

	Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall Deutsche Fassung ENV 1993-1-2: 1995	Vornorm
		DIN V ENV 1993-1-2

ICS 13.220.20; 91.010.30; 91.080.10

Deskriptoren: Bauwesen, Stahlbau, Brand, Bemessung, Konstruktion

Eurocode 3 – Design of steel structures –
Part 1-2: General rules – Structural fire design;
German version ENV 1993-1-2: 1995

Eurocode 3 – Calcul des structures en acier –
Partie 1-2: Règles générales – Calcul du comportement au feu;
Version allemande ENV 1993-1-2: 1995

Archiv

Diese Europäische Vornorm ENV 1993-1-2: 1995 wurde im Auftrag der KEG fertiggestellt und wird vom CEN bzw. von dessen Mitgliedern veröffentlicht.

Zu dieser Vornorm wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Nationales Vorwort

Die Anwendung ist in Deutschland nur in Verbindung mit dem Nationalen Anwendungsdokument zu Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-2; Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall¹⁾ und den entsprechenden bauaufsichtlichen Erlassen möglich.

Dieses Anwendungsdokument gilt zusammen mit den bauaufsichtlichen Erlassen als das Nationale Anwendungsdokument für Deutschland gemäß Vorwort von (13) bis (15). Das Vorwort gibt weiterhin spezielle Hinweise auf Besonderheiten dieser Vornorm.

Bei der Vorbereitung der deutschen Übersetzung wurde, soweit dies möglich war, auf die sprachlichen Regelungen und Formulierungen des Deutschen Normenwerkes zurückgegriffen.

Stellungnahmen zur DIN V ENV 1993-1-2 sind erbeten an den Normenausschuß Bauwesen, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

¹⁾ Zu beziehen durch den Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, 50672 Köln (Herausgeber: NABau im DIN – Deutsches Institut für Normung e.V.)

Fortsetzung 66 Seiten ENV

Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

EUROPÄISCHE VORNORM

ENV 1993-1-2

EUROPEAN PRESTANDARD

PRENORME EUROPEENNE

September 1995

ICS 13.220.20; 91.040.00; 91.080.10

Deskriptoren: Bauwesen, Stahlbau, Baustahl, Entwurf, Sicherheitsanforderungen, Unfallverhütung, Brandschutz, Feuerwiderstand, Werkstoffverhalten, thermische Eigenschaften, Bemessung, Festigkeitseigenschaften

Deutsche Fassung

Eurocode 3

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

Teil 1.2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall

Eurocode 3 - Design of steel structures
Part 1.2: General rules - Structural fire
design

Eurocode 3 - Calcul des structures en
acier - Partie 1.2: Règles générales -
Calcul du compartement au feu

Diese Europäische Vornorm (ENV) wurde von CEN am 1993-11-05 als eine künftige Norm zur vorläufigen Anwendung angenommen. Die Gültigkeit dieser ENV ist zunächst auf drei Jahre begrenzt. Nach zwei Jahren werden die Mitglieder des CEN gebeten, ihre Stellungnahmen abzugeben, insbesondere über die Frage, ob die ENV in eine Europäische Norm (EN) umgewandelt werden kann.

Die CEN-Mitglieder sind verpflichtet, das Vorhandensein dieser ENV in der gleichen Weise wie bei einer EN anzukündigen und die ENV auf nationaler Ebene unverzüglich in geeigneter Weise verfügbar zu machen. Es ist zulässig, entgegenstehende nationale Normen bis zur Entscheidung über eine mögliche Umwandlung der ENV in eine EN (parallel zur ENV), beizubehalten.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Luxemburg, Niederlande, Norwegen, Österreich, Portugal, Schweden, Schweiz, Spanien und dem Vereinigten Königreich.

CEN

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization
Comité Européen de Normalisation

Zentralsekretariat: rue de Stassart 36, B-1050 Brüssel

© 1995 Das Copyright ist den CEN-Mitgliedern vorbehalten

Ref.No ENV 1993-1-2 : 1995 D

Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Zielsetzung der Eurocodes	3
Hintergrund des Eurocode-Programms	3
Eurocode-Programm	3
Nationale Anwendungsdokumente (NAD)	4
Besondere Hinweise zu dieser Vornorm	4
1 Allgemeines	6
1.1 Anwendungsbereich	6
1.2 Unterscheidung von verbindlichen Regeln und nicht verbindlichen Regeln	6
1.3 Normative Verweisungen	7
1.4 Definitionen	8
1.5 Symbole und Abkürzungen	10
1.6 Einheiten	11
2 Grundlagen	11
2.1 Grundlegende Anforderungen	11
2.2 Einwirkungen	11
2.3 Bemessungswerte der Materialeigenschaften	11
2.4 Nachweisverfahren	12
3 Materialeigenschaften	14
3.1 Allgemeines	14
3.2 Mechanische Materialeigenschaften von Stahl	15
3.3 Thermische Materialeigenschaften	18
4 Tragwerksbemessung für den Brandfall	21
4.1 Allgemeines	21
4.2 Vereinfachte Berechnungsverfahren	22
4.3 Allgemeine Berechnungsverfahren	35
Anhand A (informativ)	
Spannungsdehnungsbeziehungen bei erhöhten Temperaturen (ohne Verfestigung)	37
Anhang B (normativ)	
Verfestigung von Stahl unter erhöhter Temperatur	43
Anhang C (normativ)	
Wärmeübertragung auf außenliegende Stahlbauteile	45
C.1 Allgemeines	45
C.2 Nicht direkt beflamnte Stützen	48
C.3 Nicht direkt beflamnte Träger	54
C.4 Direkt beflamnte Stützen	57
C.5 Voll oder teilweise beflamnte Träger	59
Anhang D (informativ)	
Konfigurationsfaktor	64

Vorwort

Zielsetzung der Eurocodes

- (1) Die Eurocodes für den Konstruktiven Ingenieurbau bilden eine Gruppe von Normen für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Tragwerken des Hoch- und Ingenieurbaus und geotechnische Bemessungsregeln für bauliche Anlagen.
- (2) Sie behandeln die Bauausführung und Güteüberwachung nur soweit, wie dies zur Feststellung von Qualitätsforderungen an Bauprodukte und Bauausführung notwendig ist, um die bei der Tragwerksbemessung getroffenen Annahmen zu erfüllen.
- (3) Bis zum Vorliegen der erforderlichen Harmonisierten Technischen Spezifikationen für Produkte und für Verfahren zur Überprüfung der Produkteigenschaften behandeln einige Eurocodes für den Konstruktiven Ingenieurbau bestimmte Teilaspekte in informativen Anhängen.

