrastruktur

Der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer erf t_F ist dann die für die Bauteile einzuhaltende Feuerwiderstandsklasse nach DIN 4102-2 wie folgt zuzuordnen:

0 min < erf t_F ≤ 15 min → keine Anforderungen

15 min < erf t_F ≤ 30 min → F 30

30 min < erf t_F ≤ 60 min → F 60

60 min < erf t_F → F 90

Das vorgestellte Berechnungsverfahren darf nicht angewendet werden, wenn sich für die Brandsicherheitsklasse SK_{b3} eine höhere rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer als 90 Minuten ergibt.

Die zulässigen Flächen der Brandbekämpfungsabschnitte werden nach Gl. (3-3) berechnet:

$$\text{zul } A_{G,BBA} = 3000 \text{ m}^2 \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4 \cdot F_5 \quad [\text{m}^2] \quad (3-3)$$

In den Faktoren F1 bis F5 werden dabei folgende Einflussgrößen berücksichtigt:

1. äquivalente Branddauer aus dem globalen Nachweis nach DIN 18230-1
2. brandschutztechnische Infrastruktur
3. Höhenlage des Fußbodens des untersten Geschosses von oberirdischen Brandbekämpfungsabschnitten
4. Anzahl der Geschosse des Brandbekämpfungsabschnitts
5. Ausführung der Öffnungen in den Geschossdecken mehrgeschossiger Brandbekämpfungsabschnitte

Die Summe der so ermittelten Geschossflächen darf nicht mehr als 60.000 m² betragen. Durch Einhaltung zusätzlicher Randbedingungen sind bei erdgeschossigen Industriebauten jedoch Flächengrößen bis maximal 120.000 m² zulässig.

3.4 Methoden des Brandschutzingenieurwesens

Der Nachweis zur Einhaltung der Schutzziele der Musterbauordnung (MBO) darf alternativ zu den in Kap. 3.2 und 3.3 vorgestellten Verfahren mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens erbracht werden. Zu deren Anwendung sind im normativen Anhang A der Muster-Industriebaurichtlinie die Grundsätze und Voraussetzungen für die Nachweissführung sowie deren Dokumentation geregelt.

4 Eurocode 3 Teil 1-2 Brandschutztechnische Bemessung von Stahlbauten

4.1 Allgemeines

Die grundlegenden Änderungen der „heißen“ Eurocodes gegenüber den bisherigen nationalen 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

Tabelle. 3-2 Zulässige Größe der Flächen von Brandbekämpfungsabschnitten erdgeschossiger Industriebauten ohne Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der tragenden und aussteifen Bauteile in m²

Sicherheitskategorie		äquivalente Branddauer t _a in Minuten			
		≤ 15	≤ 30	≤ 60	≤ 90
K 1	ohne besondere Maßnahmen für Brandmeldung und Brandbekämpfung	9000	5500	2700	1800
K 2	mit automatischer Brandmeldeanlage	13500	8000	4000	2700
K 3.1	Mit automatischer Brandmeldeanlage und mit Werkfeuerwehr in mindestens Staffelstärke	16000	10000	5000	3200
K 3.2	mit automatischer Brandmeldeanlage und Werkfeuerwehr mit mindestens Gruppenstärke	18000	11000	5400	3600
K 3.3	mit automatischer Brandmeldeanlage und Werkfeuerwehr mit mindestens zwei Staffeln	20700	12500	6200	4200
K 3.4	mit automatischer Brandmeldeanlage und Werkfeuerwehr mit mindestens drei Staffeln	22500	13500	6800	4500
K 4	mit selbsttätiger Löschanlage	30000	20000	10000	10000
Mindestgröße der Wärmeabzugsflächen im Dach in % nach DIN 18230-1		1 ¹⁾	2 ¹⁾	3 ¹⁾	4 ¹⁾
Zulässige Breite des Industriebaus in m		80 ²⁾	60 ²⁾	50 ²⁾	40 ²⁾

Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

¹⁾ Für Industriebauten der Sicherheitskategorie K 4 gilt die Mindest-Wärmeabzugsfläche von 0,5%.

²⁾ Für Industriebauten der Sicherheitskategorie K 4 gibt es keine Begrenzung der zulässigen Breite.

Reduzierung der mechanischen Lasten im Brandfall gegenüber den bisherigen Prüfbedingungen (s. dazu Kap. 4.2.2). 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.

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 im Brandfall und ggfs. für die Begrenzung der Brandausbreitung. Die „heißen“ Eurocodes befassen sich hauptsächlich

- nicht ausschließlich - mit der Bemessung für den Feuerwiderstand unter Normbrandbedingungen.

Von tragenden Bauteilen wird gefordert, dass ihre Tragfähigkeit im Brandfall unter den Bemessungslasten (s. dazu Kap. 4.2.2) 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.

In dem Entwurf zum Einführungserschluss (9/2000) werden die Begriffe der nationalen Bauordnungen den Klassen nach Eurocodes gemäß Tabelle 4-1 zugeordnet.

Tabelle 4-1. Zuordnung der Feuerwiderstandsklassen nach Eurocode zu den Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2 bzw. den bauaufsichtlichen Anforderungen

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile <u>ohne</u> Raumabschluss	Tragende Bauteile <u>mit</u> Raumabschluss	Nichttragende Innenwände
feuerhemmend	R 30 F 30	REI 30 F 30	EI 30 F 30
feuerbeständig	R 90 F 90	REI 90 F 90	EI 90 F 90
Brandwand	-	REI-M 90	EI-M 90

Es bedeuten:
R – Tragfähigkeit, E – Raumabschluss, I – Wärmedämmung,
M – Widerstand gegen mechanische Beanspruchung

Allgemein stehen für den Nachweis des Feuerwiderstands tragender Bauteile neben dem Brandversuch folgende Nachweisebenen zur Verfügung :

- Ebene 1
Klassifizierung der Bauteile mit Hilfe von Tabellen (entspricht dem Verfahren nach DIN 4102-4 [7])
- Ebene 2
Nachweis mit vereinfachten Berechnungsverfahren
Diese Nachweisform geht von geeigneten vereinfachten und vereinfachenden Annahmen aus. Z.B. wird bei Stahlquerschnitten eine über den Querschnitt konstante Temperatur angenommen.
- Ebene 3
Nachweis mit allgemeinen Berechnungsverfahren
Dieser Nachweis beinhaltet die vollständige thermische und mechanische Analyse in einem numerischen Simulationsmodell. Diese Nachweismethode darf nach EC3-1-2 auf Bauteile, Tragwerksteile und Gesamtkonstruktionen angewendet werden.

Der Berechnungsaufwand steigt von Ebene 1 nach Ebene 3. Das Konzept der drei Nachweistufen ist so angelegt, dass das Bemessungsergebnis umso konservativer ausfällt, je einfacher das gewählte Nachweisverfahren ist, ggfs. auch um den Preis geringerer Wirtschaftlichkeit.

Im EC3-1-2 sind keine Tabellen für klassifizierte Stahlbauteile (Ebene 1) enthalten. Dies erklärt sich aus der Tatsache, dass Brandschutzbekleidungen und -beschichtungen für Stahlbauteile Produkte sind, die exklusiv für die Hersteller auf dem Wege der Zulassung auf den Markt kommen und deshalb häufig nicht genormt sind.

Nach Auffassung der Fachkommission Bautechnik soll das Nachweisverfahren der Ebene 3 nur im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall anwendbar werden. Die Grundlagen für dieses Nachweisverfahren sind im EC3-1-2 definiert.

In diesem Beitrag werden daher schwerpunktmäßig die Nachweise auf der Ebene 2 behandelt.

4.2 Einwirkungen im Brandfall

4.2.1 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 [6] bekannte Einheits-Temperaturzeitkurve (s.Gl. 4-1 und Bild 4-1), 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. Zur Zeit sind national im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren Naturbrandkurven nicht allgemein zugelassen. Daher beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen auf thermische Einwirkungen nach Normbrandkurve (ETK):

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]}; t \text{ [min]} \quad (4-1)$$

4.2.2 Mechanische Lasten im Brandfall

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

$$S_{dA} = S \left[\sum \gamma_{GA} \cdot G_k + A_d + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum (\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}) \right] \quad (4-2)$$

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 4-2.

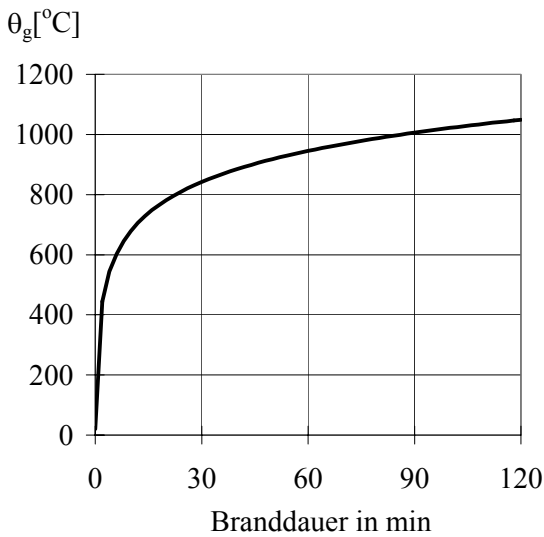


Bild 4-1 Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

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

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} \cdot E_d \quad (4-3)$$

Tab. 4-2: Kombinationsbeiwerte gemäß [1]

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. (4-2):

$$E_{fi,d,t} = \gamma_{GA} \cdot G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \text{ mit } \xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k} \quad (4-4)$$

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

Für die Kaltbemessung gilt:

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} \text{ mit } \xi = \frac{Q_{k,1}}{G_k} \quad (4-5)$$

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

Daraus ergibt sich der Reduktionsfaktor in Abhängigkeit von ξ und $\psi_{1,1}$ zu (s. Bild 4-2):

$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d,t}}{E_d} = \frac{G_k (1,0 + \psi_{1,1} \cdot \xi)}{G_k (1,35 + 1,5 \cdot \xi)} = \frac{1,0 + \psi_{1,1} \cdot \xi}{1,35 + 1,5 \cdot \xi} \quad (4-6)$$

Für hochbauübliche Lastzusammensetzungen darf nach dem NAD im Stahlbau pauschal $\eta_{fi} = 0,65$ eingesetzt werden, wenn die Einwirkungen nicht genauer ermittelt werden.

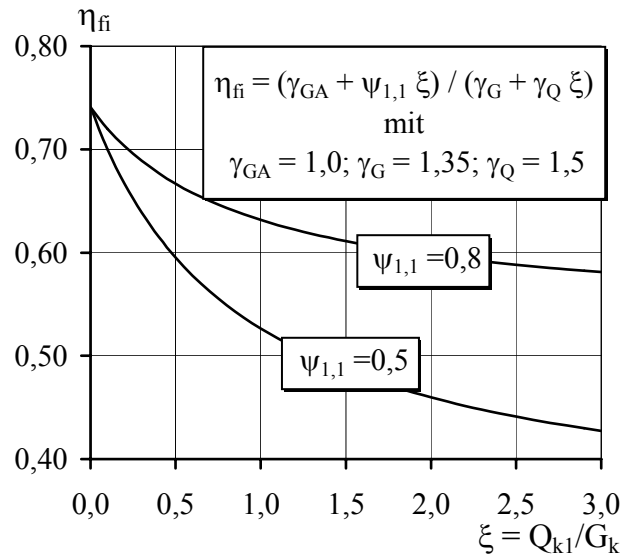


Bild 4-2 Reduktionsfaktor η_{fi} in Abhängigkeit vom Verhältnis Verkehrslast zu ständiger Last

4.3 Temperaturabhängige Werkstoffkennwerte

Wichtige Grundlage für die Berechnungsverfahren ist, dass im EC3-1-2 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 thermische Kennwerte wie Wärmeleitfähigkeit λ , spez. Wärme c und Dichte ρ erfasst. Diese Werkstoffkennwerte des Baustahls werden als Rechenwertfunktionen angegeben.

