

Nomogramme für die Berechnung des Feuerwiderstandes von Stahlbauteilen gemäß DIN EN 1993-1-2:2005

## 1 Einleitung

Der erforderliche Feuerwiderstand von Bauteilen – ausgedrückt durch die Klassierungen R30/R60/R90 usw. – wird in den Landesbauordnungen bzw. Sonderbauverordnungen, i.d.R. unter Berücksichtigung der Stockwerkzahl, der Nutzung (d.h. der vorhandenen Brandlasten), der Personenbelegung und der günstigen Wirkung von vorhandenen Maßnahmen des anlagentechnischen Brandschutzes wie Brandmeldeanlagen, Feuerlöschanlagen (z.B. Sprinkler) und/oder Rauch- und Wärmeabzugsanlagen festgelegt.

Der Nachweis des Feuerwiderstandes von tragenden Bauteilen erfolgt mittels normierter Ofenversuche oder durch Berechnungen. Diese Publikation beschreibt rechnerische Nachweisverfahren für innenliegende, ungeschützte bzw. durch Brandschutzmaterialien geschützte Bauteile aus Kohlenstoffstahl auf der Grundlage der einfachen Bemessungsverfahren nach DIN EN 1993-1-2:2006, Kapitel 4.2 [1].

## 2 Berechnungsgrundlagen

### 2.1 Tragfähigkeit im Brandfall

Der Zeitpunkt, an dem Bauteile aus Stahl im Brandfall versagen können, ist abhängig von

- » **der kritischen Temperatur  $\theta_{a,cr}$** : Die Eigenschaften von Baustahl sind temperaturabhängig (vgl. Bild 1). Bei Erreichen der kritischen Temperatur entspricht der Tragwiderstand gerade noch den Einwirkungen für die außergewöhnliche Bemessungssituation nach DIN EN 1990:2002 [3]. Es besteht dann die Gefahr des Versagens. Die kritische Temperatur wird bestimmt durch den Ausnutzungsgrad im Brandfall:

$$\mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0}$$

$E_{fi,d}$ : Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall nach DIN EN 1991-1-2:2003 [4]

$R_{fi,d,0}$ : Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Stahlbauteil zum Zeitpunkt  $t = 0$  (d.h. bei Raumtemperatur) mit  $\gamma_{M0} = \gamma_{M,fi} = 1,0$ .

- » **der Entwicklung der Stahltemperatur**, für die folgende Parameter von Bedeutung sind:

- Profillfaktor  $P = A_m/V$ , der sich als Verhältnis der brandbeanspruchten Oberfläche zum Volumen eines Stahlprofils ergibt. Die Berechnung des Profillfaktors ist in Kapitel 3.2 dargestellt.
- Dicke  $d_p$  und thermische Eigenschaften von i.d.R. vorhandener Brandschutzverkleidung:
  - Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_p$  [W/(m·K)]
  - Wärmekapazität  $c_p$  [J/(kg·K)]
  - Dichte  $\rho_p$  [kg/m<sup>3</sup>]

In Kapitel 4 werden thermische Eigenschaften für verschiedene Brandschutzmaterialien angegeben.

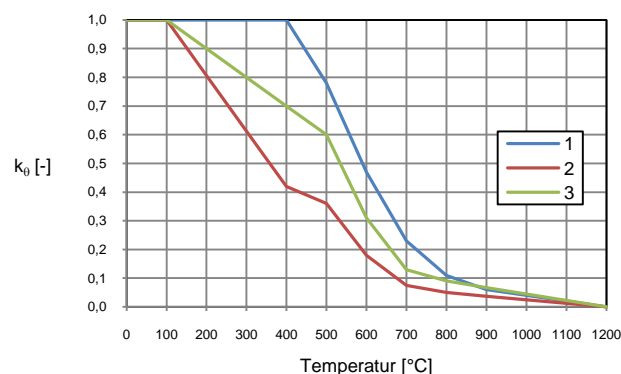


Bild 1: temperaturbedingte Abminderungsfaktoren für  
 (1) die effektive Fließgrenze  $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$   
 (2) die Proportionalitätsgrenze  $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$   
 (3) den Elastizitätsmodul  $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$

### 2.2 Randbedingungen

Das Berechnungsverfahren ist anwendbar für

- » **Einzelbauteile**, d.h.
  - Zugstäbe
  - biegebeanspruchte Ein- und Durchlaufträger
  - Druckstäbe mit planmäßig zentrischem Druck
- » Bauteile, die biegedrillknickgefährdet sind oder planmäßig auf Druck und Biegung beansprucht werden, sind ausgeschlossen.
- » **Baustahlorten** nach DIN EN 10025-1:2005 [5]
- » **Profile** der Klassen 1, 2 und 3 (mit  $A_m/V > 10 \text{ m}^{-1}$ ) nach DIN EN 1993-1-1:2005 [2] (für Klasse 4 vgl. Beispiel 5.7)
- » einen **Temperaturanstieg** im Brandraum entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve nach ISO 834-1 [6]
- » **mechanische Einwirkungen**, die während der gesamten Branddauer konstant sind. Die Einflüsse thermischer Dehnungen in Bauteillängsachse werden vernachlässigt.
- » eine **gleichmäßige Temperaturverteilung** im Bauteil. Für biegebeanspruchte Träger wird eine ungleichmäßige Erwärmung über einen Anpassungsfaktor  $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$  erfasst, der im Kapitel 3.1 erläutert ist.
- » eine **Klassifizierung der Querschnitte** wie unter Normaltemperaturen, jedoch mit einem reduzierten Wert  $\varepsilon$

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \sqrt{235/f_y} \text{ und } f_y = \text{Streckgrenze bei } 20^\circ\text{C}$$

- » eine vereinfachte Bestimmung der Beanspruchungen im Brandfall  $E_{fi,d}$  aus den Beanspruchungen bei Raumtemperatur  $E_d$

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

mit dem Abminderungsfaktor  $\eta_{fi}$  nach Tabelle 1.

**Tab. 1** Abminderungsfaktoren  $\eta_{fi}$  für Vertikallasten im Brandfall in Abhängigkeit vom Verhältnis  $Q_{k,1}/G_k$

Kategorie	Q <sub>k</sub> kN/m <sup>2</sup>	Q <sub>k,1</sub> /G <sub>k</sub>			
		ψ <sub>2,i</sub>	0,5	1,0	2,0
A: Wohngebäude	2,00	0,3	0,55	0,46	0,37
B: Bürogebäude	3,00	0,3	0,55	0,46	0,37
C: Versammlungsbereiche	5,00	0,6	0,62	0,56	0,51
D: Verkaufsf lächen	5,00	0,6	0,62	0,56	0,51
E: Lagerfl ächen	7,50	0,8	0,67	0,63	0,60
F: Fahrzeuge < 30 kN	2,50	0,6	0,62	0,56	0,51
G: Fahrzeuge 30 – 160 kN	5,00	0,3	0,55	0,46	0,37
H: D ächer	0,75	0,0	0,48	0,35	0,23

Als Vereinfachung darf  $\eta_{fi} = 0,7$  für Einwirkungen der Kategorie E und  $\eta_{fi} = 0,65$  in allen anderen Fällen angenommen werden.

### 3 Berechnungsverfahren

#### 3.1 Kritische Temperatur

##### a) Biegeträger

###### Schritt 1a:

Berechnung des Ausnutzungsgrades  $\mu_0$

$$\mu_0 = M_{fi,Ed} / \left( \frac{f_y \cdot W_{pl,y}}{f_y \cdot W_{el,y}} \right) \quad (\text{Querschnittsklasse 1 und 2})$$

Vereinfachend kann als Ausnutzungsgrad  $\mu_0$  der Abminderungsfaktor  $\eta_{fi}$  angenommen werden.