Hintergrund des Eurocode-Programms

- (4) Die Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG) hat die Arbeiten an Harmonisierten Technischen Spezifikationen für den Entwurf, die Berechnung und Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauwerken eingeleitet, die zunächst als Alternative zu den in den jeweiligen Mitgliedsstaaten existierenden - jedoch voneinander abweichenden - Regeln dienen und sie schließlich ersetzen sollen. Diese technischen Regeln wurden als "Eurocodes für den Konstruktiven Ingenieurbau" bekannt.
- (5) Nach Konsultierung ihrer Mitgliedsstaaten übertrug die KEG im Jahre 1990 die Arbeiten zur weiteren Entwicklung, Herausgabe und Fortschreibung der Eurocodes für den Konstruktiven Ingenieurbau an CEN. Das EFTA-Sekretariat stimmte zu, die Arbeit von CEN zu unterstützen.
- (6) Das Technische Komitee CEN/TC 250 ist für alle Eurocodes des Konstruktiven Ingenieurbaus zuständig.

Eurocode-Programm

- (7) Gegenwärtig befinden sich folgende Eurocodes für den Konstruktiven Ingenieurbau in Bearbeitung, wobei jeder in der Regel mehrere Teile umfaßt:

EN 1991

Eurocode 1 Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke

EN 1992

Eurocode 2 Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken

EN 1993

Eurocode 3 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

EN 1994

Eurocode 4 Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton

EN 1995

Eurocode 5 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten

EN 1996

Eurocode 6 Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten

EN 1997 Eurocode 7

Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik

EN 1998 Eurocode 8

Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben

Seite 4
ENV 1993-1-2: 1995

EN 1999 Eurocode 9
Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen

- (8) Für die zuvor genannten Eurocodes hat das CEN/TC 250 einzelne Unter-Komitees eingesetzt.
- (9) Dieser Teil des Eurocodes für den Konstruktiven Ingenieurbau für die Bestimmung von Windlasten wurde als Europäische Vornorm (ENV) mit einer Laufzeit von zunächst drei Jahren herausgegeben.
- (10) Diese Vornorm ist sowohl für die praktische Erprobung bei Entwurf, Berechnung und Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauwerken im Rahmen des in Unterabschnitt 1.1.2 angegebenen Anwendungsbereichs als auch für Stellungnahmen gedacht.
- (11) Nach etwa zwei Jahren werden die CEN-Mitglieder um Stellungnahmen gebeten, die bei der Festlegung weiterer Arbeitsschritte Berücksichtigung finden.
- (12) Zwischenzeitlich sollten Hinweise und Stellungnahmen zu dieser Vornorm an das Sekretariat des Unterkomitees CEN/TC 250/SC 3 unter folgender Anschrift

DIN
NABau · Normenausschuß Bauwesen
D-10772 Berlin
Germany

SIS
Box 3295
S-103 66 Stockholm
Sweden

oder an ein anderes nationales Normungsinstitut gesandt werden.

Nationale Anwendungsdokumente (NAD)

(13) Im Hinblick auf die Verantwortlichkeit der zuständigen Behörden in den Mitgliedsländern für Sicherheit, Gesundheit und andere Sachverhalte, die durch die wesentlichen Anforderungen der Bauproduktenrichtlinie abgedeckt sind, wurden bestimmte Sicherheitselemente in dieser Vornorm als indikative Werte festgelegt, die durch Einrahmung gekennzeichnet sind. Es wird erwartet, daß die verantwortlichen Institutionen der einzelnen Mitgliedsländer diese Werte überprüfen und sie für nationale Anwendungen gegebenenfalls durch andere maßgebende Zahlenwerte dieser Sicherheitselemente ersetzen.

(14) Zum Zeitpunkt der Herausgabe dieser Vornorm werden einige der Harmonisierten Bezugsnormen noch nicht zur Verfügung stehen. Es wird deshalb erwartet, daß jedes Mitgliedsland oder sein nationales Normungsinstitut ein Nationales Anwendungsdokument (NAD) herausgibt, das endgültige Werte für die Sicherheitselemente, Querverweise auf Bezugsnormen sowie nationale Hinweise für die Anwendung dieser Vornorm enthält.

(15) Es wird beabsichtigt, daß diese Vornorm zusammen mit dem Nationalen Anwendungsdokument (NAD) angewandt wird, das in dem Land gültig ist, in dem sich das Hoch- oder Ingenieurbauwerk befindet.

Besondere Hinweise zu dieser Vornorm

(16) Die Arbeiten an den Teilen des Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau, die sich mit baulichem Brandschutz beschäftigen, wurden von der KEG ins Leben gerufen. Ein erster Entwurf wurde im Jahre 1990 als "Eurocode 3: Teil 10" herausgegeben.

(17) Mit der Übergabe der Arbeiten an den Eurocodes des konstruktiven Ingenieurbaus an CEN ist auch die Verantwortlichkeit für die Fertigstellung dieses Dokumentes an das technische Komitee CEN/TC 250, Abteilung CEN/TC 250/SC3 übergegangen.

(18) Der Geltungsbereich des Eurocode 3 ist in ENV 1993-1-1, Abschnitt 1.1.1 festgelegt. Auf weitere, geplante Teile des Eurocode 3 wird in Abschnitt 1.1.3 von ENV 1993-1-1 hingewiesen.