In diesem Beitrag werden die für die Nachweisebene 2 relevanten Werkstoffkennwerte wiedergegeben.

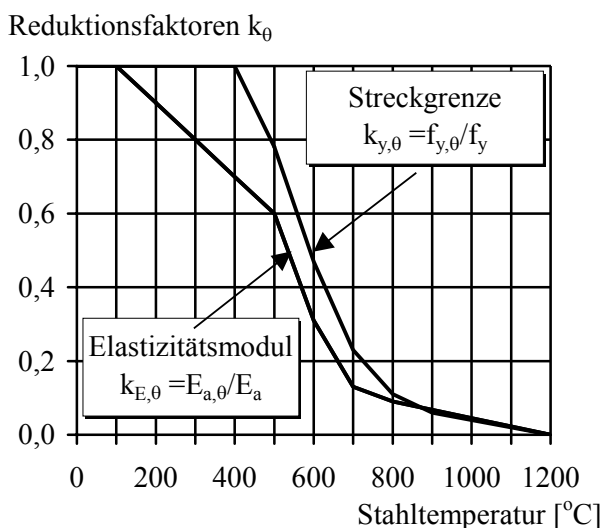


Bild 4-3 Abhängigkeit der Streckgrenze und des Elastizitätsmoduls von der Temperatur

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

In den Bildern 4-4 bzw. 4-5 sind die spezifische Wärme c_a und die Wärmeleitfähigkeit λ_a von Baustahl in Abhängigkeit von der Stahltemperatur angegeben.

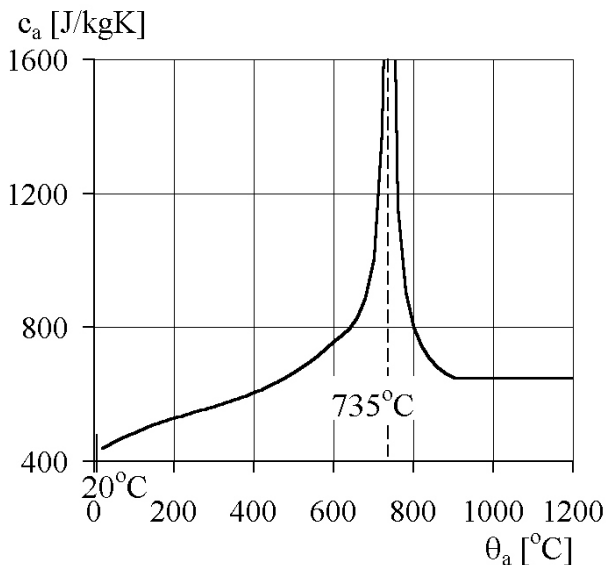


Bild 4-4 Spezifische Wärme von Stahl als Funktion der Temperatur

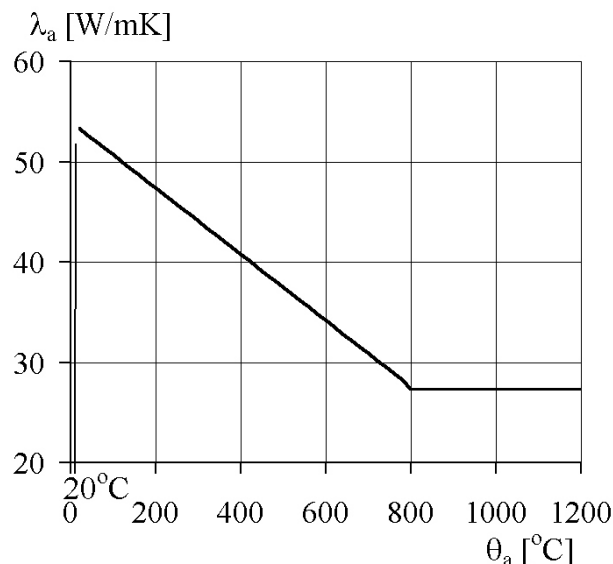


Bild 4-5 Wärmeleitfähigkeit von Stahl als Funktion der Temperatur

Wenn Anforderungen zum Brandschutz zu erfüllen sind, werden Brandschutzmaßnahmen im Stahlbau in der Regel 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 Minstdicken zugeordnet zu den Feuerwiderstandsklassen gemäß Normbrandversuch. Daher ist auch verständlich, dass im EC3-1-2 keine Materialkennwerte für Bekleidungen oder Beschichtungen geregelt werden, sondern auf diesbezügliche Prüfvorschriften verwiesen wird. 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. 4-3) niedergelegt. Weitere Angaben der Tabelle 4-3 sind [12, 13] entnommen. Auf die Hersteller kommt die Aufgabe zu, solche Materialkennwerte aus vorhandenen oder neuen Prüfergebnissen zu ermitteln und bereitzustellen. Das Verfahren für die Ermittlung ist auf europäischer Ebene bereits beschrieben [14].

Tab. 4-3: Thermische Materialkennwerte von Brandschutzbekleidungen

Brandschutzmaterial	Wärmeleitfähigkeit λ_p [W/(m K)]	Spezifische Wärme c_p [J/(kg K)]	Dichte ρ_p [kg/m ³]	Wassergehalt p [%]
Genormte Materialien nach NAD [2]				
Putze				
Mörtelgruppe P II, P IV a,b,c nach DIN 18550 Teil 2	0,12	1100	550	-
Vermiculite- und Perlitemörtel nach DIN 4102 Teil 4 Abschn. 3.1.6.5	0,12	1100	550	-
Platten				
Gipskarton-Feuerschutzplatten (GKF) nach DIN 18180	0,20	1700	945	-
Zugelassene Materialien				
Platten				
Ridurit® [12]	0,20	1700	900	-
nach Literaturangaben [13]				
Spritzputze				
Mineralfaser	0,12	1200	300	1
Vermiculite	0,12	1200	350	15
Perlite	0,12	1200	350	15
Spezialputze				
Vermiculite (od. Perlite) und Zement	0,12	1100	550	15
Vermiculite (od. Perlite) und Gips	0,12	1100	650	15
Platten				
Vermiculite (od. Perlite) und Zement	0,20	1200	800	15
Faser-Silikate oder Faser-Calcium-Silikate	0,15	1200	600	3
Faser-Zement	0,15	1200	800	5
Gipskarton	0,20	1700	800	20
Matten				
Faser-Silikate, Mineralwolle, Steinwolle	0,20	1200	150	2
Beton	1,60	1000	2300	4
Leichtbeton	0,80	840	1600	5
Betonsteine	1,00	1200	2200	8
Isolierbacksteine	0,40	1200	1000	-
Backsteine	1,20	1200	2000	-

4.4 Tragwerksbemessung im Brandfall für Stahlbauten

4.4.1 Allgemeines

Wenn laut Bauordnungen oder Sonderbauordnungen Anforderungen an den Feuerwiderstand von Stahlbauteilen gestellt werden (s. dazu Kap. 2 und 3), 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 R 60 zur Anwendung kommen, können mit plattenförmigen Bekleidungen und Putzen leicht Feuerwiderstands-

klassen bis R 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 R 30 oder R 90, im Hinblick auf die Kosten nicht ausschlaggebend.

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 Profilfaktor ein (s. Tab. 4-4). Das bisherige Vorgehen sieht vor, dass die erforderliche Mindestdicke für das jeweils gewählte Brandschutzmaterial nach der Ermittlung des Profilfaktors lediglich noch von der gewünschten Feuerwiderstandsklasse abhängig ist. Die Mindestdicken der Materialien sind in geringer Zahl in DIN 4102-4 meist jedoch in den Herstellerprospekten auf der Basis von Zulassungen 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) auf der Ebene 2 folgende Verfahren zur Verfügung:

Vereinfachte Berechnungsverfahren auf

- Temperaturebene oder auf
- Tragfähigkeitsebene.

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.

$$\theta_{a,max} \leq \theta_{cr} \quad (4-7)$$

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

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (4-8)$$

mit

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

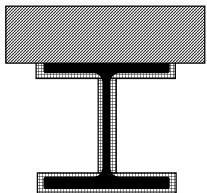
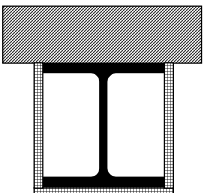
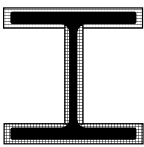
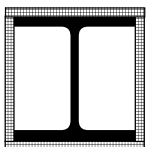
Brandfall

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

4.4.2 Stahltemperaturen

Die Erwärmung von Stahlbauteilen unter Brandbeanspruchung wird maßgeblich von der Massigkeit bestimmt. Je massiger ein Stahlbauteil ist, desto mehr Energie kann gespeichert werden, was bei gleicher Oberfläche niedrigere Stahltemperaturen bewirkt. Die Massigkeit wird durch den sogenannten Profilfaktor ausgedrückt. Der Profilfaktor A_m/V (ungeschützt) bzw. A_p/V (bekleidet) ist nach EC3-1-2 als Verhältnis von brandbeanspruchter Oberfläche A_m zum Volumen V des Stahlbauteiles pro Längeneinheit definiert. Für Bauteile mit über der Länge gleichbleibendem Querschnitt ist der Profilfaktor identisch mit dem Wert U/A nach DIN 4102-4. Beispiele für die Ermittlung des Profilfaktors bei I-Profilen zeigt Tabelle 4-4. In den Tabellen 4-5a und b sind die Profilfaktoren A_m/V ungeschützter Walzprofile für drei- und vierseitige Brandbeanspruchung wiedergegeben. Bei profilfolgender Bekleidung sind die Profilfaktoren A_p/V identisch mit A_m/V .