###### Schritt 2a:

Bestimmung des Beiwertes  $\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2$

$\kappa_1$	Anpassung für Querschnittstemperaturgradient		
0,70	ungeschützter Träger, dreiseitige Erwärmung		
0,85	geschützter Träger, dreiseitige Erwärmung		
1,00	in allen anderen Fällen		
$\kappa_2$	Anpassung für Bauteilachsentemperaturgradient		
0,85	an den Auflagern von Durchlaufträgern		
1,00	in allen anderen Fällen		
$\kappa_1 \cdot \kappa_2$	0,70	0,85	1,00
0,85	0,595 $\approx$ 0,60	0,7225 $\approx$ 0,70	0,85
1,00	0,70	0,85	1,00

###### Schritt 3a:

Ablesen der kritischen Temperatur aus dem Nomogramm (Bild 3)

##### b) Zugstäbe

###### Schritt 1b:

Berechnung des Ausnutzungsgrades  $\mu_0$

$$\mu_0 = N_{fi,Ed} / (f_y \cdot A)$$

###### Schritt 2b:

Der Beiwert  $\kappa$  ist mit 1,0 anzunehmen!

###### Schritt 3b:

entspricht Schritt 3a

##### c) Druckstäbe

###### Schritt 1c:

Berechnung des Ausnutzungsgrades  $\mu_0$

$$\mu_0 = |N_{fi,Ed}| / (f_y \cdot A)$$

###### Schritt 2c:

Berechnung des bezogenen Schlankheitsgrades zum Zeitpunkt  $t = 0$

$$\bar{\lambda}_{\theta,0} = \frac{\beta_{fi}}{\beta} \cdot \bar{\lambda} = \beta_{fi} \cdot \frac{L}{i_{min} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E_a}}$$

$\beta_{fi}$	Knicklängenbeiwert nach [1] Kap. 4.2.3.2 (4)
0,5	für Stützen in einem innenliegenden Stockwerk
0,7	für Stützen im obersten Stockwerk
$\beta$	in allen anderen Fällen wie für Raumtemperatur

###### Schritt 3c:

Ablesen der kritischen Temperatur aus den Nomogrammen (Bild 4 – Bild 8) in Abhängigkeit von der Stahlsorte des Bauteils

#### 3.2 Feuerwiderstandsdauer

###### Schritt 4:

Berechnung des Profilmfaktors P

$$P = A_m / V$$

mit  $A_m$  als dem der Brandeinwirkung ausgesetzte Umfang und V als Querschnittfläche. Für ungeschützte und kastenförmig verkleidete I- und H-Profile kann als  $A_m$  die Kontur des den Querschnitt umschreibenden Rechtecks angenommen werden (vgl. Tabelle 2). Für profilfolgende Verkleidungen konstanter Dicke ist P als Quotient aus Querschnittumfang und Querschnittfläche zu berechnen. Auf [www.bauforumstahl.de](http://www.bauforumstahl.de) sind die Profilmfaktoren für diverse gewalzte Profile abrufbar.

###### Schritt 5:

Korrektur des Profilmfaktors P

Für ungeschützte Bauteile mit I- oder H-Querschnitt muss der Profilmfaktor aus Tabelle 2 noch mit dem Wert 0,9 multipliziert werden.

Für verkleidete Bauteile ist die Erwärmung mit einem thermischen Profilmfaktor TP zu berechnen:

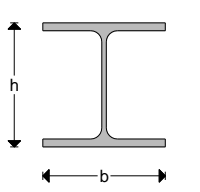
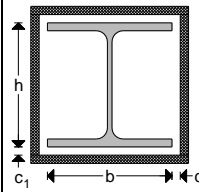
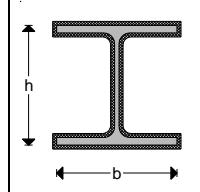
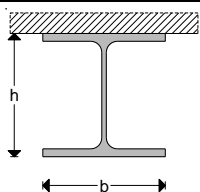
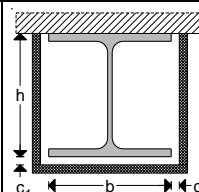
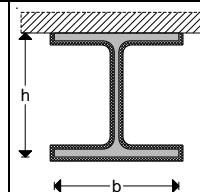
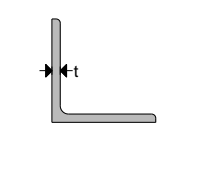
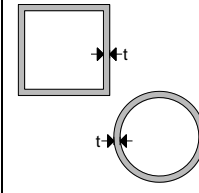
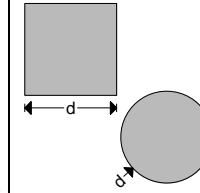
$$TP = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} \quad \text{und} \quad \phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V}$$

mit  $A_p$  als der inneren Abwicklung der Brandschutzverkleidung (vgl. Tabelle 2). Der Parameter  $\phi$  erfasst die Trägheit des Brandschutzsystems,  $\rho_a$  ist die Dichte und  $c_a$  die Wärmekapazität von Baustahl, die konstant als 7850 kg/m<sup>3</sup> und 600 J/(kg·K) angesetzt werden. Vereinfachend kann  $\phi$  auch vernachlässigt werden, d.h. zu 0 angenommen werden.

###### Schritt 6:

Ablesen der Feuerwiderstandsdauer (Zeit) aus dem Zeit-Temperatur-Nomogramm (Bild 2)

**Tab. 2** Beispiele für die Berechnung von Profilkoeffizienten

<p>ungeschützte, vierseitig erwärmte I- und H-Profile</p>  <p><math>P = 0,9 \cdot (2b + 2h) / A_a</math></p>	<p>kastenförmig verkleidete, vierseitig erwärmte I- und H-Profile <sup>1)</sup></p>  <p><math>P = (2b + 2h) / A_a</math></p>	<p>vierseitig erwärmte I- und H-Profile mit profilfolgender Verkleidung</p>  <p><math>P = U / A_a</math></p>
<p>ungeschützte, dreiseitig erwärmte I- und H-Profile</p>  <p><math>P = 0,9 \cdot (b + 2h) / A_a</math></p>	<p>kastenförmig verkleidete, dreiseitig erwärmte I- und H-Profile <sup>1)</sup></p>  <p><math>P = (b + 2h) / A_a</math></p>	<p>dreiseitig erwärmte I- und H-Profile mit profilfolgender Verkleidung</p>  <p><math>P = (U - b) / A_a</math></p>
<p>ungeschützte, allseitig erwärmte Winkelprofile</p>  <p><math>P \approx 2/t_a</math></p>	<p>ungeschützte, allseitig erwärmte Hohlprofile</p>  <p><math>P \approx 1/t_a</math></p>	<p>ungeschützte, allseitig erwärmte Vollprofile</p>  <p><math>P = 4/d</math></p>

<sup>1)</sup> Die Luftspalten  $c_1$  und  $c_2$  sollten  $h/4$  nicht überschreiten.

## 4 Brandschutzmaterialien

Die Eigenschaften von Brandschutzmaterialien (vgl. Tabelle 3), die im Berechnungsverfahren angesetzt werden, sind i.d.R. mit den entsprechenden Prüfverfahren nach ENV 13381 [7] zu bestimmen. In [7] ist die Anforderung enthalten, dass das Brandschutzmaterial während der maßgebenden Brandbeanspruchung zusammenhalten muss und sich nicht vom Bauteil ablösen darf.