(19) Das Hauptziel des Brandschutzes ist die Begrenzung von Gefahren im Hinblick auf Personen, das Gemeinwesen, benachbartes Eigentum und, falls erforderlich, auf Vermögenswerte im Brandfall.

(20) Die Eurocodes behandeln bestimmte Möglichkeiten des passiven Brandschutzes hinsichtlich der Planung von Tragwerken und Teilen davon - mit dem Ziel einer ausreichenden Tragfähigkeit und der Begrenzung der Brandausbreitung.

(21) Die Anforderungen an den baulichen Brandschutz werden im allgemeinen von den nationalen Behörden, meist in Form von Feuerwiderstandsdauern, festgeschrieben. Soweit im Rahmen eines aufwendigeren für den Brandsicherheitsnachweis passive und aktive Maßnahmen berücksichtigt werden dürfen, können die Anforderungen anders definiert sein und verschiedene Vorgehensweisen erlauben.

(22) Dieser Teil 1.2 ist zusammen mit ENV 1991-2-2 eine Ergänzung der ENV 1993-1-1, so daß auf Grundlage dieser Eurocodes Tragwerke so bemessen werden können, daß sie Brandschutzanforderungen erfüllen.

(23) Zusätzliche Anforderungen, wie zum Beispiel:

- die Installation und Wartung von Sprinkleranlagen
- die Nutzung des Gebäudes oder des Brandabschnitts
- die Anwendung von Bekleidungs- und Isoliermitteln einschließlich deren Wartung werden in dieser Norm nicht behandelt, weil dies durch die nationalen Behörden geregelt wird.

(24) Diese ENV enthält ein Verfahren für die Anwendung von Verformungskriterien für das Tragwerk, wenn die Ziele des Brandschutzes oder die Bemessungskriterien raumabschließender Bauteile dies erfordern (siehe 2.1(2), 3.2.1(6), 4.2.1(6) und 4.2.2(5)). Jedoch werden für seine Anwendung keine bestimmten Vorschriften gegeben. Wo solche Überlegungen als notwendig betrachtet werden, sollte die Regelung in dem NAD getroffen werden.

(25) Ein rein rechnerisches Verfahren für die Tragwerksbemessung im Brandfall enthält eine vollständige Berechnung des Tragverhalten der Konstruktion unter erhöhter Temperatur, der Temperaturentwicklung im Tragwerk und den günstigen Einfluß aktiver Brandschutzmaßnahmen. Dabei sind Sicherheitsbetrachtungen hinsichtlich dieser drei Einflüsse und die Wichtigkeit der Konstruktion (Folgen des Versagens) zu beachten.

(26) Zur Zeit ist es möglich, Berechnungen durchzuführen, die einige, wenn nicht alle dieser Parameter berücksichtigen und nachweisen, daß die Konstruktion oder Teile davon in einem wirklichen Brandfall ausreichend tragfähig sind. Die in den europäischen Ländern hauptsächlich verwendeten Verfahren beruhen jedoch auf Versuchsergebnissen unter Normbrand. Die Anforderungen in den nationalen Regeln, die für bestimmte Zeitspannen Feuerwiderstand fordern, berücksichtigen (,wenn auch nicht ausdrücklich) die oben beschriebenen Einflüsse und Sicherheitsaspekte.

(27) Bedingt durch die Grenzen des Versuchsverfahrens, darf auf frühere Versuche oder Berechnungen zurückgegriffen werden. Trotzdem liefern Normbrandversuche die Masse der Eingabewerte für die Tragwerksbemessung im Brandfall. Daher beschäftigt sich diese Vornorm in erster Linie mit der Feuerwiderstandsfähigkeit unter Normbrandbedingungen.

(28) In dieser Vornorm werden vereinfachte Berechnungsverfahren vorgestellt. Sie enthält daher keine Bemessungstabellen. Es wird erwartet, daß Tabellen oder andere Bemessungshilfen auf Grundlage der in dieser Vornorm beschriebenen Verfahren von anderen Einrichtungen vorbereitet und eingefügt werden.

1 Allgemeines

1.1 Anwendungsbereich

(1)P Dieser Teil 1.2 der ENV 1993 behandelt Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlkonstruktionen für den außergewöhnlichen Fall der Brandbeanspruchung und muß in Verbindung mit ENV 1993-1-1 und ENV 1991-2-2 angewendet werden. Dieser Teil 1.2 behandelt nur Abweichungen oder Ergänzungen zu Entwurf, Berechnung und Bemessung unter Normaltemperaturen.

(2)P Dieser Teil 1.2 behandelt ausschließlich Methoden des passiven Brandschutzes. Aktive Methoden werden nicht behandelt.

(3)P Dieser Teil 1.2 gilt für Tragwerke, die aus Gründen der allgemeinen Brandsicherheit unter Brandbeanspruchung nicht vorzeitig versagen dürfen (lasttragende Funktion).

(4)P Dieser Teil 1.2 enthält Grundsatz- und Anwendungsregeln (siehe 1.2) für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Tragwerken für bestimmte Anforderungen in Hinblick auf die zuvor angegebene Funktion (Absatz (3)P) und dem Grad dieser Anforderung.

(5)P Dieses Dokument gilt nur für Tragwerke oder Tragwerksteile, die im Geltungsbereich der ENV 1993-1-1 liegen und dementsprechend entworfen, berechnet und bemessen wurden.

(6)P Die in diesem Dokument angegebenen Verfahren dürfen ebenfalls auf kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche angewendet werden, die innerhalb des Geltungsbereichs der ENV 1993-1-3 liegen.

(7)P Zum Feuerwiderstand von Verbundkonstruktionen aus Stahl und Beton siehe ENV 1994-1-2.

(8)P Die in diesem Dokument angegebenen Verfahren sind auf alle Stahlgüten, von denen die Materialeigenschaften verfügbar sind, anwendbar.