Tabelle 4-4: Ermittlung des Profilfaktors

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

Tab. 4-5a Profilmfaktoren ungeschützter Stahlprofile A_m/V [m^{-1}] für 3- und 4-seitige Beflammung

h	HE-A		HE-AA		HE-B		HE-M	
	3	4	3	4	3	4	3	4
100	217	264	290	355	180	218	96	116
120	220	267	296	361	167	202	92	111
140	208	253	281	342	155	187	88	106
160	192	234	244	297	140	169	83	100
180	187	226	229	279	131	159	80	96
200	174	211	211	256	122	147	76	92
220	161	195	200	242	115	140	73	88
240	147	178	185	225	108	131	61	73
260	141	171	176	214	105	127	60	72
280	136	165	168	204	102	123	59	71
300	126	153	158	192	96	116	50	60
320	117	141	152	184	91	110	50	60
340	112	134	147	177	88	106	50	60
360	107	128	142	170	86	102	51	61
400	101	120	135	161	82	97	52	62
450	96	113	133	156	79	93	53	62
500	92	107	130	152	76	89	55	63
550	90	104	123	142	76	88	56	64
600	89	102	120	138	75	86	57	65
650	87	100	118	135	74	85	58	66
700	85	96	114	129	72	82	59	67
800	84	94	108	122	72	81	60	68
900	81	90	101	113	70	78	62	69
1000	81	89	98	108	70	78	64	70
1100	80	88			71	78	65	71

Tab. 4-5b Profilmfaktoren ungeschützter Stahlprofile A_m/V [m^{-1}] für 3- und 4-seitige Beflammung

h	IPE		IPE a		IPE o		IPE v	
	3	4	3	4	3	4	3	4
80	369	429						
100	334	387						
120	311	360	370	428				
140	291	335	354	409				
160	269	310	332	382				
180	253	291	308	354	226	260		
200	235	270	283	326	212	244		
220	221	254	260	298	200	230		
240	205	236	240	276	185	213		
270	197	227	230	265	170	195		
300	188	216	216	248	163	187		
330	175	200	199	228	152	175		
360	163	186	185	211	142	162		
400	152	174	176	200	135	154	122	139
450	143	162	165	187	122	138	109	124
500	134	151	152	172	114	129	96	108
550	124	140	142	160	108	121	84	95
600	115	129	131	147	93	104	79	89

Der Temperaturanstieg im Zeitinkrement Δt ungeschützter Stahlbauteile lässt sich gemäß EC3-1-2 nach der Gleichung

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m}{V} \cdot \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \cdot \Delta t \quad [^\circ C] \quad (4-9)$$

berechnen. Bei der numerischen Lösung sollten die Zeitinkremente Δt nicht größer als 5 Sekunden sein. Der Wärmestrom setzt sich aus dem Anteil aus Konvektion

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad [W/m^2] \quad (4-10)$$

mit

$$\alpha_c = 25 \frac{W}{m^2 K} \quad (4-11)$$

und Strahlung

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \epsilon_{res} \cdot \sigma \cdot \left\{ (\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right\} \quad [W/m^2] \quad (4-12)$$

mit

Φ = 1 Konfigurationsfaktor [-]

ϵ_{res} = 0,5 result. Emissionswert [-]

σ = Stefan-Boltzmann-Konstante [$W/m^2 K^4$]
 $= 5,6697 \cdot 10^{-8}$

zusammen:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (4-13)$$

Die Gastemperatur θ_g im Brandraum folgt der ETK nach Gl. 4-1.

Die numerische Lösungsfunktion der Gl. 4-9 zeigt Bild 4-6 für verschieden massige Stahlquerschnitte. Es wird deutlich, dass unter der ETK-Beanspruchung 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 [15] Näherungsformeln veröffentlicht, mit denen die Temperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer und dem Profilmfaktor unter ETK schnell errechnet werden können (s. Tab. 4-6). Diese Kurven sind insbesondere für geringe Brandbelastungen mit äquivalenten Branddauern bis 30 min nützlich.

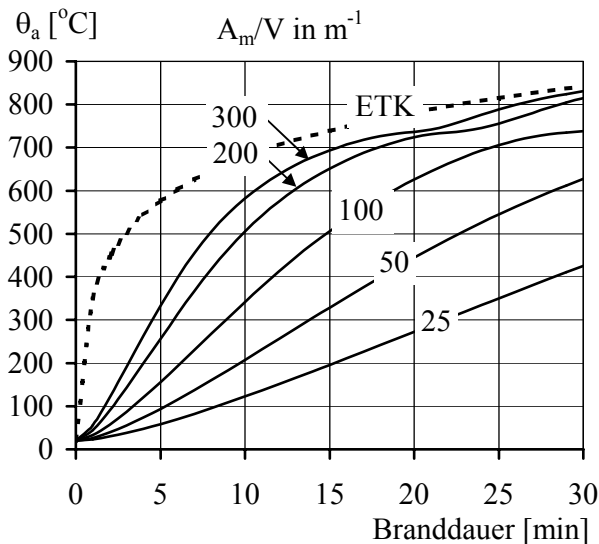


Bild 4-6 Erwärmungskurven ungeschützter Stahlquerschnitte unter Einheits-Temperaturzeitkurve; Kurvenparameter: Profilfaktor A_m/V [m^{-1}]

Der Temperaturanstieg im Zeitinkrement Δt bekleideter Stahlbauteile lässt sich gemäß EC3-1-2 nach der Gleichung

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \frac{\phi}{3}} \cdot \Delta t - \left(e^{\phi/10} - 1 \right) \cdot \Delta\theta_{g,t}$$

$$[\text{°C}] \quad (4-14)$$

mit

$$\phi = \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} \quad (4-15)$$

berechnen. Bei der numerischen Lösung sollten die Zeitinkremente Δt nicht größer als 30 Sekunden sein.

Die Gl. (4-14) enthält so viele, teils temperaturabhängige, Parameter, dass eine übersichtliche Darstellung der Lösungsfunktion wie bei den ungeschützten Querschnitten in Bild 4-6 nicht ohne weiteres möglich ist. Wird jedoch die Energieaufnahme in der Bekleidung vernachlässigt, so wird mit $\phi = 0$ Gl. (4-14) zu

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{c_a \cdot \rho_a} \cdot \Delta t \quad (4-16)$$

Gl. 4-16 kann für verschiedene Verhältnisse von $\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p}$

numerisch gelöst und graphisch dargestellt werden (s. Bild 4-8).

Physikalisch ist diese Näherung sinnvoll bei massigen Querschnitten (kleiner Profilfaktor) und kleinen Bekleidungsstärken. Diese Annahme wurde auch bei der Darstellung der Euro-Nomogramme in [13] getroffen. Bei filigranen Stahlquerschnitten (hoher Profilfaktor) und dickerer Bekleidung führt diese

Näherung zu sehr konservativen Ergebnissen, d.h., die Stahltemperaturen sind deutlich zu hoch. Das folgende Beispiel soll diesen Effekt aufzeigen (s. Bild 4-7).

Profilfaktor $A_p/V = 250 m^{-1}$

Bekleidung Ridurit (s. Tab. 4-3); $d_p = 3 cm$

$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} = 250 \cdot \frac{0,2}{0,03} = 1700 \frac{W}{m^3 K}$$

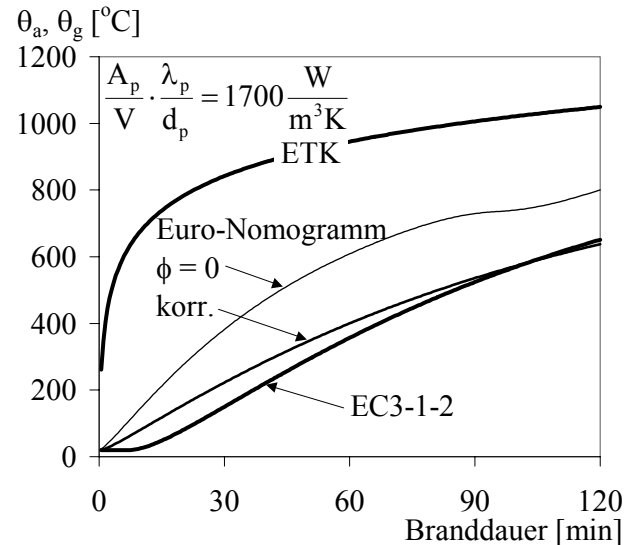


Bild 4-7 Erwärmungskurven eines bekleideten Stahlquerschnittes nach EC3-1-2, Euro-Nomogramm und korrigiertem Euro-Nomogramm

Bild 4-7 zeigt als unterste Erwärmungskurve die richtige Lösung nach Gl. 4-14 (EC3-1-2) und als oberste Erwärmungskurve die Lösung nach Gl. 4-16 (Euro-Nomogramm, $\phi = 0$). Es ist zu erkennen, dass mit der Annahme $\phi = 0$ die Stahltemperaturen bei 90 min Branddauer etwa um 200°C überschätzt werden. In [13] wird ein Vorgehen gezeigt, die Lösung nach Gl. 4-16 zu verbessern. Dafür wird der Kurvenparameter $\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p}$ mit einem Faktor $\frac{1}{1 + \phi/2}$ multipliziert.

Dabei werden in ϕ nach Gl. 4-15 alle Werkstoffparameter als Konstante, d.h. unabhängig von der Temperatur eingesetzt. Für das Beispiel ergibt sich:

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{c_p \cdot \rho_p}{c_a \cdot \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} \\ &= \frac{1700 \cdot 900}{600 \cdot 7850} \cdot 0,03 \cdot 250 = 2,44 \\ \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/2} \\ &= 1700 \cdot \frac{1}{1 + 2,44/2} = 780 \frac{W}{m^3 K} \end{aligned}$$

Mit diesem korrigierten Kurvenparameter ergibt sich eine Erwärmungskurve in Bild 4-7 (Euro-Nomogramm, korrigiert), die im Bereich von 90min Branddauer das Ergebnis nach Gl. 4-14 sehr genau trifft. Bei niedrigeren Branddauern sind die Stahltemperaturen jedoch zu hoch.

Erstmals werden vom Verfasser in diesem Beitrag analytische Funktionen für die Lösung der Gl. 4-16 angegeben (s. Tab. 4-6 und Bild 4-8). Diese Erwärmungskurven entsprechen den in [13] (Euro-Nomogramm) graphisch dargestellten Kurven.