**Tab. 3** thermische Eigenschaften von Verkleidungen

Material der Brandschutzverkleidung	$\rho_p$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_p$ [W/(m·K)]	$c_p$ [J/(kg·K)]
Spritzputze			
- Mineralfaser	300	0,12	1200
- Vermiculite oder Perlite	350	0,12	1200
Spezialputze			
- Vermiculite/Perlite + Zement	550	0,12	1100
- Vermiculite/Perlite + Gips	650	0,12	1100
Platten			
- Vermiculite/Perlite + Zement	800	0,20	1200
- Faser-Silikat oder Faser-Calcium-Silikate	600	0,15	1200
- Faser-Zement	800	0,15	1200
- Gipskarton	800	0,20	1700
Matten			
- Mineral- oder Steinwolle	150	0,20	1200
Dämmschichtbildner	0	$\leq 0,012$	0

## 5 Rechenbeispiele

### 5.1 Unterzug (Einfeldträger)

**Gegeben:** Unterzug IPE 330 in einem Bürogebäude mit am Obergurt aufliegender Stahlbetondecke, Stahlsorte S 235. Das plastische Moment bei Raumtemperatur ist  $M_{fi,0,Rd} = 188,9$  kNm. Der Träger ist profilfolgend verkleidet mit einem 12 mm dicken Spritzputz (Vermiculite). Die Spannweite ist 6 m bei einem Achsabstand der Träger von 3 m. Das Eigengewicht der Decke inklusive Fußboden und Haustechnik beträgt  $G_k = 4$  kN/m<sup>2</sup>, die Nutzlast ist  $Q_k = 3$  kN/m<sup>2</sup>, Trägergewicht 0,49 kN/m.

**Gesucht:** Feuerwiderstandsdauer

#### a) Überslagsberechnung

**Schritt 1:** Berechnung des Ausnutzungsgrades  
Vereinfacht wird  $\mu_0 = 0,65$  angesetzt (vgl. Tab. 1).

**Schritt 2:** Bestimmung des Korrekturfaktors  
Der Unterzug ist am Obergurt durch die Stahlbetondecke seitlich unverschieblich gehalten.

Damit gilt:  $\kappa = 0,85$

**Schritt 3:** kritischen Temperatur

Aus Bild 3 wird abgelesen  $\theta_{a,cr} = 573^\circ\text{C}$ .

**Schritt 4:** Berechnung des Profilkoeffizienten (vgl. Tab. 2)

$$P = \frac{U - b}{A_a} = \frac{125 - 16}{62,6} = 1,74 \text{ cm}^{-1} = 174 \text{ m}^{-1}$$

**Schritt 5:** Korrektur des Profilkoeffizienten

Aus Tab. 3 ergibt sich  $\lambda_p = 0,12$  W/(m·K) und unter Vernachlässigung der thermische Trägheit ist  $\phi = 0$ .

$$TP = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 174 \cdot \frac{0,12}{0,012} = 1740 \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$$

**Schritt 6:** Feuerwiderstandsdauer

Aus Bild 2 wird abgelesen  $t = 53$  Minuten. Der Unterzug erfüllt die Klassierung R 30.

#### b) genauere Berechnung

**Schritt 1:** Berechnung des Ausnutzungsgrades

Der Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall beträgt mit  $\psi_{2,0} = 0,3$  (vgl. Tab. 1)

$$q_{fi} = 3 \cdot (4 + 0,3 \cdot 3) + 0,49 = 15,2 \text{ kN/m}$$

Das vorhandene Biegemoment beträgt

$$M_{fi,ED} = 0,125 \cdot 15,2 \cdot 6^2 = 68,4 \text{ kNm}$$

Damit folgt der Ausnutzungsgrad zu

$$\mu_0 = 68,4 / 188,9 = 0,36$$

**Schritt 2:** wie unter a)

**Schritt 3:** aus Bild 3 folgt  $\theta_{a,cr} = 668^\circ\text{C}$

**Schritt 4:** wie unter a)

**Schritt 5:** wie unter a)

**Schritt 6:** Feuerwiderstandsdauer

Aus Bild 2 wird abgelesen  $t = 70$  Minuten. Der Unterzug erfüllt mit der genaueren Berechnung die Klassierung R 60.

## 5.2 Unterzug (Durchlaufträger)

**Gegeben:** Unterzug wie in Kapitel 5.1, aber hier als Durchlaufträger über 3 Felder

**Gesucht:** erforderliche Dicke einer kastenförmigen Brandschutzverkleidung aus Faser-Silikat-Platten für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten

**Schritt 1:** Berechnung des Ausnutzungsgrades

Das maximale Biegemoment beträgt

$$M_{fi,ED} = 0,1 \cdot 15,2 \cdot 6^2 = 54,7 \text{ kNm}$$

Damit folgt der Ausnutzungsgrad zu

$$\mu_0 = 54,7/188,9 = 0,29$$

**Schritt 2:** Bestimmung des Korrekturfaktors

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,85 \cdot 0,85 \approx 0,7$$

**Schritt 3:** aus Bild 3 folgt  $\theta_{a,cr} = 723^\circ\text{C}$

**Schritt 4:** Berechnung des Profilkoeffizienten (vgl. Tab. 2)

$$P = \frac{b + 2h}{A_a} = \frac{16 + 2 \cdot 33}{62,6} = 1,31 \text{ cm}^{-1} = 131 \text{ m}^{-1}$$

**Schritt 5 & 6:**

Aus Bild 2 folgt, dass für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten (Klassierung R 90) ein thermischer Profilkoeffizient  $TP = 1595 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$  erforderlich ist. Unter Vernachlässigung der thermischen Trägheit des Brandschutzsystems ( $\phi = 0$ ) und mit  $\lambda_p = 0,15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  ergibt sich als erforderliche Plattendicke

$$d_p = \frac{A_p}{V} \cdot \lambda_p = 131 \cdot 0,15 = 0,012 \text{ m} = 12 \text{ mm}$$

## 5.3 Unterzug ohne Brandschutz

**Gegeben:** Unterzug wie in Kapitel 5.2 aber ohne Brandschutzmaßnahmen, Stahlsorte S 460.

**Gesucht:** Kontrolle, ob der Unterzug als R 30 klassiert werden kann

**Schritt 1:** Berechnung des Ausnutzungsgrades

$$\mu_0 = 0,29 \cdot 235/460 = 0,15$$

**Schritt 2:** Bestimmung des Korrekturfaktors

$$\kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_2 = 0,85 \cdot 0,7 \approx 0,6$$

**Schritt 3:** aus Bild 3 folgt  $\theta_{a,cr} = 843^\circ\text{C}$

**Schritt 4:**  $P = 131 \text{ m}^{-1}$  (vgl. Kapitel 5.2)

**Schritt 5:** Korrektur des Profilkoeffizienten

$$P = 0,9 \cdot 131 = 118 \text{ m}^{-1}$$

**Schritt 6:** Feuerwiderstandsdauer

Aus Bild 2 wird abgelesen  $t = 35$  Minuten, d.h. der Unterzug erfüllt die Klassierung R 30.

## 5.4 Geschoßstütze

**Gegeben:** durchlaufende Stütze HEB 160 aus S 275 in dem bereits in den vorhergehenden Beispielen betrachteten Bürogebäude. Über der Stütze befinden sich 5 Geschosse und es wird ein innenliegendes Geschoß mit einer Höhe von 3 m untersucht. Die Brandschutzverkleidung bilden 20 mm Gipskartonplatten.

**Gesucht:** Feuerwiderstandsdauer

**Schritt 1:** Ausnutzungsgrad

Die Stütze trägt  $5 \cdot 2 = 10$  Träger aus Kapitel 5.1

$$N_{fi,ED} = 10 \cdot 6 \cdot 15,2/2 = 456 \text{ kN}$$

Der Ausnutzungsgrad beträgt

$$\mu_0 = \frac{456}{54,3 \cdot 27,5} = 0,31$$

**Schritt 2:** bezogener Schlankheitsgrad für  $t = 0$

Der Knicklängenbeiwert für den Brandfall ist  $\beta_{fi} = 0,5$ .

$$\bar{\lambda}_{\theta,0} = \beta_{fi} \cdot \frac{L}{i_{min} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E_a}} = 0,5 \cdot \frac{300}{4,05} \cdot \frac{1}{86,8} = 0,427$$

**Schritt 3:** aus Bild 5 folgt  $\theta_{a,cr} = 618^\circ\text{C}$

**Schritt 4:** Berechnung des Profilkoeffizienten (vgl. Tab. 2)

$$P = \frac{2b + 2h}{A_a} = \frac{2 \cdot 16 + 2 \cdot 16}{54,3} = 1,18 \text{ cm}^{-1} = 118 \text{ m}^{-1}$$

**Schritt 5:** Korrektur des Profilkoeffizienten

$$\phi = \frac{\rho_p \cdot c_p}{\rho_a \cdot c_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} = \frac{800 \cdot 1700}{7850 \cdot 600} \cdot 0,02 \cdot 118 = 0,68$$

$$TP = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = \frac{118 \cdot 0,2}{0,02 \cdot (1 + \frac{0,68}{3})} = 962 \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$$

**Schritt 6:** Feuerwiderstandsdauer

Aus Bild 2 wird abgelesen  $t = 94$  Minuten. Die Stütze erfüllt die Klassierung R 90.