(10)P Die Stahleigenschaften, die in diesem Dokument angegeben werden gelten für die Stahlgüten S 235, S 275 und S 355 der EN 10025 und für alle Stahlgüten der EN 10113, EN 10155, EN 10210-1 und EN 10219-1.

1.2 Unterscheidung von verbindlichen Regeln und nicht verbindlichen Regeln

(1) In dieser vorliegenden Norm wird in Abhängigkeit von der Art der Regel zwischen verbindlichen Regeln und nicht verbindlichen Regeln (Anwendungsregeln) unterschieden.

(2) Die verbindlichen Regeln enthalten:

- allgemeine Angaben und Festlegungen, die unbedingt einzuhalten sind, sowie
- Anforderungen und Rechenmodelle, für die keine Abweichungen erlaubt sind, sofern dies nicht ausdrücklich angegeben ist.

(3) Die verbindlichen Regeln sind durch ein P nach der Nummer des Paragraphen gekennzeichnet.

(4) Die nicht verbindlichen Regeln sind grundsätzlich zu beachtende Regeln, die sich aus den verbindlichen Regeln ergeben und deren Anforderungen erfüllen.

(5) Es ist zulässig, alternative Regeln anzuwenden, die von den nicht verbindlichen Regeln dieses Eurocode abweichen, wenn nachgewiesen wird, daß diese alternativen Regeln im Einklang mit den jeweils zugehörigen verbindlichen Regeln stehen und mindestens dieselbe Zuverlässigkeit aufweisen.

(6) In diesem vorliegenden Teil von ENV 1991 sind die nicht verbindlichen Regeln mit einer Zahl in Klammern gekennzeichnet, wie zum Beispiel dieser Absatz.

1.3 Normative Verweisungen

Diese Europäische Vornorm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Normen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Europäischen Vornorm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

EN 10025

Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen; Technische Lieferbestimmungen

EN 10113

Warmgewalzte Erzeugnisse aus schweißgeeigneten Feinkornbaustählen

Teil 1: Allgemeine Lieferbedingungen

Teil 2: Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte Stähle

Teil 3: Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle

EN 10155

Wetterfeste Baustähle; Technische Lieferbestimmungen

EN 10210

Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und Feinkornbaustählen

Teil 1: Technische Lieferbedingungen

EN 10219

Kaltgeformte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und Feinkornbaustählen

Teil 1: Technische Lieferbedingungen

prEN ISO 834

Brandprüfungen der Feuerwiderstandsdauer -

Teil 1: Allgemeine Anforderungen

prENV yyy5

Brandprüfungen für Bauteile - Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen -

Teil 1: Durch horizontal angeordnete Schutzbekleidungen

Teil 2: Durch vertikal angeordnete Schutzbekleidungen

Teil 4: Durch Schutzschichten auf tragende Bauteile

ENV 1991 Eurocode 1:

Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke -

Teil 2-2: Brandeinwirkungen auf Tragwerke

ENV 1993 Eurocode 3:

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten -

Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau

Teil 1-3: Kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche

ENV 1994 Eurocode 4:

Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl- und Beton -

Teil 1-2: Ergänzende Regeln für brandschutztechnische Bemessung

ISO 1000 SI Einheiten

1.4 Definitionen

(1) Für den Anwendungsbereich dieses Teil 1.2 der ENV 1993 gelten die folgenden Definitionen

1.4.1 Konfigurationsfaktor ϕ [-]: Verhältnis zwischen dem Raumwinkel, unter dem von einem bestimmten Punkt der Bauteiloberfläche die strahlende Umgebung gesehen werden kann, und 2π .

1.4.2 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient: Konvektiver Wärmefluß zum Bauteil bezogen auf die Differenz zwischen Umgebungs- und Oberflächentemperatur.

1.4.3 Kritische Stahltemperatur : Stahltemperatur, bei der unter einer gegebenen Belastung und gleichförmiger Temperaturverteilung Versagen in einem Stahlbauteil erwartet wird.

1.4.4 Bemessungsbrand : Definierter Brandverlauf, der für die Brandbemessung zugrunde gelegt wird.

1.4.5 effektive Streckgrenze : Spannung, bei der die Spannungs-Dehnungsbeziehung bei einer gegebenen Temperatur ein Fließplateau aufweist.

1.4.6 außenliegende Bauteile : Bauteile außerhalb von Gebäuden, die dem Feuer durch Öffnungen in den Fassaden oder Dächern ausgesetzt sein können.

1.4.7 Brandabschnitt : Ein Gebäudebereich über ein oder mehrere Geschosse, der von raumabschließenden Bauteile derart umschlossen ist, daß eine Brandweiterleitung in andere Gebäudebereiche während der maßgebenden Brandbeanspruchung verhindert wird.(fire compartment)

1.4.8 Brandschutzmaterial : Durch Brandprüfungen untersuchtes Material, welches während der Feuerwiderstandsdauer nicht abfällt und ausreichende Isoliereigenschaften behält.(fire protection material)

1.4.9 Feuerwiderstandsfähigkeit : Fähigkeit eines Tragwerkes, eines Tragwerkteiles oder eines Bauteiles, die geforderte Funktion (Tragfähigkeit und/oder Raumabschluß) für eine bestimmte Brandbeanspruchung und für eine bestimmte Zeitdauer zu erfüllen. (fire resistance)

ANMERKUNG : Bei Stahlbauteilen beschränkt sich die Funktion auf die Tragfähigkeit.