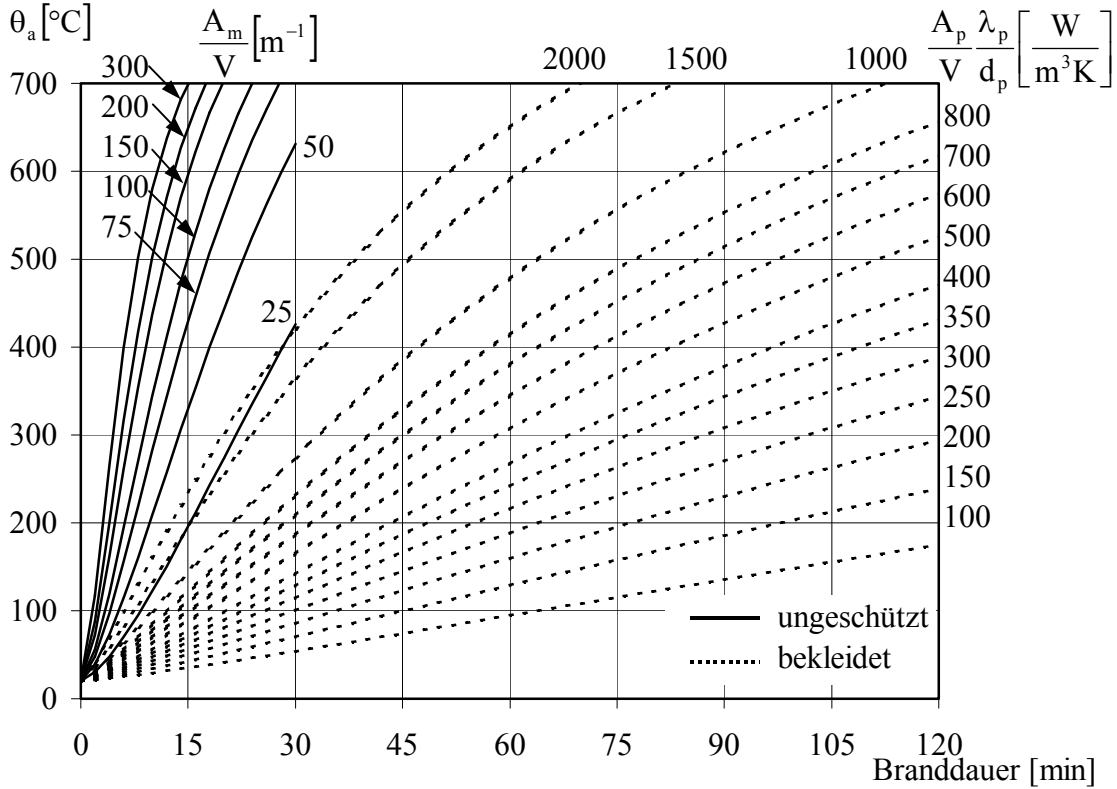


Bild 4-8 Erwärmungsfunktionen von Stahlbauteilen als Funktion der Branddauer [min] unter Einheits-Temperaturzeitkurve (Näherungsfunktionen)

Tabelle 4-6: Erwärmungsfunktionen von Stahlbauteilen als Funktion der Branddauer t [min] unter Einheits-Temperaturzeitkurve (Näherungsfunktionen)

Allgemeiner Ansatz: $\theta_{a,t} = \frac{c_1 \cdot c_2 + c_3 \cdot t^{c_4}}{c_2 + t^{c_4}}$ [°C]; mit t in min	
Ungeschützter Stahlbauteile Kurvenparameter: Profilmfaktor $\left(\frac{A_m}{V}\right)$ [m ⁻¹]	bekleidete Stahlbauteile Kurvenparameter: $\left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right) \left[\frac{W}{m^3K}\right]$
$c_1 =$	20°C
$c_2 =$	$15780 \cdot \left(\frac{A_m}{V}\right)^{-1,13}$ $47827 \cdot \left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right)^{-0,7517}$ für: $100 \leq \frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p} \leq 400$ $133685 \cdot \left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right)^{-0,9233}$ für: $400 < \frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p} \leq 2000$
$c_3 =$	$\frac{10000}{0,3 + 1,896 \cdot \ln\left(\frac{A_m}{V}\right)}$ $286,23 \cdot \ln\left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right) - 421,87$ für: $100 \leq \frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p} \leq 400$ $-0,1755 \cdot \left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right) + 1363,3$ für: $400 < \frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p} \leq 1500$ 1100 für: $1500 < \frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p} \leq 2000$
$c_4 =$	$1,248 + 0,069 \cdot \ln\left(\frac{A_m}{V}\right)$ $-8,368 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right)^3 + 2,696 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right)^2$ $-0,00019 \cdot \left(\frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p}\right) + 1,22268$
Gültigkeitsgrenzen:	
Kurvenparameter: $25 \text{ m}^{-1} \leq A_m/V \leq 300 \text{ m}^{-1}$	$100 \frac{W}{m^3K} \leq \frac{A_p \cdot \lambda_p}{V \cdot d_p} \leq 2000 \frac{W}{m^3K}$
Branddauer: $t \leq 30 \text{ min}$	$t \leq 120 \text{ min}$
Stahltemperatur:	$\theta_a \leq 700^\circ\text{C}$

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

Beim θ_{cr} -Verfahren wird nachgewiesen, dass die unter Kap. 4.4.2 errechneten Stahltemperaturen, die für eine geforderte Feuerwiderstandsdauer (R-Klasse) oder für eine äquivalente Branddauer ermittelt wurden, unterhalb den kritischen Stahltemperaturen bleiben. Letztere können in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad nach Gl 4-17 (s. Bild 4-9) einfach bestimmt werden.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4-17)$$

Der Ausnutzungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis von Einwirkungen und Tragwiderstand zu Beginn der Brandbelastung ($t=0$):

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,t=0}} = \frac{\eta_{fi}}{\gamma_{M,20^{\circ}\text{C}}} = \frac{\eta_{fi}}{1,1} \quad (4-18)$$

Auf der sicheren Seite liegend darf dieser Ausnutzungsgrad mit $\eta_{fi} = 0,65$ (s. Kap. 4.2.2) zu $\mu_0 = 0,59$ angesetzt werden. Dabei ergibt sich eine kritische Stahltemperatur von 557°C .

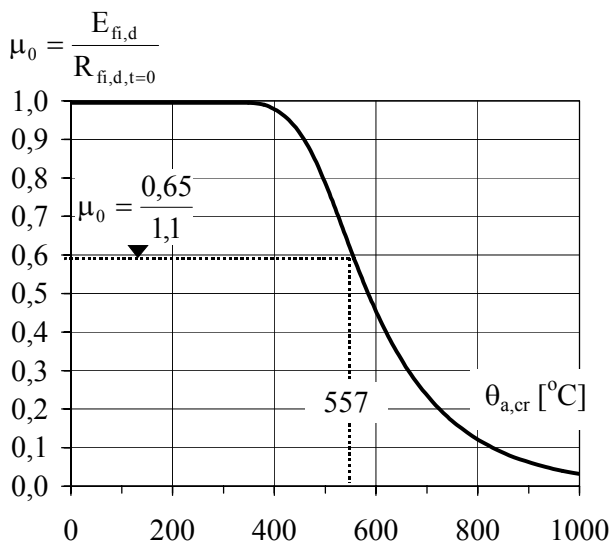


Bild 4-9 Kritische Stahltemperaturen in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad μ_0

4.4.4 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. 4.4.2, 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. 4-7) ermittelt werden. Im Folgenden wird am Beispiel des Nachweises für zentrisch gedrückte Stützen die Tragfähigkeit unter der Bemessungs-Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ angegeben:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi}}{\kappa(=1,2)} \cdot N_{pl,\theta_{a,max},Rd} = \frac{\chi_{fi}}{1,2} \cdot \frac{A \cdot f_{ay,20^{\circ}\text{C}} \cdot k_{y,\theta_{a,max}}}{\gamma_{M,fi}(=1,0)} \quad (4-19)$$

Tab. 4-7: 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 Ver- bunddeckenplatte	1,0*)
	statisch unbestimmte Träger	allseitig	0,8
		dreiseitig mit Beton- oder Ver- bunddeckenplatte	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 $k_{y,\theta}$ (s. Bild 4-3) zu berücksichtigen. Der Abminderungsfaktor χ wird aus dem bezogenen Schlankheitsgrad mit der Knickspannungskurve c (im Brandfall immer c) nach EC3-1-1 bestimmt. Bei dem Schlankheitsgrad wird die temperaturbedingte Verminderung von Streckgrenze und E-Modul näherungsweise durch den Faktor 1,2 berücksichtigt (vgl. NAD zum EC3-1-2):

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \cdot 1,2 \tag{4-20}$$

Günstig darf ggfs. eine kleinere Knicklänge im Brandfall nach Bild 4-10 angesetzt werden. Schlussendlich wird in Gl. 4-19 noch der Anpassungsfaktor $\kappa = 1,2$ nach Tab. 4-7 berücksichtigt.

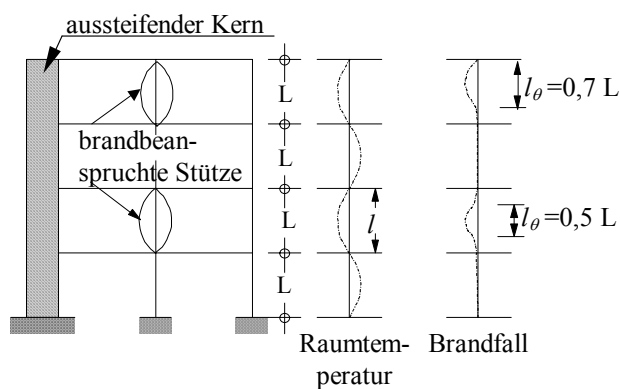


Bild 4-10 Knicklängen im Brandfall in aussteiften Rahmentragwerken

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die brandschutztechnischen Nachweise für Stahlbauten werden durch die aktuelle Normenentwicklung nachhaltig verändert. Hier sind insbesondere die Muster-Industriebaurichtlinie und die heißen Eurocodes aber auch die geplante Neufassung der Musterbauordnung zu nennen.

Im Industriebau und in Ansätzen auch in der zukünftigen MBO werden die Anforderungen an den Feuerwiderstand den jeweiligen Verhältnissen angepasst. Dadurch werden im Vergleich zur Vergangenheit vielfach geringere Anforderungen gestellt. Im Industriebau werden insbesondere bei eingeschossigen Hallen in den meisten Fällen ungeschützte Stahlbauteile zum Einsatz kommen können. Beim Brandschutz der Bauteile hält der rechnerische Nachweis analog zum Standsicherheitsnachweis bei Normaltemperatur über die heißen Eurocodes Einzug. Die für den Brandschutz erforderlichen passiven Maßnahmen lassen sich auf dieser Grundlage im Sinne einer Bemessung optimieren.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick, wie nach den „heißen Eurocodes“ die Einwirkungen im Brandfall ermittelt werden. Darüber hinaus werden die Verfahren dargestellt, mit denen die Beanspruchbarkeiten von Stahlbauteilen im Brandfall berechnet werden können. Dazu werden ausgearbeitete Zahlenbeispiele angegeben.

Die vorliegenden Brandschutzteile der Eurocodes sind als Europäische Vornormen parallel zu den nationalen Vorschriften gültig. Bereits in wenigen 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.

Schadensstatistiken belegen unzweifelhaft, dass etwa 80% der Brandopfer durch Rauchvergiftung und vorrangig in der Schwelbrandphase gestorben sind. Der stille Tod überrascht die Opfer überwiegend nachts im Schlaf. Wirkungsvolle Maßnahmen zur Erhöhung der Brandsicherheit müssen daher in erster Linie den Schutz der Bewohner vor Brandrauch betreffen. Die nach Landesbauordnung geforderte Feuerbeständigkeit der Bauteile hilft hier wenig oder gar nicht. Im Gegenteil wiegt die Erfüllung gesetzlicher Vorschriften Bauherren, Planer und Bewohner in Sicherheit und verhindert die Sensibilisierung für wirksame Maßnahmen. Die Feuerwehren unterstützen daher seit über zwei Jahren Kampagnen, die sich für den Einbau von Wohnungsrauchmeldern engagieren. Der Einbau dieses preisgünstigen, lebensrettenden Frühwarnsystems geschieht in Deutschland zur Zeit noch freiwillig. In Skandinavien, England und den USA haben gesetzliche Forderungen bereits zu hohen Installationsraten geführt und die Anzahl der Brandtoten drastisch verringert.