## 5.5 Geschoßstütze

**Gegeben:** Dachgeschoßstütze QHP 200x8 aus S235 in dem bereits in Kapitel 5.4 betrachteten Bürogebäude. Die Stütze erhält keine Brandschutzverkleidung. Zur Vereinfachung werden die gleichen Einwirkungen wie in Kapitel 5.4 angesetzt (konservativ).

**Gesucht:** Kontrolle, ob die Stütze als R 30 klassiert werden kann

**Schritt 1:** Ausnutzungsgrad

einwirkende Normalkraft (aus einer Geschoßdecke)

$$N_{fi,ED} = 456/5 = 91,2 \text{ kN}$$

Der Ausnutzungsgrad beträgt

$$\mu_0 = \frac{91,2}{60,8 \cdot 23,5} = 0,064$$

**Schritt 2:** bezogener Schlankheitsgrad für  $t = 0$

Der Knicklängenbeiwert für den Brandfall ist  $\beta_{fi} = 0,7$ .

$$\bar{\lambda}_{\theta,0} = \beta_{fi} \cdot \frac{L}{i_{min} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E_a}} = 0,7 \cdot \frac{300}{7,81} \cdot \frac{1}{93,9} = 0,29$$

**Schritt 3:** aus Bild 4 folgt  $\theta_{a,cr} = 867^\circ\text{C}$

**Schritt 4:** Berechnung des Profilkoeffizienten (vgl. Tab. 2)

$$P = 1/t_a = 1/0,8 = 1,25 \text{ cm}^{-1} = 125 \text{ m}^{-1}$$

**Schritt 5:** entfällt

**Schritt 6:** Feuerwiderstandsdauer

Aus Bild 2 wird abgelesen  $t = 39$  Minuten, d.h. die Stütze erfüllt die Klassierung R 30.

## 5.6 Unterspannung eines Trägers

**Gegeben:** Zugband (Rundstahl  $\varnothing = 25$  mm aus S 460) als Unterspannung eines Deckenträgers. Die veränderlichen Einwirkungen fallen in Kategorie C (vgl. Tab. 1). Als Brandschutz wird ein Dämmschichtbildner mit  $\lambda_p = 0,01$  W/(m·K) und einer Trockenschichtdicke von 1200  $\mu\text{m}$  verwendet.

**Gesucht:** Feuerwiderstandsdauer

**Schritt 1:** Ausnutzungsgrad

Mit  $Q_k/G_k \approx 1$  ergibt sich aus Tab. 1  $\mu_0 = 0,56$ .

**Schritt 2:** Für Zugstäbe gilt generell  $\kappa = 1$ .

**Schritt 3:** kritische Temperatur  $\theta_{a,cr} = 571^\circ\text{C}$  (Bild 3)

**Schritt 4:** Profilmfaktor (vgl. Tab. 2)

$$P = 4/d = 4/2,5 = 1,6 \text{ cm}^{-1} = 160 \text{ m}^{-1}$$

**Schritt 5:** Korrektur des Profilmfaktors

Aus Tab. 3 folgt das die thermische Trägheit des Brandschutzsystems  $\phi = 0$  ist.

$$TP = \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \cdot \frac{1}{1 + \phi/3} = 160 \cdot \frac{0,01}{0,0012} = 1333 \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$$

**Schritt 6:** Feuerwiderstandsdauer

Aus Bild 2 wird abgelesen  $t = 64$  Minuten. Das Zugband erfüllt die Klassierung R 60.

## 5.7 Querschnitt der Klasse 4

**Gegeben:** Querschnitt der Klasse 4 mit einem Profilmfaktor von 200  $\text{m}^{-1}$ . Die Feuerwiderstandsdauer muss mindestens 60 Minuten betragen.

**Gesucht:** Dicke der Brandschutzverkleidung aus Faser-Silikat-Platten

**Schritt 1:** entfällt

**Schritt 2:** entfällt

**Schritt 3:** kritische Temperatur

In [1] Kap. 4.2.3.6 wird ein Grenzwert  $\theta_{a,cr}$  von  $350^\circ\text{C}$  empfohlen.

**Schritt 4:** der Profilmfaktor ist gegeben als  $P = 200 \text{ m}^{-1}$

**Schritt 5 & 6:**

Aus Bild 2 folgt, dass für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten (Klassierung R 60) ein thermischer Profilmfaktor  $TP = 613$  W/( $\text{m}^3 \cdot \text{K}$ ) erforderlich ist. Unter Vernachlässigung der thermischen Trägheit des Brandschutzsystems ( $\phi = 0$ ) und mit  $\lambda_p = 0,15$  W/(m·K) ergibt sich als erforderliche Plattendicke

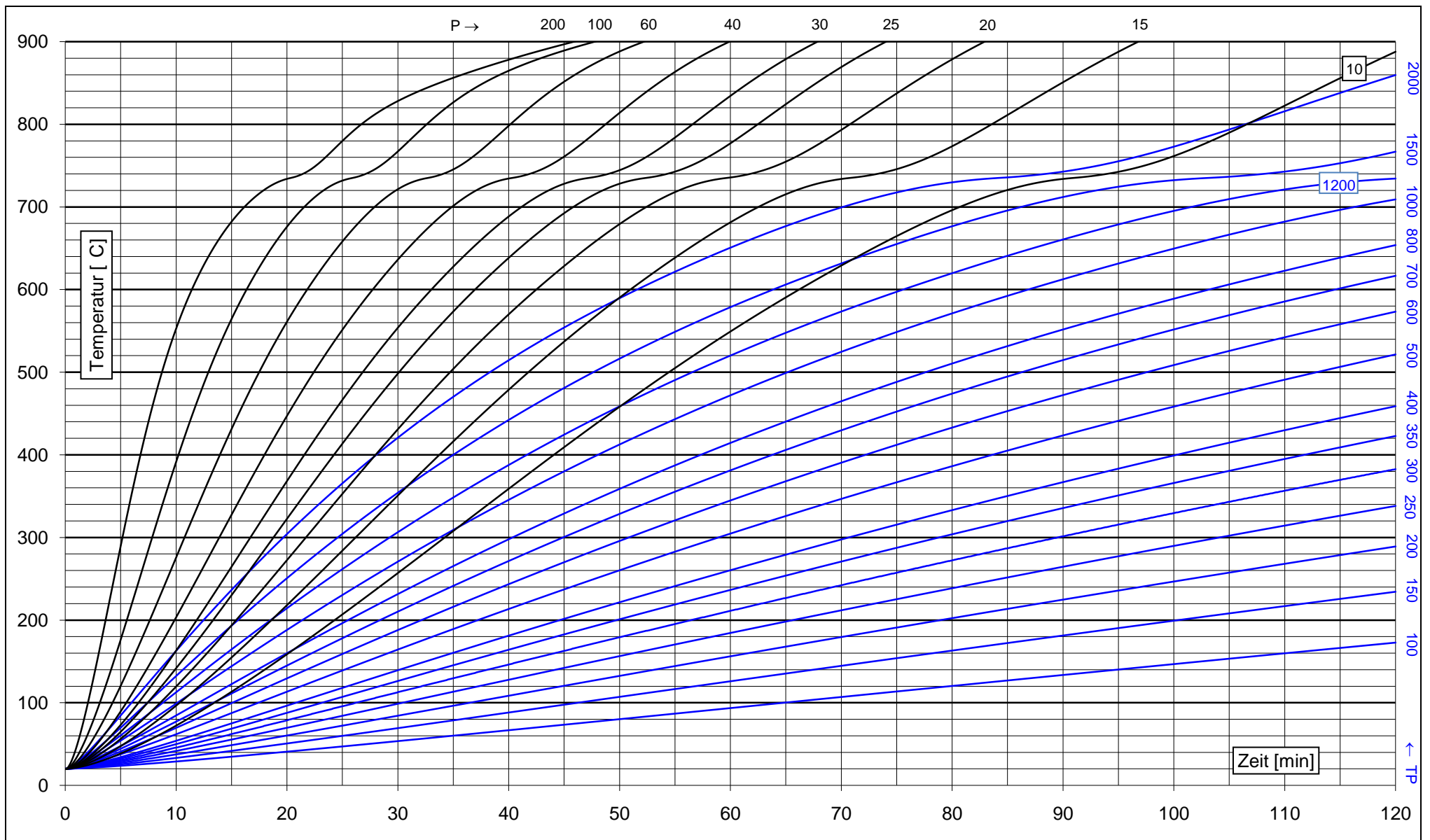
$$d_p = \frac{A_m}{V} \cdot \frac{V}{A_p} \cdot \lambda_p = \frac{200}{613} \cdot 0,15 = 0,049 \text{ m} = 49 \text{ mm}$$