1.4.10 Brandwand : Trennwand zwischen zwei Brandabschnitten (im allgemeinen zwei Gebäude), die neben der Feuerwiderstandsfähigkeit mechanische Widerstandsfähigkeit gegen horizontale Stoßbeanspruchung aufweist, so daß auch im Falle eines Brandes ggf. Tragwerksversagen in einem Abschnitt die Brandweiterleitung in den anderen Abschnitt verhindert wird.(fire wall)

1.4.11 Gesamttragwerksberechnung (im Brandfall): Berechnung des Gesamttragwerks, wenn entweder das gesamte Tragwerk oder lediglich Teile davon brandbeansprucht sind. Indirekte Brandeinwirkungen werden im ganzen Tragwerk berücksichtigt.(global structural analysis)

1.4.12 indirekte Brandeinwirkungen : Dehnungen, Verformungen oder Kräfte und Momente, die durch thermisch bedingte Verformungen oder Verdrehungen entstehen.(indirect fire actions)

1.4.13 Tragfähigkeitskriterium : Nachweiskriterium für die Standsicherheit von Tragwerken gegenüber bestimmten Einwirkungen während des maßgebenden Brandes.(load bearing criterion)

1.4.14 Tragfähigkeit : Fähigkeit von Tragwerken oder Bauteilen, bestimmten Einwirkungen während des maßgebenden Brandes Stand zu halten.(load bearing function)

1.4.15 Bauteilberechnung (im Brandfall): Thermische und mechanische Berechnung eines brandbeanspruchten Bauteils, bei dem das Bauteil abgetrennt mit geeigneten Auflager- und Randbedingungen untersucht wird. Indirekte Brandeinwirkungen werden nicht berücksichtigt mit Ausnahme der von Temperaturgradienten verursachten.(member analysis)

1.4.16 Netto-Wärmestrom : Von Bauteilen absorbierte Energie pro Zeiteinheit und Oberfläche.

1.4.17 Bemessung für Normaltemperatur : Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei normaler Umgebungstemperatur nach ENV 1993-1-1.(normal temperature design)

1.4.18 geschützte Bauteile : Bauteile, bei denen Maßnahmen ergriffen worden sind, um den Temperaturanstieg im Brandfall infolge Brandeinwirkung zu mindern. (protected members)

1.4.19 Profilkfaktor : Im Stahlbau: Verhältnis der dem Feuer ausgesetzten Bauteiloberfläche zum Stahlvolumen; bei bekleideten Bauteilen das Verhältnis Innenoberfläche der Bekleidung zum Stahlvolumen.(section factor)

1.4.20 raumabschließende Bauteile : Tragende und nicht tragende Bauteile mit raumabschließender Funktion. (separating member)

1.4.21 Normbrandbeanspruchung : Beanspruchung durch eine veränderliche Lufttemperatur, deren zeitlicher Verlauf der Normbrandkurve (Einheitstemperaturzeitkurve) entspricht. (standard fire exposure)

1.4.22 Feuerwiderstand bei Normbrand : Fähigkeit eines Tragwerks oder tragwerksteiles (i.a. nur Bauteile) die geforderten Funktionen (Tragfähigkeit und/oder Raumabschluß) unter einer Brandbeanspruchung gemäß Einheitstemperaturzeitkurve für die festgelegte Zeitdauer zu erfüllen.(standard fire resistance)

ANMERKUNG: Die Anforderungen an den Feuerwiderstand bei Normbrand werden normalerweise durch Zeiträume, wie z.B. 30, 60 oder mehr Minuten, angegeben.

1.4.23 Einheitstemperaturzeitkurve: Nominelle Temperaturzeitkurve nach ENV 1991-2-2.(standard temperature-time curve)

1.4.24 tragende Bauteile : Die lastabtragenden Bauteile einschließlich der Aussteifungen. (structural members)

1.4.25 Berechnung von Teiltragwerken im Brandfall: Berechnung eines brandbeanspruchten Teiltragwerks, bei dem der betrachtete Teil des Tragwerks herausgetrennt, mit eigenen Auflager- und Randbedingungen untersucht wird. Indirekte Brandeinwirkungen werden innerhalb des Teiltragwerks berücksichtigt, jedoch keine zeitabhängige Interaktion mit anderen Bauteilen des Tragwerks.(sub-assembly analysis)

ANMERKUNG 1: Wenn indirekte Brandeinwirkungen innerhalb des Tragwerks vernachlässigbar sind, wird die Berechnung des Teiltragwerks entsprechend einer Bauteilberechnung durchgeführt.

ANMERKUNG 2: Wenn indirekte Brandeinwirkungen zwischen den Teiltragwerken vernachlässigt werden können, ist die Berechnung des Teiltragwerks entsprechend der Berechnung eines Gesamttragwerks durchzuführen.

1.4.26 Auflager- und Randbedingungen : Schnittgrößen und Verformungsbehinderungen an Auflagern und Rändern bei der Berechnung des Gesamttragwerks oder einzelner Teile des Tragwerks.(support and boundary conditions)

1.4.27 Temperaturberechnung : Berechnung der Temperatur in Bauteilen auf Grundlage der thermischen Einwirkungen (Netto-Wärmestrom), der thermischen Materialeigenschaften der Bauteile und ggf. von schützenden Oberflächen.(temperature analysis)

1.4.28 Temperaturzeitkurven : Brandgastemperaturen in der Umgebung der Bauteiloberflächen als Funktion der Zeit. Das können sein:

- **nominelle**, in Form von konventioneller Kurven, die für die Klassifizierung oder den Nachweis des Feuerwiderstandes anerkannt sind, z.Bsp. die Einheitstemperaturzeitkurve

- **parametrische**, d.h. auf der Grundlage von Brandmodellen und den spezifischen physikalischen Parametern, die die Bedingungen im Brandabschnitt beschreiben.