Aus Wettbewerbsgründen ist für den Stahlbau die Kompensation passiver Brandschutzmaßnahmen durch anlagentechnischen und organisatorischen Brandschutz, wie sie bei Industriebauten und anderen Sonderbauten regelmäßig bei der Erarbeitung sogenannter Brandschutzkonzepte auf der Basis natürlicher Brände ermöglicht wird, ein Aspekt, der zukünftig immer größere Bedeutung gewinnt. International wird diese Option mit dem Begriff *Performance Based Fire Design* bezeichnet. SCHLEICH hat in [16] auf der Basis eines europäischen Forschungsprojektes ein *Natural Fire Safety Concept* (Naturbrandkonzept) vorgestellt. Zur Zeit wird eine DASt-Richtlinie entworfen, die die Umsetzung von Naturbrandkonzepten für bestimmte Anwendungsbereiche (z.B. im Büro- und Verwaltungsbau), die für den Stahlbau besonders interessant sind, beinhaltet.

Die Entwicklung der ingenieurmäßigen Berechnungsverfahren im vorbeugenden baulichen Brandschutz wirkt als Katalysator auch auf die Entwicklung im Bereich der Verbesserung des Feuerwiderstandes von Stahlbauteilen. So wird einerseits unter dem Stichwort feuerresistenter Stahl an speziellen Baustahllegierungen gearbeitet, die höhere Versagenstemperaturen aufweisen, andererseits werden Brandschutzbekleidungen, insbesondere

Dämmschichtbildner, entwickelt, die kostengünstiger als bisherige Lösungen sind.

Zusammenfassend ist zu erwarten, dass sich die Rahmenbedingungen für die Stahlbauweise auch unter Wahrung des erforderlichen Sicherheitsniveaus für den baulichen Brandschutz günstig entwickeln.

Dank

Meinen Mitarbeitern, den Herren Dipl.-Ing. Heise, Hothan, Nernheim und Upmeyer, danke ich für ihre Mitwirkung an diesem Beitrag.

6 Literatur

6.1 Normen und Richtlinien

- [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, mit DIN-Fachbericht 91
Nationales Anwendungsdokument (NAD) - Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2:1997-05, 2000
- [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, mit DIN-Fachbericht 93
Nationales Anwendungsdokument (NAD) - Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1993-1-2: 1997 -05, 2000
- [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, mit DIN-Fachbericht 94
Nationales Anwendungsdokument (NAD) - Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1994-1-2:1997-06, 2000
- [4] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau, Deutsches Institut für Bautechnik „Mitteilungen“, Ernst&Sohn, Berlin, 2000

- [5] DIN 18230-1, Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer, Beuth Verlag, Berlin, 05.1998
- [6] DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Ausgabe 09.77
- [7] DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile, Ausgabe 03.94

6.2 Veröffentlichungen

- [9] Brandschutzbemessung: Eurocode 1 bis 6 und 9; Normen; Nationale Anwendungsdokumente (NAD), Bauen in Europa, Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [10] Fontana, M.: Brandsicherheit von Stahlverbundtragwerken, Stahlbaukalender 2000, S. 565-607, Ernst&Sohn, 2000
- [11] Halfkann, K.-H.; Heinemeyer, C.; Schumann, P.; Stöber, W.; Upmeyer, J.: Brandschutz im Stahlbau nach Musterbauordnung, Empfehlungen des DSTV-Arbeitsausschusses Brandschutz, Deutscher Stahlbau-Verband, Düsseldorf, 2. Auflage, August 2000
www.stahlbau.uni-hannover.de
- [12] Ridurit-Feuerschutzplatten - Thermische Werkstoffkennwerte von Ridurit-Feuerschutzplatten für die brandschutztechnische Bemessung nach EC3-1-2 (DIN ENV 1993-1-2); Gutachterliche Stellungnahme des Instituts für Stahlbau der Universität Hannover für die Rigips GmbH, Okt. 2000
- [13] EKS N°89, Feuerwiderstand von Bauteilen aus Stahl (Euro-Nomogramm), 1995
- [14] EKS N°92, Explanatory Document for ECCS N°89 „Euro-Nomogramm“ Fire Resistance of Steel Structures, Brüssel, 1996
- [15] Schumann, P.: Brandschutznachweise für ungeschützte Stahlkonstruktionen - Näherungsformeln für die Erwärmung nach ETK, BundesBauBlatt, Heft 7, S. 69 bis 71, 1999
- [16] Schleich, J.-B.: Globales Brandsicherheitskonzept, Stahlbau 67, Heft 2, S. 81 bis 96, 1998

7 Formelzeichen

A_m	beflammte Oberfläche des ungeschützten Stahlbauteils bezogen auf die Bauteillänge	[m]	$\eta_{fi,t}$	Lastausnutzungsgrad für die Bemessung für den Brandfall	
A_p	Innenfläche der Brandschutzbekleidung bezogen auf die Bauteillänge	[m]	K1	... K4 Sicherheitskategorien	
$\frac{A_m}{V}$	Profilmfaktor des ungeschützten Stahlbauteils	[m ⁻¹]	$k_{E,0}$	Reduktionsfaktor für den E-modul	[-]
$\frac{A_p}{V}$	Profilmfaktor des bekleideten Stahlbauteils	[m ⁻¹]	$k_{y,0}$	Reduktionsfaktor für die Streckgrenze	[-]
α_c	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]	κ	Anpassungsfaktor	[-]
α_L	Zusatzbeiwert	[-]	L	Systemlänge	[m]
b	Querschnittsbreite	[mm]	ℓ	Länge oder Knicklänge	[m]
c	Umrechnungsfaktor	[min·m ² /kWh]	λ_a	Wärmeleitfähigkeit von Baustahl	[W/(m·K)]
c_a	spezifische Wärme von Stahl	[J/(kg·K)]	λ_p	Wärmeleitfähigkeit der Brandschutzbekleidung	[W/(m·K)]
c_p	spez. Wärme der Brandschutzbekleidung	[J/(kg·K)]	$\bar{\lambda}$	bezogener Schlankheitsgrad	[-]
χ	Abminderungsbeiwert	[-]	μ_0	Ausnutzungsgrad	[-]
d_p	Dicke der Brandschutzbekleidung	[m]	p	Wassergehalt der Bekleidung	[%]
Δt	Zeitintervall	[Sekunden]	q_R	rechnerische Brandbelastung	[kWh/m ²]
E_a	Elastizitätsmodul von Baustahl bei 20°C	[kN/cm ²]	$Q_{k,1}$	charakt. Wert der führenden veränderlichen Einwirkung	
$E_{a,0}$	Elastizitätsmoduls von Baustahl bei der Stahltemperatur θ_a	[kN/cm ²]	$Q_{k,i}$	charakt. Werte der anderen veränderlichen Einwirkungen, $i \geq 2$	
$E_{fi,d,t}$	Bemessungswert der Beanspruchung zum Zeitpunkt t		$\theta_{a,t}$	Stahltemperatur zum Zeitpunkt t	[°C]
ϵ_{res}	resultierender Emissionskoeffizient	[-]	$\theta_{g,t}$	Gastemperatur im Brandraum zum Zeitpunkt t	[°C]
f_y	Streckgrenze von Baustahl bei 20°C	[kN/cm ²]	θ_{cr}	kritische Stahltemperatur	[°C]
$f_{y,0}$	Streckgrenze von Baustahl bei der Stahltemperatur θ_a	[kN/cm ²]	$R_{fi,d,t}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit im Brandfall zum Zeitpunkt t	
Φ	Konfigurationsbeiwert, Hilfsgröße	[-]	ρ_a	Dichte von Baustahl	[kg/m ³]
ϕ	Hilfsgröße	[-]	ρ_p	Dichte der Brandschutzbekleidung	[kg/m ³]
G_k	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen		σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	[W/m ² K ⁴]
γ	Sicherheitsbeiwert	[-]	t	Branddauer	[min]
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen G_k	[-]	$t_{\dot{a}}$	äquivalente Branddauer	[min]
γ_{GA}	= 1,0, wie γ_G jedoch in der außergewöhnlichen Situation	[-]	V	Querschnittsfläche	[m ²]
$\gamma_{M,fi}$	Teilsicherheitsbeiwert für Werkstoffe im Brandfall	[-]	w	Wärmeabzugsfaktor	[-]
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Einwirkungen Q_k	[-]	ξ	= Q_{k1} / G_k	[-]
h	Gebäudehöhe (s. Tab 2-1)	[m]	$\psi_{1,1}$	Kombinationsbeiwert	[-]
\dot{h}_{net}	Wärmestromdichte	[W/m ²]	$\psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwert	[-]
$\dot{h}_{net,c}$	Wärmestromdichte infolge Konvektion	[W/m ²]			
$\dot{h}_{net,r}$	Wärmestromdichte infolge Strahlung	[W/m ²]			
η_{fi}	Reduktionsfaktor	[-]			

8 Beispiel - Stahlträger

8.1 Aufgabenstellung

Das Beispiel behandelt die brandschutztechnische Bemessung eines Stahlträgers in einem Geschäfts- und Warenhaus. Der Träger ist einfeldrig mit einer Stützweite von 12 m und beidseitig gelenkig gelagert. Der Träger soll der Einfachheit halber im Rahmen dieses Beispiels nicht schubfest mit der Stahlbetonplatte verbunden werden. Er ist durch Gleichstreckenlasten beansprucht und wegen der aufliegenden Platte im Brandfall als dreiseitig beflammt anzusehen. Als Brandschutzanforderung wird sowohl die Feuerwiderstandsklasse R 30 wie auch R 90 untersucht. Als Brandschutzmaßnahmen werden zwei Möglichkeiten betrachtet:

- Kastenförmige Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten
- Profilfolgende Putzbekleidung.

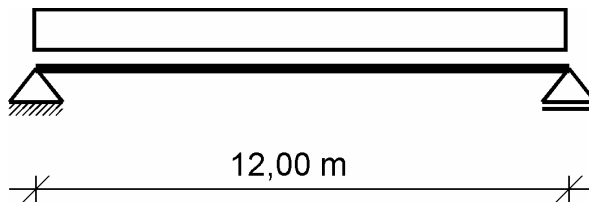


Bild 8-1: Statisches System

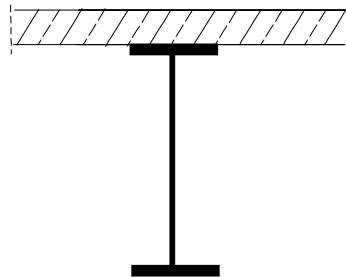


Bild 8-2 Trägerquerschnitt

Trägerquerschnitt: Walzprofil, IPE 550, S 235, Querschnittsklasse 1

Materialkennwerte: $f_{yd} = 23,5/1,1 = 21,36 \text{ kN/cm}^2$, $E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2$

Querschnittswerte: $A_a = 134 \text{ cm}^2$, $W_{pl} = 2 \cdot S_y = 2 \cdot 1390 = 2780 \text{ cm}^3$

Belastungen: ständig: $g_k = 13,60 \text{ kN/m}$
 veränderlich: $p_k = 7,50 \text{ kN/m}$

8.2 Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur

Nachweis der Biegemomenten- und Querkrafttragfähigkeit bei Raumtemperatur, Verfahren elastisch-plastisch: EC3-1-1

plastische Biegemomenten­tragfähigkeit:

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2780 \cdot 23,5 \cdot 10^{-2}}{1,1} = 594,0 \text{ kNm}$$

Querkrafttragfähigkeit:

Wirksame Schubfläche: $A_v = 1,04 \cdot h \cdot t_w = 1,04 \cdot 550 \cdot 11,1 = 6349 \text{ mm}^2$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}} = \frac{6349 \cdot 235}{1,1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 783,1 \text{ kN}$$

Nachweis:

Biegemomenten­tragfähigkeit in Feldmitte:

$$M_{Sd} = [1,35 \cdot 13,60 + 1,50 \cdot 7,50] \cdot \frac{12,00^2}{8} = 533,0 \text{ kNm} < M_{pl,Rd} = 594,0 \text{ kNm}$$

Querkrafttragfähigkeit am Auflager:

$$V_{Sd} = [1,35 \cdot 13,60 + 1,50 \cdot 7,50] \cdot \frac{12,00}{2} = 177,7 \text{ kN} < V_{pl,Rd} = 783,1 \text{ kN}$$

Der Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur ist erfüllt. Eine Momenten-Querkraft-Interaktion ist hier nicht maßgebend.