## 6 Formelzeichen

$\beta$	Knicklängenbeiwert bei Raumtemperatur	[-]
$\beta_{fi}$	Knicklängenbeiwert im Brandfall	[-]
$\gamma_{M0}$	Teilsicherheitsbeiwert bei Raumtemperatur	[-]
$\gamma_{M,fi}$	Teilsicherheitsbeiwert im Brandfall	[-]
$\varepsilon$	Beiwert in Abhängigkeit von $f_y$	[-]
$\eta_{fi}$	Abminderungsfaktor des Bemessungswertes der Einwirkungen im Brandfall	[-]
$\theta_{a,cr}$	kritische Temperatur eines Stahlbauteils	[°C]
$\kappa$	Korrekturfaktor für den Temperaturgradient	[-]
$\kappa_1$	Korrekturfaktor für den Temperaturgradient über den Querschnitt	[-]
$\kappa_2$	Korrekturfaktor für den Temperaturgradient über die Bauteillänge	[-]
$\bar{\lambda}$	bezogener Schlankheitsgrad	[-]
$\bar{\lambda}_{\theta,0}$	bezogener Schlankheitsgrad im Brandfall	[-]
$\lambda_p$	Wärmeleitfähig des Brandschutzmaterials	[W/(m·K)]
$\mu_0$	Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt $t = 0$ min	[-]
$\rho_a$	Rohdichte von Stahl	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	Rohdichte des Brandschutzmaterials	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	thermische Trägheit des Brandschutzsystems	[-]
$\Psi_{2,i}$	Kombinationsbeiwert für die quasi-ständige Einwirkung $i$	[-]
$A_a$	Querschnittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$A_m$	Bauteiloberfläche bezogen auf die Einheitslänge	[m <sup>2</sup> /m]
$A_p$	Oberfläche des Brandschutzmaterials bezogen auf die Einheitslänge	[m <sup>2</sup> /m]
$E_a$	Elastizitätsmodul von Stahl bei Raumtemperatur	[MPa]
$E_{fi,d}$	Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall	
$G_k$	charakteristischer Wert einer ständigen Einwirkung	
$L$	Systemhöhe eines Stockwerkes	[m]
$M_{fi,ED}$	einwirkendes Biegemoment im Brandfall	[kNm]
$M_{fi,0,Rd}$	Momententragfähigkeit bei Raumtemperatur	[kNm]
$N_{fi,ED}$	einwirkende Normalkraft im Brandfall	[kN]
$P$	Profilmfaktor	[m <sup>-1</sup> ]
$Q_{k,i}$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung $i$	
$R_{fi,d,0}$	Bemessungswert der Beanspruchbarkeit zum Zeitpunkt $t = 0$ min	
$TP$	thermischer Profilmfaktor	[W/(m <sup>3</sup> ·K)]
$V$	Bauteilvolumen bezogen auf die Einheitslänge	[m <sup>3</sup> /m]
$W_{el,y}$	elastisches Widerstandsmoment	[m <sup>3</sup> ]
$W_{pl,y}$	plastisches Widerstandsmoment	[m <sup>3</sup> ]
$b$	Profilbreite (Flanschbreite)	[m]
$c_a$	spezifische Wärmekapazität von Stahl	[J/(kg·K)]
$c_p$	spezifische Wärmekapazität des Brandschutzmaterials	[J/(kg·K)]
$d$	Profildurchmesser	[m]
$d_p$	Dicke des Brandschutzmaterials	[m]
$f_y$	Fließgrenze von Stahl bei $20^\circ\text{C}$	[MPa]
$h$	Profilhöhe	[m]
$i_{min}$	kleinster Trägheitsradius des Querschnitts	[m]
$k_{E,0}$	temperaturabhängiger Abminderungsfaktor für den Elastizitätsmodul von Stahl	[-]
$k_{p,0}$	temperaturabhängiger Abminderungsfaktor für die Proportionalitätsgrenze von Stahl	[-]
$k_{y,0}$	temperaturabhängiger Abminderungsfaktor für die Fließgrenze von Stahl	[-]
$q_{fi}$	konstante Linienlast im Brandfall	[kN/m]
$t$	Dauer der Brandbeanspruchung	[min]
$t_a$	Dicke eines Querschnittsteils	[m]

## 7 Nomogramme

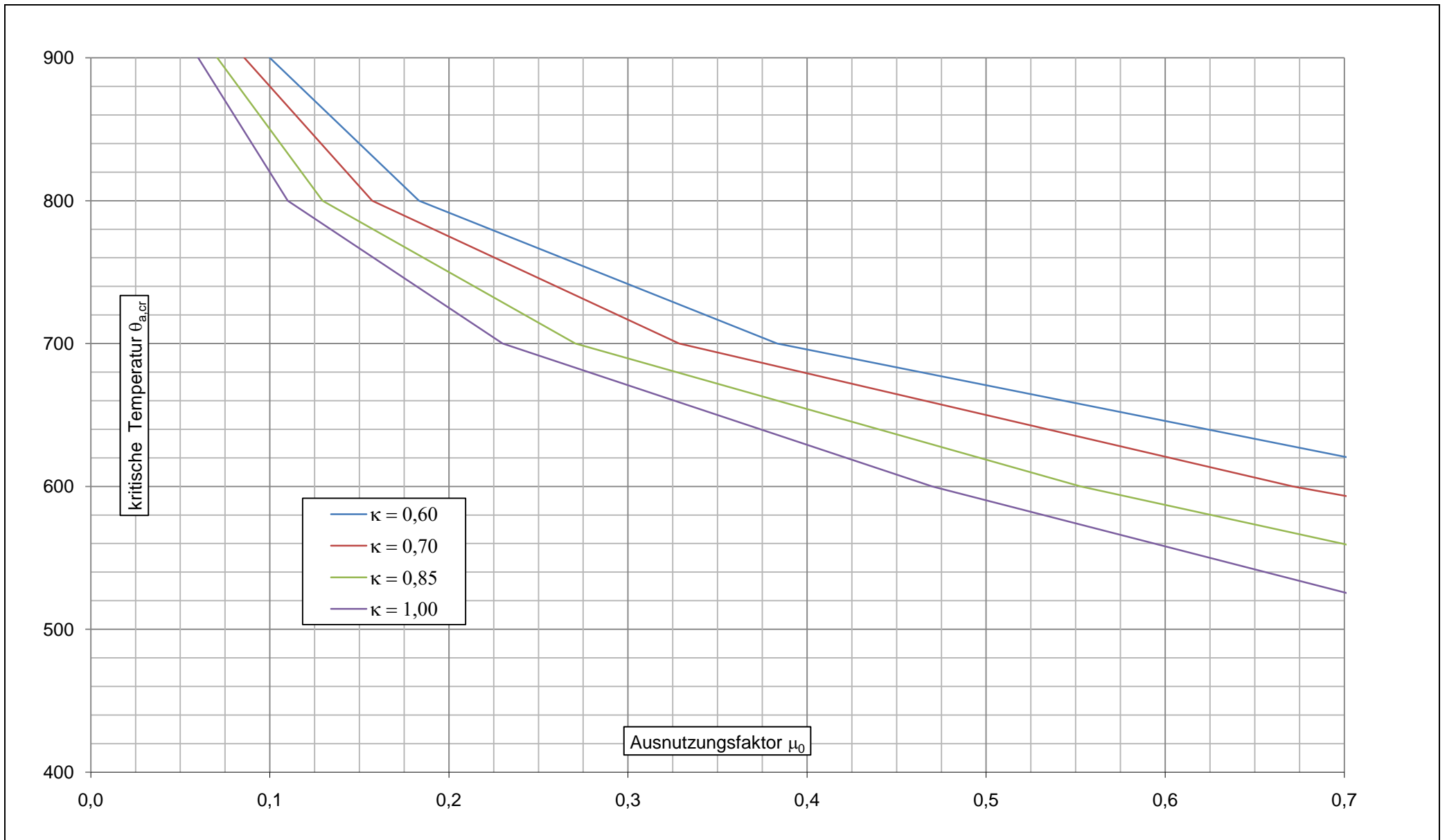
Die Zeit-Temperatur-Kurven für verkleidete Bauteile in Bild 2 wurden ohne Ansatz der thermischen Trägheit  $\phi$  ermittelt.