1.4.29 thermische Einwirkungen : Einwirkungen auf das Tragwerk, die durch den Netto-Wärmestrom zu den Bauteilen beschrieben werden. (thermal actions)

1.5 Symbole und Abkürzungen

1.5.1 Ergänzend zur ENV 1993-1-1 werden die folgenden Symbole und Abkürzungen verwendet:

- A_m längenbezogene Bauteiloberfläche;
 A_p auf die Bauteillänge bezogene innere Oberfläche des Brandschutzmaterials;
 E_a Elastizitätsmodul bei normaler Temperatur;
 $E_{a,\theta}$ Elastizitätsmodul bei erhöhter Temperatur θ_a ;
 $E_{fi,d}$ Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung im Brandfall;
 $R_{d,\theta}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit bei gleichmäßiger erhöhter Materialtemperatur θ ;
 $R_{fi,d}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit im Brandfall;
 $R_{fi,d,t}$ Bemessungswert der Beanspruchbarkeit im Brandfall zum Zeitpunkt t ;
 T Temperatur [K] (cf θ Temperatur [°C]);
 V längenbezogenes Volumen des Bauteils;
 $X_{fi,d}$ Bemessungswert der Materialeigenschaft im Brandfall;
 X_k charakteristische Wert der Materialeigenschaft;
 $X_{k,\theta}$ charakteristische Wert der Materialeigenschaft unter erhöhter Temperatur θ ;
 c spezifische Wärmekapazität [J/kgK];
 d_p Dicke des Brandschutzmaterials;
 $f_{p,\theta}$ Proportionalitätsgrenze von Stahl bei erhöhter Temperatur θ_a ;
 $f_{y,\theta}$ effektive Fließgrenze von Stahl bei erhöhter Temperatur θ_a ;
 $\dot{h}_{net,d}$ Bemessungswert des Netto-Wärmestroms bezogen auf die Fläche;
 k_θ bezogene Wert der Festigkeits- oder Verformungseigenschaft von Stahl unter erhöhter Temperatur θ_a ;
 l Länge bei 20 °C;
 Δl Verlängerung infolge der Temperatur;
 t Dauer der Brandbeanspruchung [Minuten];
 Δt Zeitintervall [Sekunden];
 η_{fi} Abminderungsfaktor der Bemessungslasten im Brandfall;
 θ Temperatur [°C] (cf T Temperatur [K]);
 κ Anpassungsfaktor;
 λ Wärmeleitfähigkeit [W/mK];
 μ_0 Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt $t = 0$.

1.5.2 Ergänzend zur ENV 1993-1-1 werden die folgenden Indizes verwendet:

- a Stahl;
- c Verbindung;
- fi für den Brandfall maßgebender Wert;
- m Bauteil;
- p Brandschutzmaterial;
- t zeitabhängig;
- θ temperaturabhängig;

1.5.3 In den Anhängen C und D werden weitere Symbole und Abkürzungen verwendet, die dort definiert werden, wo sie das erste Mal erscheinen.

1.6 Einheiten

(1)P Es müssen SI Einheiten gemäß ISO 1000 verwendet werden.

(2) Ergänzend zu ENV 1993-1-1 werden für Berechnungen die folgenden Einheiten empfohlen:

- Fläche : m^2 ;
- Dicke der Isolierung : m;
- Temperatur : $^{\circ}C$;
- absolute Temperatur : K;
- Temperaturdifferenz : K;
- spezifische Wärme : J/kgK;
- Wärmeleitfähigkeit : W/mK.

2 Grundlagen

2.1 Grundlegende Anforderungen

(1)P Wenn Tragfähigkeit im Brandfall gefordert ist, müssen Stahltragwerke so konstruiert und bemessen werden, daß sie ihre Tragfunktion während der maßgebenden Brandeinwirkung erfüllen.

(2)P Verformungskriterien für die lasttragende Konstruktion sind zu beachten, wenn Schutzziele oder Anforderungen an raumabschließende Bauteile dies erfordern.

2.2 Einwirkungen

(1)P Die thermischen und mechanischen Einwirkungen sind ENV 1991-2-2 zu entnehmen.

(2) Wenn in diesem Teil 1.2 angegebene Regeln nur für Normbrandbeanspruchung gültig sind, wird dies in den entsprechenden Absätzen angegeben.

2.3 Bemessungswerte der Materialeigenschaften

(1)P Die Bemessungswerte der thermischen und mechanischen Materialeigenschaften $X_{fi,d}$ werden wie folgt definiert:

- thermische Eigenschaften für die Temperaturberechnung:
- falls sich höhere Werte günstig auf die Sicherheit auswirken:

$$X_{fi,d} = X_{k,\theta} / \gamma_{M,fi} \quad (2.1a)$$

- falls sich höhere Werte ungünstig auf die Sicherheit auswirken:

$$X_{fi,d} = \gamma_{M,fi} X_{k,\theta} \quad (2.1b)$$

- Festigkeits- und Verformungseigenschaften für die Tragwerksberechnung:

$$X_{fi,d} = k_{\theta} X_k / \gamma_{M,fi} \quad (2.1c)$$

Dabei ist:

$X_{k,\theta}$ der charakteristische Wert der Materialeigenschaft für die Brandbemessung, im allgemeinen temperaturabhängig (siehe Abschnitt 3)

X_k der charakteristische Wert einer Festigkeits- oder Verformungseigenschaft (im allgemeinen f_k oder E_k) bei Bemessung für Normaltemperatur nach ENV 1993-1-1

k_{θ} der Abminderungsfaktor für eine Festigkeits- oder Verformungseigenschaft ($X_{k,\theta}/X_k$), abhängig von der Materialtemperatur (siehe 3.2.1)

$\gamma_{M,fi}$ der Teilsicherheitsbeiwert der entsprechenden Materialeigenschaft im Brandfall

(2)P Bei thermischen Materialeigenschaften gilt der Teilsicherheitsbeiwert:

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

(3)P Bei mechanischen Eigenschaften gilt der Teilsicherheitsbeiwert:

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

2.4 Bemessungsmethoden

2.4.1 Allgemeines

(1)P Das für die Berechnung und Bemessung darf nach diesem Teil 1.2 der ENV 1993 herangezogene Tragwerksmodell muß das erwartete Tragverhalten der Konstruktion im Brandfall abbilden.