8.3 Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall

8.3.1 Einwirkungen im Brandfall

Hinsichtlich der mechanischen Einwirkungen im Brandfall gelten die Kombinationsregeln für außergewöhnliche Einwirkungen:

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

Dabei ist für den Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in der außergewöhnlichen Situation $\gamma_{GA} = 1,0$ zu setzen. Der Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1}$ für die führende veränderliche Last ergibt sich für Geschäfts- und Warenhäuser zu 0,8.

Beanspruchungen im Brandfall:

Biegemoment in Feldmitte:

$$M_{fi,d} = [1,0 \cdot 13,6 + 0,8 \cdot 7,5] \cdot \frac{12,0^2}{8} = 352,8 \text{ kNm}$$

Querkraft am Auflager:

$$V_{fi,d} = [1,00 \cdot 13,60 + 0,8 \cdot 7,50] \cdot \frac{12,00}{2} = 117,6 \text{ kN}$$

Die Brandbeanspruchung ergibt sich aus den Anforderungen der Feuerwiderstandsklasse R 30 bzw. R 90 zu 30 bzw. 90 Minuten Branddauer nach der Einheits-Temperaturzeitkurve.

8.3.2 Berechnung der Stahltemperaturen

Zur Berechnung der Erwärmung des bekleideten Stützenquerschnitts wird das Berechnungsverfahren nach EC3-1-2 angewendet. Danach ergibt sich der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ eines bekleideten Stahlbauteils nach Gl. 4-14.

EC1-2-2 [1]

EC1-2-2 [1]
und NAD

Abschnitt 4.2.5.2

EC3-1-2 [2]

Berechnet werden die Erwärmungsverläufe für das bekleidete Trägerprofil IPE 550 in Abhängigkeit der Branddauer. Dies erfolgt mit Hilfe eines kleinen Rechenprogramms in Excel®.

Die rechnerischen Bekleidungsdicken d werden zunächst in Anlehnung an die bisherigen Regelungen der DIN 4102 Teil 4 angenommen. Die thermischen Materialkennwerte entsprechen dem NAD (s. Tabelle 4-3), wobei der Feuchtigkeitsgehalt konservativ zu Null angenommen wurde. Der Profilmfaktor ist als Verhältnis von brandbeanspruchter Oberfläche A_p zum Volumen V des Stahlbauteiles definiert. Beispiele für die Ermittlung des Profilmfaktors bei I-Profilen zeigt Tabelle 4-4.

Profilmfaktor für Bekleidung mit GKF-Platten:

$$A_p/V = (2 \cdot 55 + 21) / 134 \cdot 10^2 = 98 \text{ m}^{-1}$$

Profilmfaktor für Bekleidung mit Putz:

$$A_p/V \approx (2 \cdot 55 + 3 \cdot 21 - 2 \cdot 1,11) / 134 \cdot 10^2 = 128 \text{ m}^{-1}$$

Tabelle 8-1: Gewählte Bekleidungsdicken d [mm] in Abhängigkeit von der Art der Bekleidung und der angestrebten Feuerwiderstandsklasse

DIN 4102-4 [7]
Tab. 90 und Tab. 92

	R 30	R 90
GKF-Platte nach DIN 18180: DIN 4102-4 / Tab. 92 $A_p/V = 98 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 12,5 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 2 \cdot 15 = 30 \text{ mm}$
Putz IVa/IVb nach DIN 18850-2 DIN 4102-4 / Tab. 90 $A_p/V = 128 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 5 \text{ mm}$ $D_{\text{ges}} = 5 + 10 = 15 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 15 \text{ mm}$ $D_{\text{ges}} = 15 + 10 = 25 \text{ mm}$

Bei den Putzbekleidungen ergibt sich die tatsächliche Dicke D_{ges} aus der rechnerischen Dicke d zuzüglich eines konstruktiven Zuschlages (s. NAD [2]); $\min D_{\text{ges}} \geq 15\text{mm}$.

Ergänzend wird in den Beispielrechnungen jeweils noch der Erwärmungsverlauf für eine Bekleidungsdicke von $d = 20 \text{ mm}$ berechnet.

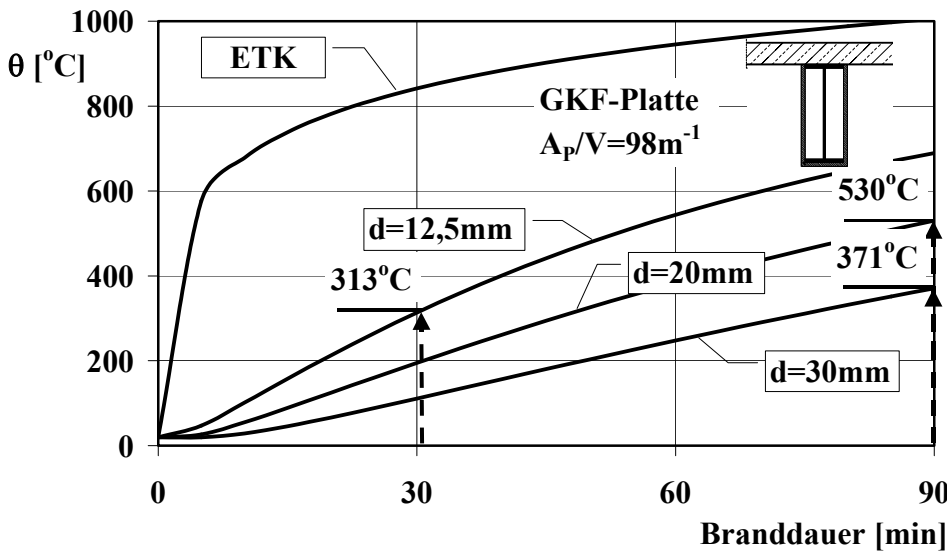


Bild 8-3: Erwärmungskurven für den Trägerquerschnitt mit GKF-Platten, Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung

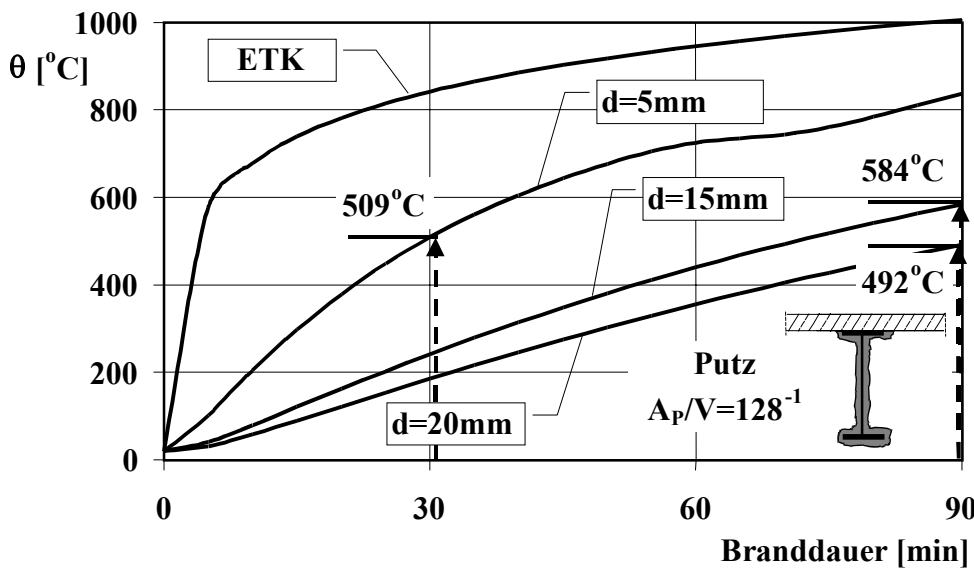


Bild 8-4: Erwärmungskurven für den Trägerquerschnitt mit Putz
 Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung

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

Beim Nachweis auf Temperaturebene ist nachzuweisen, dass die höchste im Brandfall auftretende Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ unterhalb der kritischen Stahltemperatur θ_{cr} bleibt. Die kritische Stahltemperatur θ_{cr} ergibt sich in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad. Der Ausnutzungsgrad μ_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ darf wie folgt bestimmt werden:

Abschn. 4.2.4

über Einwirkungen und Widerstände:
$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Abschn. 4.2.4 (4)

oder

Abschn. 4.2.4 (5)

über den Abminderungsfaktor η_{fi} :
$$\mu_0 = \eta_{fi} \cdot \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M} = \eta_{fi} \cdot \frac{1,0}{1,1}$$

In diesem Beispiel ergibt sich der Ausnutzungsgrad aus den Biegemomenten des Trägers:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{M_{fi,d}}{M_{fi,Rd,0}}$$

Das im Brandfall wirkende Biegemoment $M_{fi,d} = 352,8 \text{ kNm}$ ist aus Kapitel 8.3.1 bekannt. Die Biegemomentenragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt $t=0$ ist zu ermitteln.

$$M_{fi,Rd,0} = W_{pl} \cdot f_y \cdot k_{y,\theta,max} \cdot \frac{1}{\gamma_{M,fi}}$$

mit $k_{y,\theta,max} = 1,0$ für $\Theta = 20^\circ\text{C}$

zum Zeitpunkt $t = 0$; wobei der Materialteilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi} = 1,0$ gesetzt wird.