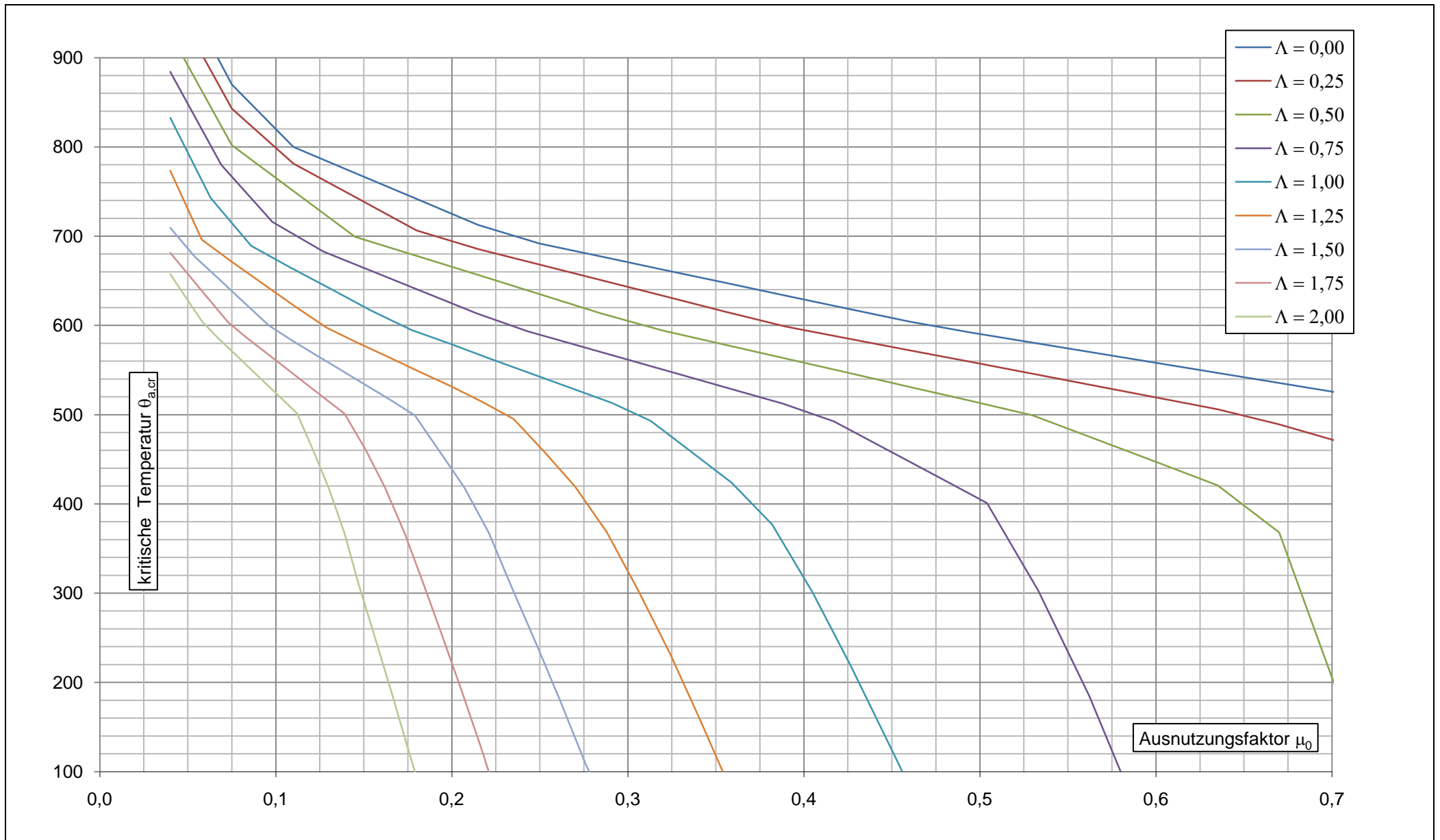
**Bild 2:** Entwicklung der Stahltemperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer (Zeit)

P = Profilmfaktor für ungeschützte Stahlprofile [ $m^{-1}$ ]

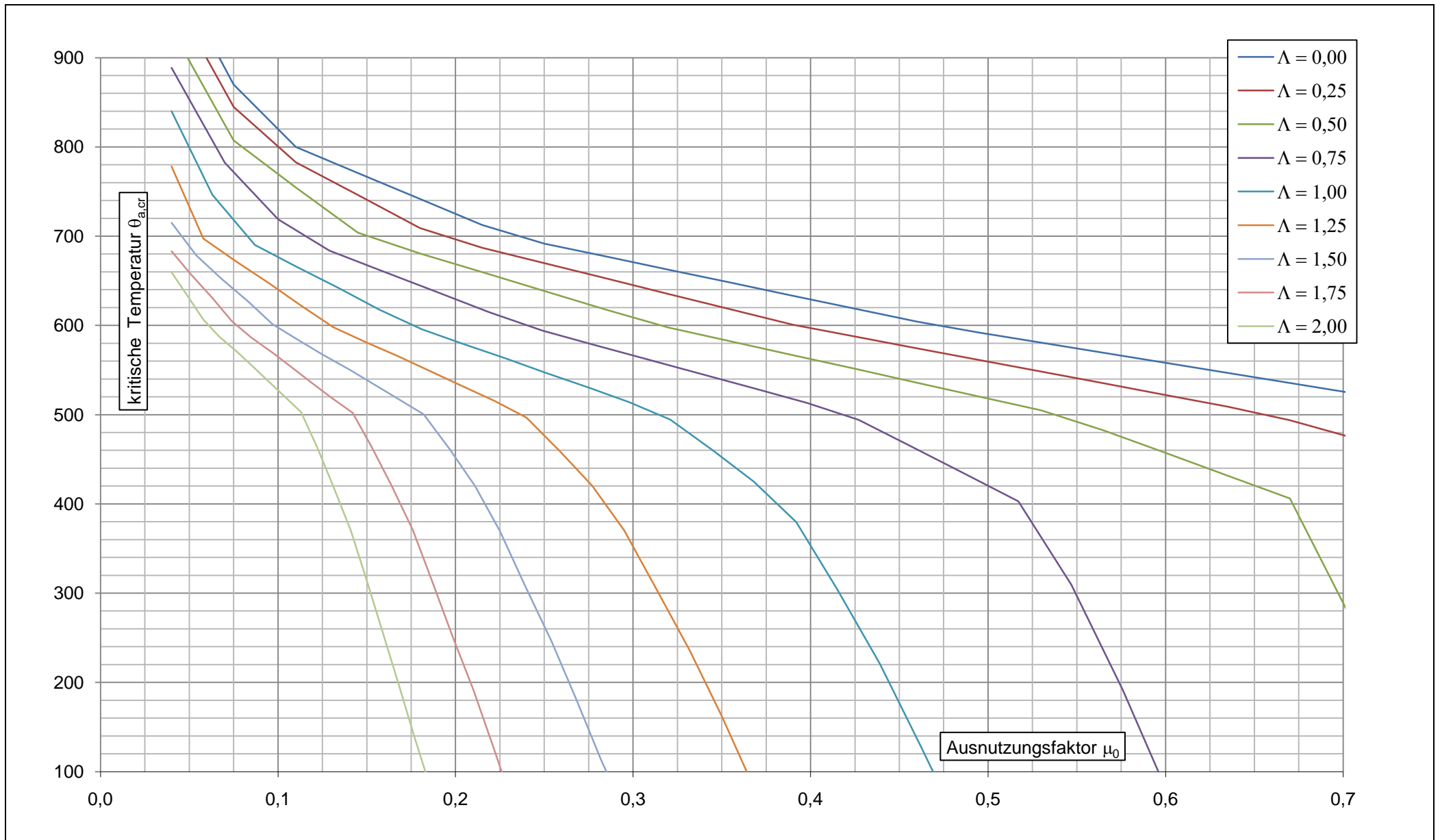
TP = thermischer Profilmfaktor für verkleidete Stahlprofile [ $W/(m^3 \cdot K)$ ]