(2)P Die Tragwerksberechnung im Brandfall nach einem der folgenden Verfahren erfolgen:

- Gesamttragwerksberechnung, siehe 2.4.2;
- Berechnung von Teiltragwerken, siehe 2.4.3;
- Bauteilberechnung, siehe 2.4.4.

(3) Für den Nachweis des Feuerwiderstandes bei Normbrand ist eine Bauteilberechnung ausreichend.

(4)P Alternativ zu den Berechnungsverfahren darf eine Bemessung auf Grundlage von Versuchen durchgeführt werden.

2.4.2 Gesamttragwerksberechnung

(1)P Die Gesamttragwerksberechnung ist so auszuführen, daß sie die maßgebene Versagensfigur unter Brandbelastung, die temperaturabhängigen Materialeigenschaften und Bauteilsteifigkeiten erfaßt.

(2)P Es ist nachzuweisen, daß für maßgebende Dauer t der Brandeinwirkung

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (2.2)$$

gilt.

Dabei ist:

$E_{fi,d}$ der Bemessungswert der Einwirkungen im Brandfall nach ENV 1991-2-2 einschließlich der Temperaturdehnung und -verformung und

$R_{fi,d,t}$ der zugehörige Bemessungswert des Widerstands bei erhöhter Temperatur

2.4.3 Berechnung von Teiltragwerken

(1)P Alternativ zu der Berechnung des Gesamttragwerks unter verschiedenen Brandbeanspruchungen darf auch die Berechnung von geeigneten Teiltragwerken des Gesamttragwerks entsprechend Unterabschnitt 2.4.2 durchgeführt werden.

(2) Es darf angenommen werden, daß die Auflagerreaktionen und Zwischenreaktionen zwischen den Teiltragwerken, die zum Zeitpunkt $t=0$ auftreten, über die Dauer der Brandbeanspruchung unverändert bleiben.

(3) Alternativ zur Durchführung einer Gesamttragwerksberechnung für den Brandfall zum Zeitpunkt $t=0$, dürfen die Auflager und Zwischenreaktionen der Teiltragwerke wie folgt aus der Berechnung bei Normaltemperatur ermittelt werden:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (2.3)$$

Dabei ist:

E_d der Bemessungswert der entsprechenden Lasten für die Berechnung unter Normaltemperatur für die Grundkombination der Einwirkungen nach Gleichung (2.9) der ENV 1993-1-1

η_{fi} der Abminderungsfaktor der Bemessungslasten für den Brandfall

(4) Der Abminderungsfaktor der Bemessungslasten für den Brandfall η_{fi} ergibt sich nach folgender Gleichung:

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (2.4)$$

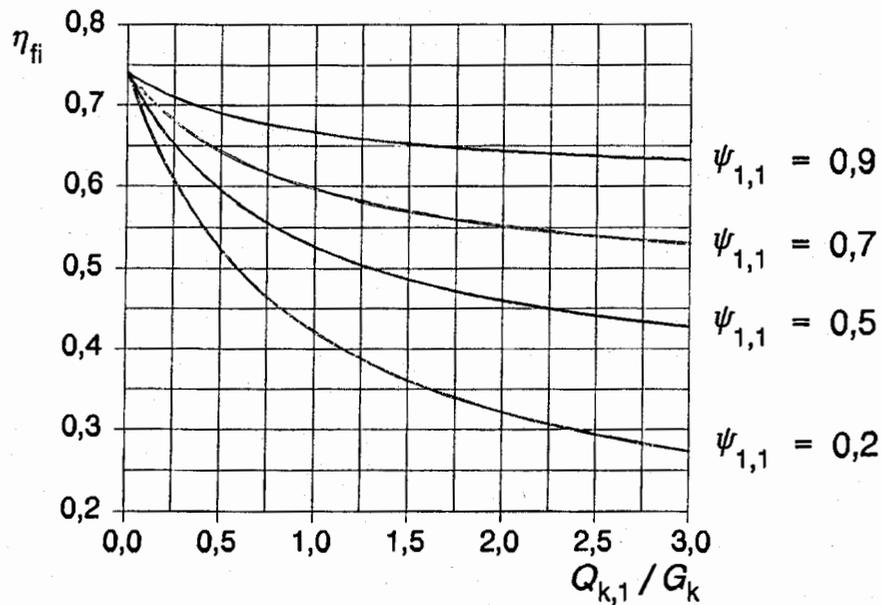
Dabei ist:

$Q_{k,1}$ die größte veränderliche Einwirkung;

γ_{GA} der Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen in außergewöhnlichen Belastungssituationen;

$\psi_{1,1}$ der Kombinationsbeiwert für häufige Einwirkungen nach Tabelle 9.3 der ENV 1991-1.

ANMERKUNG: Bild 2.1 zeigt die Abhängigkeit des Abminderungsfaktors η_{fi} von dem Lastverhältnis $Q_{k,1}/G_k$ für verschiedene Größen des Beiwertes $\psi_{1,1}$ mit $\gamma_{GA} = 1,0$, $\gamma_G = 1,35$ und $\gamma_Q = 1,5$.

Bild 2.1: Abhängigkeit des Abminderungsfaktors η_{fi} von dem Lastverhältnis $Q_{k,1} / G_k$

2.4.4 Bauteilberechnung

(1)P Alternativ zur Berechnung des Gesamttragwerks dürfen einzelne Bauteile für den Brandfall berechnet werden. Die Zwangsbedingungen an den Auflagerpunkten und Enden des Bauteils, die zum Zeitpunkt $t=0$ herrschen, dürfen im allgemeinen als konstant über die Dauer der Brandbeanspruchung angenommen werden. Es wird in den entsprechenden Absätzen darauf hingewiesen, wenn andere Bedingungen gelten.

(2) Die inneren Kräfte und Momente an den Auflagern und Enden der Bauteile, die zum Zeitpunkt $t=0$ auftreten, dürfen als konstant über die Dauer der Brandbeanspruchung angenommen werden.