Biegemomentenragfähigkeit:

$$M_{fi,20^\circ\text{C},Rd} = W_{pl} \cdot f_y \cdot \frac{1}{\gamma_{M,fi}} = 2780 \cdot 23,5 \cdot \frac{1}{1,0 \cdot 100} = 653,3 \text{ kNm}$$

Ausnutzungsgrad:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{352,8}{653,3} = 0,54$$

Die kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$ ergibt sich zu:

$$\begin{aligned}\theta_{a,cr} &= 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \\ &= 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,540^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 572^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Die maximal auftretende Bauteiltemperatur muss unterhalb der kritischen Temperatur von 572°C bleiben, um die geforderte Feuerwiderstandsklasse zu gewährleisten. Aus den Erwärmungsberechnungen in Kap. 8.3.2 (s. Bilder 8-3 und 8-4) ergibt sich folgende Stahltemperatur für die Bemessung:

$$\theta_{a,max} = 530^\circ\text{C} \text{ (R 90, GKF-Platten } d=20 \text{ mm).}$$

Der Brandschutznachweis ist mit

$$\theta_{a,max} = 530^\circ\text{C} < \theta_{a,cr} = 572^\circ\text{C} \checkmark$$

sowohl für die GKF-Plattenbekleidung als auch für die Putzbekleidung mit den jeweiligen Bekleidungsstärken in den Feuerwiderstandsklassen R 30 und R 90 erfüllt. Für die 15mm dicke Putzbekleidung ist der Nachweis für die Feuerwiderstandsklasse R 90 nicht erbracht, da die maximale Bauteiltemperatur

$$\theta_{a,max} = 584^\circ\text{C} \text{ größer als die kritische Temperatur ist.}$$

Abschnitt 4.2.4 (2)

8.3.4 Nachweis auf Tragfähigkeitsebene

Beim Nachweis auf Tragfähigkeitsebene wird im Brandfall der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

Im vorliegenden Beispiel ist der Nachweis für die Biegemomente in dem Träger zu führen:

$$M_{fi,d} \leq M_{b,fi,Rd,t}$$

Das im Brandfall wirkende Biegemoment $M_{fi,d} = 352,8 \text{ kNm}$ ist aus Kap. 1.3.1 bekannt.

Die Biegemomententragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt t ist in Abhängigkeit von den dann herrschenden Stahltemperaturen zu ermitteln.

Für die Bemessung wird die maximale Stahltemperatur maßgebend. Die maximal auftretende Bauteiltemperatur für den bekleideten Träger ist $\theta_{a,max} = 530^\circ\text{C}$; s. dazu die Erwärmungsverläufe in Bild 8-3 und 8-4 für die Bekleidungsstärken nach Tabelle 8-1. Die Biegemomententragfähigkeit unter erhöhter Temperatur ergibt sich aus:

$$M_{fi,90,Rd} = M_{pl,Rd,20^\circ\text{C}} \cdot k_{y,530^\circ\text{C}} \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} \cdot \frac{1}{\kappa_1 \cdot \kappa_2}$$

Der Einfluss der erhöhten Stahltemperatur auf die Festigkeitseigenschaften von Baustahl ist in Bild 4-3 verdeutlicht.

In Abhängigkeit von $\theta_{a,max}$ werden die Abminderungsfaktoren $k_{y,\theta}$ und $k_{E,\theta}$ (linear interpoliert) abgelesen:

$$k_{y,530^\circ\text{C}} = 0,69 \quad k_{E,530^\circ\text{C}} = 0,51$$

Es ergeben sich für $\theta_a = 530^\circ\text{C}$ folgende Materialkennwerte:

$$f_{y,530^\circ\text{C}} = k_{y,530^\circ\text{C}} \cdot f_y = 0,69 \cdot 23,5 = 16,2 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Abschn. 2.4.2 (2)

Abschn. 4.2.3.3 (3) und (4)

siehe auch Tabelle 3.1

$$E_{a,530^{\circ}\text{C}} = k_{E,530^{\circ}\text{C}} \cdot E = 0,51 \cdot 21000 = 10710 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Der Einfluss der Lagerungsbedingungen und der ungleichförmigen Temperaturverteilung über den Querschnitt wird durch die Anpassungsfaktoren κ nach Tab. 4-7 berücksichtigt. Der Träger ist an den Auflagern statisch bestimmt gelagert und liegt unter der Stahlbetonplatte (dreiseitig beflammt). Der Anpassungsfaktor ist daher:

$$\kappa = 1,0$$

$$M_{fi,90,Rd} = M_{pl,Rd,20^{\circ}\text{C}} \cdot k_{y,530^{\circ}\text{C}} \frac{\gamma_{M,1}}{\gamma_{M,fi}} \cdot \frac{1}{\kappa} = 594,0 \cdot 0,69 \cdot \frac{1,1}{1,0} \cdot \frac{1}{1,0} = 450,8 \text{ kNm}$$

Nachweis:

$$M_{fi,d} = 352,8 \text{ kNm} \leq 450,8 \text{ kNm} = M_{b,fi,Rd,d}$$

Der Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall ist erbracht.

Abschn.4.2.3.3 (3)
und NAD

9 Beispiel - Stahlstütze

9.1 Aufgabenstellung

In dem folgenden Beispiel wird die brandschutztechnische Bemessung einer Stahlstütze in einem Geschäfts- und Warenhaus gezeigt. Es handelt sich um eine Stütze in einem ausgesteiften Rahmentragwerk, die biegesteif an die darüber bzw. darunter liegenden Stützen angeschlossen ist. Die geometrische Länge beträgt 3,0 m. Unter den genannten Bedingungen darf die Knicklänge im Brandfall halbiert werden (vgl. Bild 4-10). Die Stütze ist durch eine zentrische Normalkraft belastet. Die Brandbeanspruchung der Stütze erfolgt von vier Seiten. Als Brandschutzanforderung wird sowohl die Feuerwiderstandsklasse R 30 wie auch R 90 untersucht.

Als Brandschutzmaßnahmen werden zwei Möglichkeiten betrachtet:

- Kastenförmige Bekleidung aus Gipskarton-Feuerschutzplatten
- Profilfolgende Putzbekleidung.

Stützenquerschnitt: Walzprofil HE 300 B, S 235, Querschnittsklasse 1

Materialkennwerte: $f_{y,d} = f_y / \gamma_{M0} = 23,5 / 1,1 = 21,36 \text{ kN/cm}^2$
 $E_a = 21000 \text{ kN/cm}^2$

Querschnittswerte: $A_a = 149 \text{ cm}^2$, $I_a = 8560 \text{ cm}^4$ (schwache Achse)

Systemhöhe: $L = 3,0 \text{ m}$

Normalkräfte in der Stütze:

ständig: $G_k = 1200 \text{ kN}$

veränderlich: $P_k = 600 \text{ kN}$

9.2 Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur

Normalkrafttragfähigkeit bei Raumtemperatur für Biegeknicken um die schwache Achse: EC3-1-1

plastischer Normalkraftwiderstand:

$$N_{pl,Rd} = A_a \cdot f_y / \gamma_{M0} = 149 \cdot 23,5 / 1,1 = 3183 \text{ kN}$$

Knicklänge:

$$L_{Kz} = \beta \cdot L = 1,0 \cdot 300 = 300 \text{ cm}$$

bezogener Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{Kz}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{300}{7,58 \cdot 93,9} = 0,42$$

Reduktionsfaktor χ nach der Knickspannungskurve c (schwache Achse, $\alpha = 0,49$):

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,64 + \sqrt{0,64^2 - 0,42^2}} = 0,89$$

mit

$$\Phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49(0,42 - 0,2) + 0,42^2 \right] = 0,64$$

Normalkrafttragfähigkeit:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot \beta_A \cdot A \cdot f_y / \gamma_{M1} = 0,89 \cdot 1,0 \cdot 149 \cdot 23,5 / 1,1 = 2833 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$N_{sd} = 1,35 \cdot 1200 + 1,50 \cdot 600 = 2520 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 2833 \text{ kN}$$

Der Tragfähigkeitsnachweis bei Raumtemperatur ist erfüllt.

9.3 Tragfähigkeitsnachweise im Brandfall

9.3.1 Einwirkungen im Brandfall

Hinsichtlich der mechanischen Einwirkungen im Brandfall siehe Kapitel 4.2.2. Dabei ist für den Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in der außergewöhnlichen Situation $\gamma_{GA} = 1,0$ zu setzen. Der Kombinationsbeiwert $\psi_{1,1}$ für die führende veränderliche Last ergibt sich für Geschäfts- und Warenhäuser zu 0,8.

Normalkraft im Brandfall:

$$N_{fi,d} = 1,0 \cdot 1200 + 0,8 \cdot 600 = 1680 \text{ kN}$$

Die Brandbeanspruchung ergibt sich aus den Anforderungen der Feuerwiderstandsklasse R 30 bzw. R 90 zu 30 bzw. 90 Minuten Branddauer nach der Einheits-Temperaturzeitkurve.

9.3.2 Berechnung der Stahltemperaturen

Zur Berechnung der Erwärmung des bekleideten Stützenquerschnitts wird das Berechnungsverfahren nach EC3-1-2 angewendet. Das Berechnungsverfahren ist in Kapitel 4.4.2 bereits erläutert worden.

Berechnet werden die Erwärmungsverläufe für das bekleidete Stützenprofil HE-300-B. Sie sind in den Bildern 9-1 und 9-2 dargestellt. Die rechnerischen Bekleidungsstärken d werden zunächst in Anlehnung an die bisherigen Regelungen angenommen. Die thermischen Materialkennwerte entsprechen dem NAD [2] (s. Tabelle 4-3), wobei der Feuchtigkeitsgehalt konservativ zu Null angenommen wurde.

EC1-2-2 [1]

Abschn. 4.2.5.2 (1)

EC3-1-2 [2]

Tabelle 9-1: Gewählte Bekleidungsstärken d [mm] in Abhängigkeit von der Art der Bekleidung und der angestrebten Feuerwiderstandsklasse

	R 30	R 90
GKF-Platte nach DIN 18180: DIN 4102-4 / Tab. 95 $A_p/V = 81 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 12,5 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 3 \cdot 15 = 45 \text{ mm}$
Putz IVa/IVb nach DIN 18850-2 DIN 4102-4 / Tab. 94 $A_p/V = 116 \text{ m}^{-1}$	$\Rightarrow d = 10 \text{ mm}$ $D_{\text{ges}} = 10 + 5 = 15 \text{ mm}$	$\Rightarrow d = 35 \text{ mm}$ $D_{\text{ges}} = 35 + 5 = 40 \text{ mm}$

Bei den Putzbekleidungen ergibt sich die tatsächliche Dicke D_{ges} aus der rechnerischen Dicke d zuzüglich eines konstruktiven Zuschlages (s. NAD) ; $\text{min } D_{\text{ges}} \geq 15 \text{ mm}$.

DIN 4102-4 Tab. 94 bzw. Tab. 95

Ergänzend wird in den Beispielrechnungen jeweils noch der Erwärmungsverlauf für eine Bekleidungsstärke von $d = 20 \text{ mm}$ berechnet.