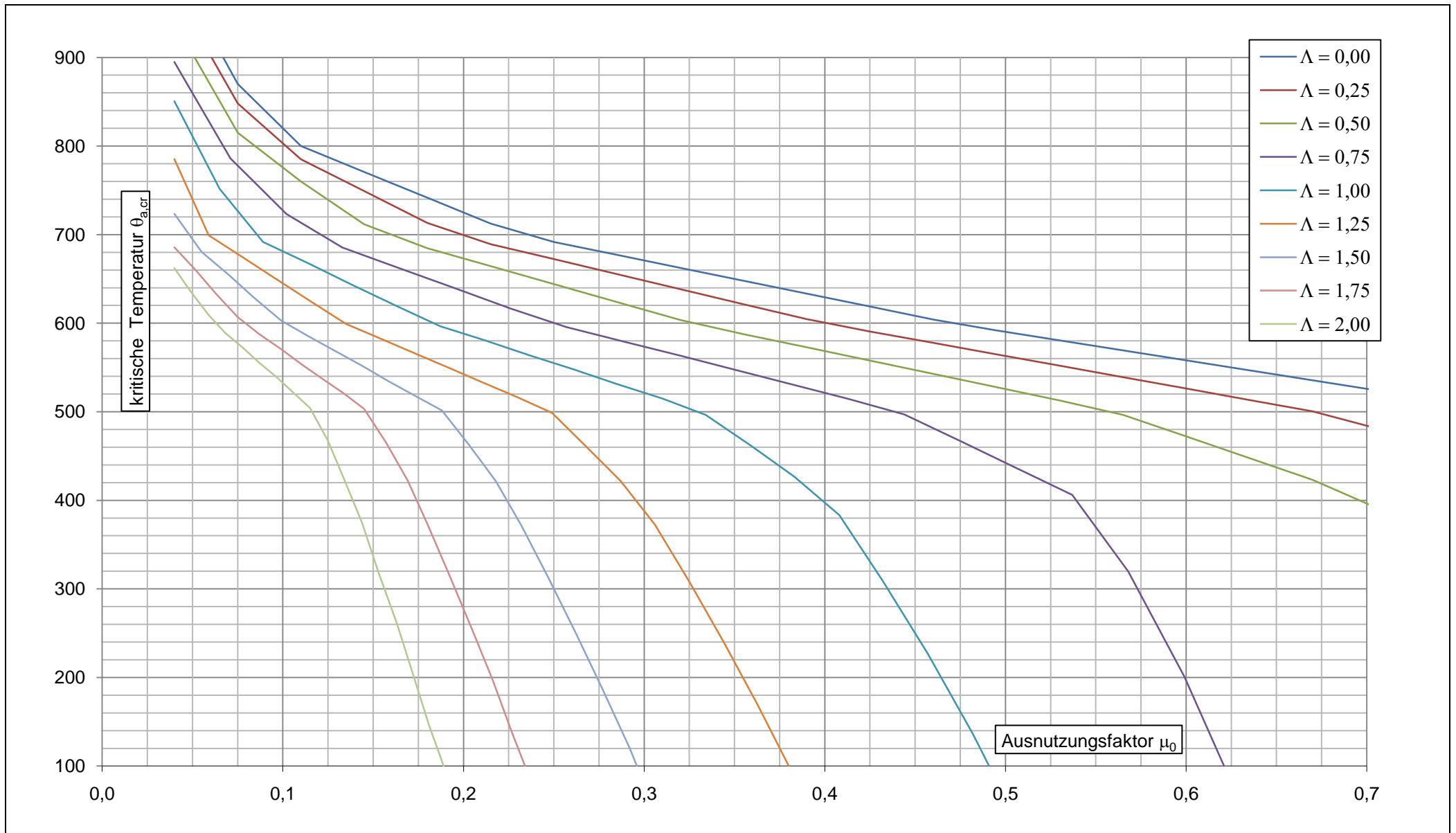
**Bild 3:** kritische Temperatur  $\theta_{a,cr}$  für Biegeträger und Zugstäbe (alle Stahlsorten)  
 $\kappa$  = Korrekturfaktor für den Temperaturgradient



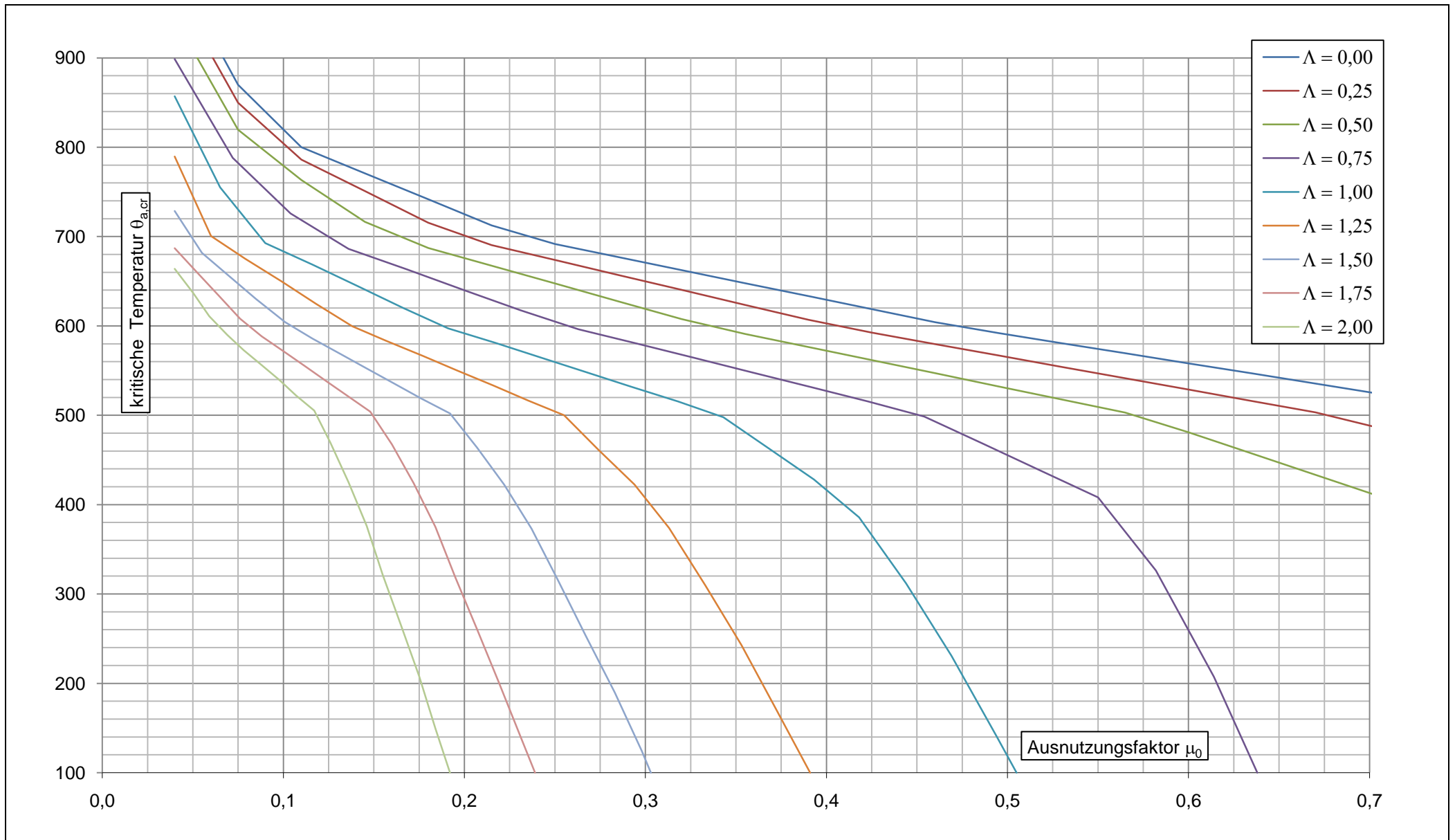
**Bild 4:** kritische Temperatur  $\theta_{a,cr}$  für Druckstäbe der Stahlsorten S 235  
 $\Lambda = \bar{\lambda}_{\theta,0}$  = bezogener Schlankheitsgrad im Brandfall



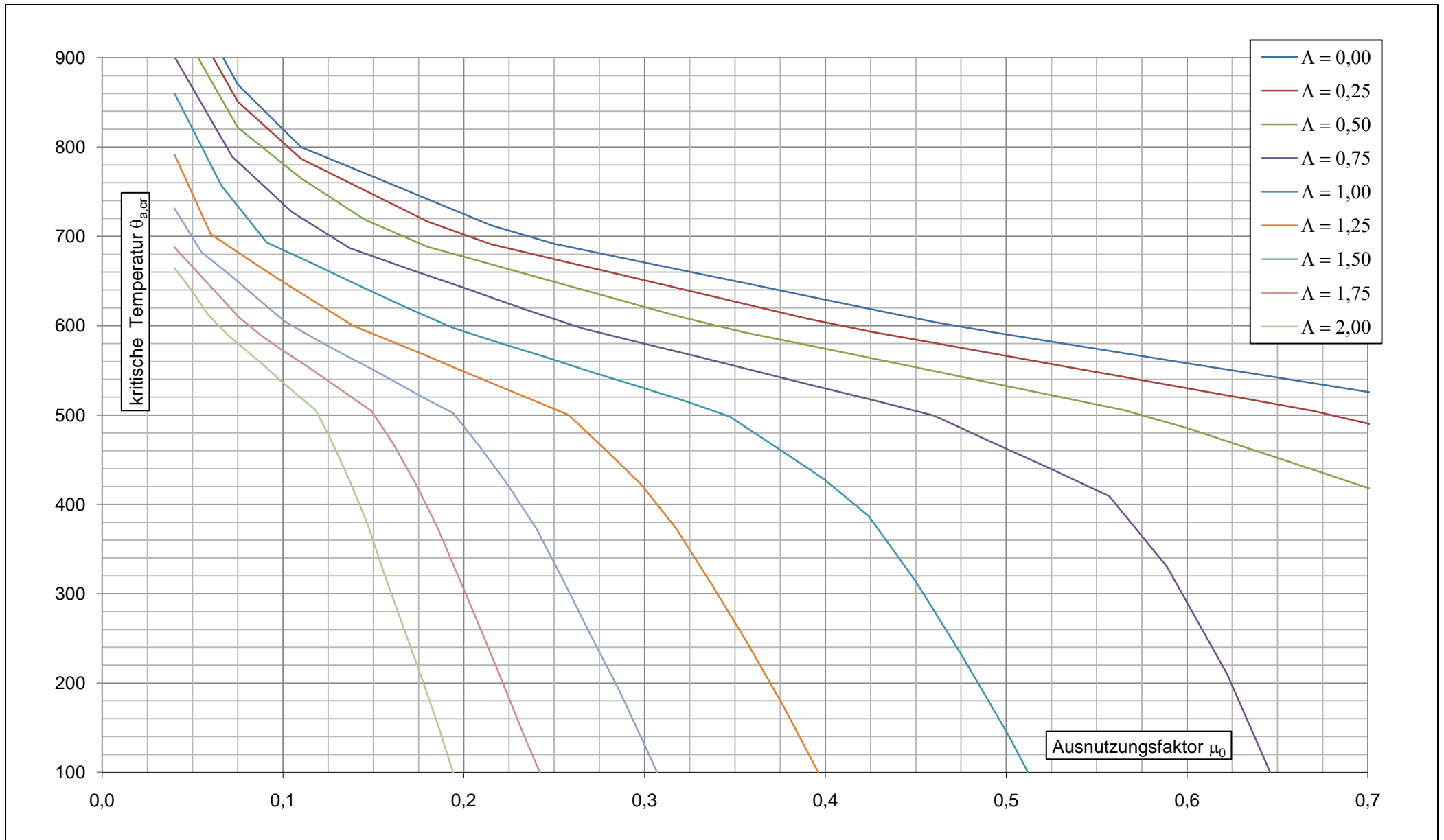
**Bild 5:** kritische Temperatur  $\theta_{a,cr}$  für Druckstäbe der Stahlsorten S 275  
 $\Lambda = \bar{\lambda}_{\theta,0}$  = bezogener Schlankheitsgrad im Brandfall



**Bild 6:** kritische Temperatur  $\theta_{a,cr}$  für Druckstäbe der Stahlsorten S 355  
 $\Lambda = \bar{\lambda}_{\theta,0}$  = bezogener Schlankheitsgrad im Brandfall



**Bild 7:** kritische Temperatur  $\theta_{a,cr}$  für Druckstäbe der Stahlsorten S 420  
 $\Lambda = \bar{\lambda}_{\theta,0}$  = bezogener Schlankheitsgrad im Brandfall



**Bild 8:** kritische Temperatur  $\theta_{a,cr}$  für Druckstäbe der Stahlsorten S 460  
 $\Lambda = \bar{\lambda}_{\theta,0}$  = bezogener Schlankheitsgrad im Brandfall

## 8 Zitierte Normen

- [1] DIN EN 1993-1-2:2006, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall
  - [2] DIN EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
  - [3] DIN EN 1990:2002, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung
  - [4] DIN EN 1991-1-2:2003, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke
  - [5] DIN EN 10025-1:2005, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen
  - [6] ISO 834-1:1999-09, Feuerwiderstandsprüfungen - Bauteile - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
  - [7] CEN/TS 13381-1, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 1: Horizontal angeordnete Brandschutzbekleidungen
- ENV 13381-2:2002, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 2: Vertikal angeordnete Brandschutzbekleidungen
- ENV 13381-4:2002, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 4: Brandschutzmaßnahmen für Stahlbauteile

## 9 Beratung

[->>bauforumstahl e.V.](http://www.bauforumstahl.de)

[->>bauforumstahl e.V./brandschutz](http://www.bauforumstahl.de/brandschutz)