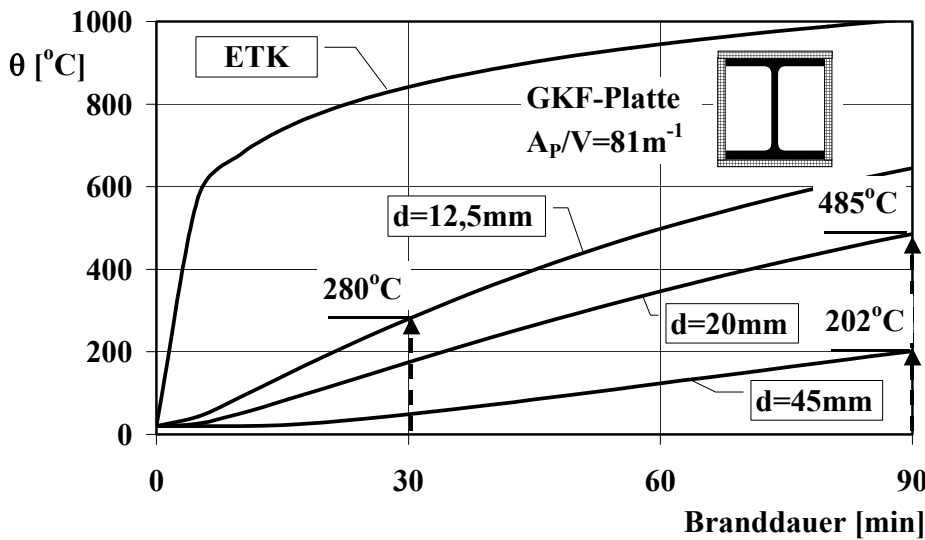


Bild 9-1: Erwärmungskurven für den Stützenquerschnitt mit GKF-Platten, Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung

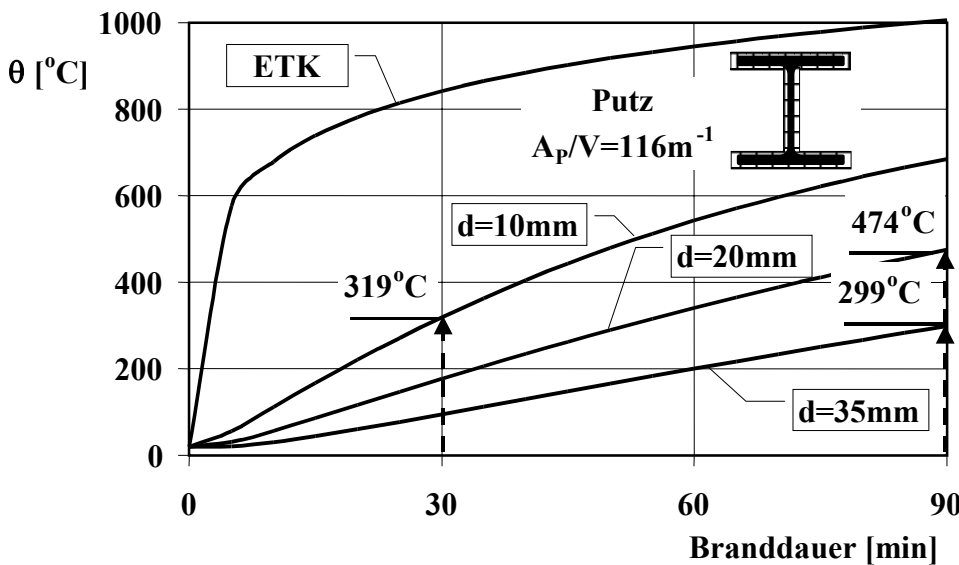


Bild 9-2: Erwärmungskurven für den Stützenquerschnitt mit Putz,

Kurvenparameter: Dicke der Bekleidung

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

Beim Nachweis auf Temperaturebene ist nachzuweisen, dass die höchste im Brandfall auftretende Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ unterhalb der kritischen Stahltemperatur θ_{cr} bleibt. Die kritische Stahltemperatur θ_{cr} ergibt sich in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad (siehe Kapitel 4.4.3).

über Einwirkungen und Widerstände: $\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$

oder

über den Abminderungsfaktor η_{fi} : $\mu_0 = \eta_{fi} \cdot \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M} = \eta_{fi} \cdot \frac{1,0}{1,1}$

In diesem Beispiel ergibt sich der Ausnutzungsgrad aus den Normalkräften der Stütze

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{N_{fi,d}}{N_{b,fi,Rd,0}}$$

Die im Brandfall wirkende Normalkraft $N_{fi,d} = 1680$ kN ist aus Kapitel 9.3.1 bekannt. Die Normalkrafttragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt $t=0$ ist zu ermitteln:

$$N_{b,fi,Rd} = \frac{\chi_{fi}}{1,2} \cdot A \cdot k_{y,\theta,max} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}$$

mit $k_{y,\theta,max} = 1,0$ für $\theta = 20^\circ\text{C}$ zum Zeitpunkt $t = 0$

wobei der Materialteilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi} = 1,0$ gesetzt wird.

Die Knicklänge ergibt sich im Brandfall zu (vgl. Bild 4-10):

$$L_{fi} = 0,5 \cdot L = 0,5 \cdot 300 = 150 \text{ cm}$$

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_{fi,0} = \frac{L_{fi}}{(i_z \cdot \lambda_1)} = \frac{150}{7,58 \cdot 93,9} = 0,21$$

Unabhängig vom Querschnittstyp und der Knickrichtung wird im Brandfall stets die Knickspannungslinie c maßgebend. Abminderungsbeiwert χ für das Biegeknicken nach der Knickspannungskurve c (schwache Achse, $\alpha = 0,49$, siehe auch Bild 9.-3):

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

$$= \frac{1}{0,52 + \sqrt{0,52^2 - 0,21^2}} = 1,0$$

$$\text{mit } \Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,21 - 0,2) + 0,21^2] = 0,52$$

Abschn. 4.2.4

Abschn. 4.2.4 (4)

Abschn. 4.2.4 (5)

Abschn. 4.2.3.2 (1)

Abschn. 4.2.3.2 (4)

Abschn. 4.2.3.2 (2)

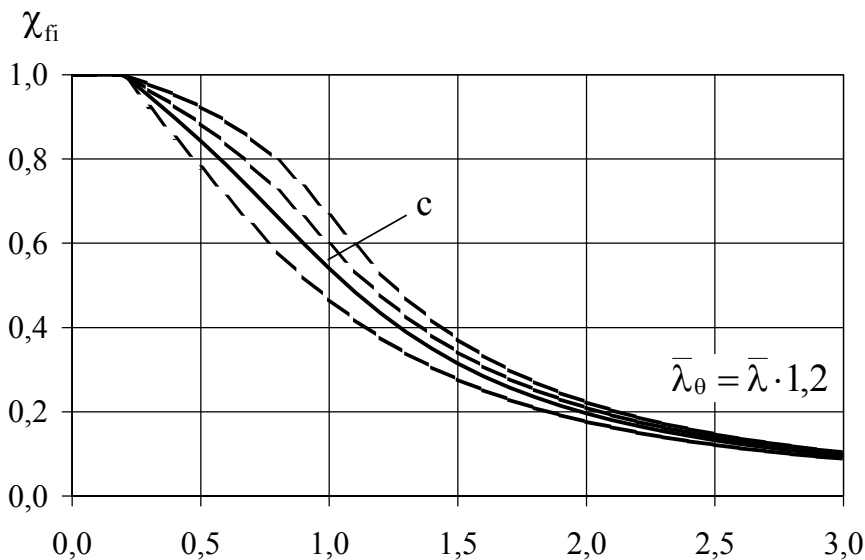


Bild 9-3: Knickspannungskurve im Brandfall (Kurve c)

Normalkrafttragfähigkeit: $N_{b,fi,Rd,0} = \frac{1,0}{1,2} \cdot 149 \cdot \frac{23,5}{1,0} = 2918 \text{ kN}$

Ausnutzungsgrad: $\mu_0 = \frac{N_{fi,d}}{N_{b,fi,Rd,0}} = \frac{1680}{2918} = 0,58$

Die kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$ ergibt sich zu:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,58^{3,833}} - 1 \right] + 482 = 560 \text{ }^\circ\text{C}$$

Die maximal auftretende Bauteiltemperatur muss unterhalb der kritischen Temperatur von 560°C bleiben, um die geforderte Feuerwiderstandsklasse zu gewährleisten. Aus den Erwärmungsberechnungen in Kapitel 9.3.2 (s. Bildern 9-1 und 9-2) ergibt sich als höchste Stahltemperatur für die in Tab. 9-1 gewählten Parameter: $\theta_{a,max} = 319^\circ\text{C}$ (R 30, Putzbekleidung d= 10mm).

Der Brandschutznachweis ist mit

$$\theta_{a,max} = 319^\circ\text{C} < \theta_{a,cr} = 560^\circ\text{C} \checkmark$$

sowohl für die GKF-Plattenbekleidung als auch für die Putzbekleidung mit den jeweiligen Bekleidungsstärken in den Feuerwiderstandsklassen R 30 und R 90 erfüllt.

Abschn. 4.2.4 (4)

Abschn. 4.2.4 (2)

9.3.4 Nachweis auf Tragfähigkeitsebene

Beim Nachweis auf Tragfähigkeitsebene wird im Brandfall der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit geführt:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t}$$

Im vorliegenden Beispiel ist der Nachweis für die Normalkräfte in der Stütze zu führen:

$$N_{fi,d} \leq N_{b,fi,Rd,t}$$

Die im Brandfall wirkende Normalkraft $N_{fi,d} = 1680 \text{ kN}$ ist aus Kapitel 9.3.1 bekannt. Die Normalkrafttragfähigkeit im Brandfall zum Zeitpunkt t ist in Abhängigkeit von den dann herrschenden Stahltemperaturen zu ermitteln. Für die Bemessung wird die maximale Stahltemperatur maßgebend. Die maximale auftretende Bauteiltemperatur für die bekleidete Stütze ist $\theta_{a,max} = 319^\circ\text{C}$; s. dazu die Erwärmungsverläufe in Bild 9-1 und 9-2 für die Bekleidungsstärken nach Tabelle 9-1.

Abschn. 2.4.2 (2)

EC3-1-2 [2]

Die Normalkrafttragfähigkeit unter erhöhter Temperatur ergibt sich aus: Abschn. 4.2.3.2 (1)

$$N_{b,fi,Rd,\theta_{a,max}} = \frac{\chi_{fi,0}}{1,2} \cdot A \cdot \frac{f_{y,0}}{\gamma_{M,fi}}$$

Die Normalkrafttragfähigkeit (Knicken um die schwache Achse) wird unter Berücksichtigung des bezogenen Schlankheitsgrades ermittelt:

Knicklänge: $l_{fi} = 150 \text{ cm}$

Schlankheit: $\bar{\lambda}_{fi,0} = 0,21$

$$\bar{\lambda}_{fi,\theta} = \bar{\lambda}_{fi,0} \cdot 1,2 = 0,21 \cdot 1,2 = 0,25$$

Abschn. 4.2.3.2 (2)

Abminderungsfaktor $\chi_{fi,\theta}$ nach Knickspannungskurve c :

Abschn. 4.2.3.2(2)

$$\chi_{fi,\theta} = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,54 + \sqrt{0,54^2 - 0,25^2}} = 0,98$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \Phi &= 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \\ &= 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,25 - 0,2) + 0,25^2] = 0,54 \end{aligned}$$

Normalkrafttragfähigkeit:

Abschn. 4.2.3.2(1)

$$N_{b,fi,Rd,\theta_{a,max}} = \frac{\chi_{fi,0}}{1,2} \cdot A \cdot \frac{f_{y,0}}{\gamma_{M,fi}} = \frac{0,98}{1,2} \cdot 149 \cdot \frac{23,5}{1,0} = 2860 \text{ kN}$$

Nachweis:

$$N_{fi,d} = 1680 \text{ kN} \leq 2860 \text{ kN} = N_{b,fi,Rd,0} \quad \checkmark$$

Der Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall ist erbracht.