(3) Alternativ zur Berechnung des Gesamttragwerks im Brandfall zum Zeitpunkt $t=0$, dürfen die inneren Kräfte und Momente an den Auflagern und Enden der Bauteile der Berechnung des Gesamttragwerks unter Normaltemperatur entnommen werden, wenn Gleichung (2.3) verwendet wird.

(4) Es brauchen nur die Folgen von Temperaturgradienten über den Querschnitt berücksichtigt zu werden. Die Folgen der Temperaturdehnung dürfen vernachlässigt werden.

3 Materialeigenschaften

3.1 Allgemeines

(1)P Die thermischen und mechanischen Materialeigenschaften des Stahls sind den folgenden Abschnitten zu entnehmen. Die Eigenschaften von Materialien, die darin nicht enthalten sind, sind den entsprechenden CEN Produktnormen oder den europäischen technischen Zulassungen (ETA) zu entnehmen.

(2)P Die in Abschnitt 3 angegebenen Werte der Werkstoffeigenschaften sind als charakteristische Werte zu betrachten, siehe 2.3.(1)P.

(3)P Die mechanischen Werkstoffeigenschaften von Stahl bei 20°C sind der ENV 1993-1-1 zu entnehmen.

3.2 Mechanische Materialeigenschaften von Stahl

3.2.1 Festigkeits- und Verformungseigenschaften

(1)P Die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Stahl unter erhöhter Temperatur und Erwärmungsgeschwindigkeiten zwischen 2 und 50 K/min sind der Spannungs-Dehnungsbeziehung in Bild 3.1 zu entnehmen.

(2) Diese Beziehung sollte für die Berechnung der Tragfähigkeiten auf Zug-, Druck-, Momenten- und Schubbeanspruchung verwendet werden.

(3) Tabelle 3.1 enthält die Abminderungsfaktoren für die Werte zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungsbeziehung von Stahl unter erhöhter Temperatur relativ zu der entsprechenden Größe bei 20 °C:

- effektive Streckgrenze, relativ zur Streckgrenze bei 20 °C:

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$$

- Proportionalitätsgrenze, relativ zur Streckgrenze bei 20 °C:

$$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$$

- Steigung im elastischen Bereich, relativ zu der Steigung bei 20 °C:

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$$

(4) Bild 3.2 stellt die Abhängigkeit dieser drei Abminderungsfaktoren von der Temperatur dar.

(5)P Alternativ darf bei Temperaturen unter 400 °C die in (1) angegebene Spannungs-Dehnungsbeziehung um die in Anhang B beschriebene Verfestigung erweitert werden. Voraussetzung dafür ist, daß lokales Beulen ausgeschlossen werden kann, so daß die erhöhte Spannung erreicht wird, und, daß Biegedrillknicken durch entsprechende Festhaltungen verhindert wird.

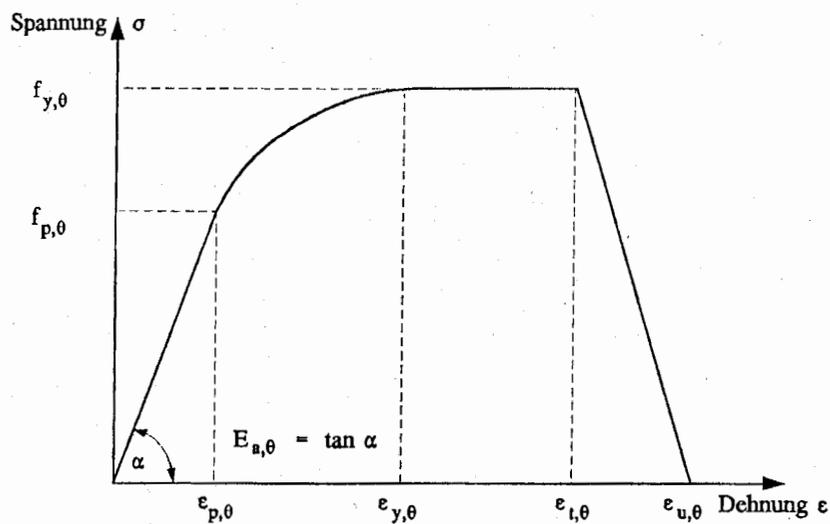
(6) Tabelle 3.1 enthält ebenfalls den Abminderungsfaktor $k_{x,\theta}$, der anstelle des Faktors $k_{y,\theta}$ verwendet wird, wenn Verformungskriterien zu erfüllen sind.

3.2.2 Dichte

(1)P Es darf angenommen werden, daß die Dichte von Stahl ρ_a unabhängig von der Temperatur ist. Der folgende Wert darf verwendet werden:

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

Dehnungsbereich	Spannung σ	Tangentenmodul
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parameter	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$	
Funktionen	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	



Dabei ist:

- $f_{y,\theta}$ effektive Fließgrenze;
- $f_{p,\theta}$ Proportionalitätsgrenze;
- $E_{a,\theta}$ Steigung im elastischen Bereich;
- $\varepsilon_{p,\theta}$ Dehnung an der Proportionalitätsgrenze;
- $\varepsilon_{y,\theta}$ Fließdehnung;
- $\varepsilon_{t,\theta}$ Grenzdehnung für die Streckgrenze;
- $\varepsilon_{u,\theta}$ Bruchdehnung;

Bild 3.1: Spannungs-Dehnungsbeziehung von Stahl unter erhöhter Temperatur

Tabelle 3.1: Abminderungsfaktoren für die Spannungs-Dehnungsbeziehung von Stahl unter erhöhter Temperatur

Stahltemperatur θ_a	Abminderungsfaktor bei Temperatur θ_a relativ zu dem Wert f_y oder E_a bei 20 °C			
	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die effektive Streckgrenze $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Modifizierter Faktor (relativ zu f_y) für die Erfüllung von Verformungskriterien $k_{x,\theta} = f_{x,\theta}/f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die Proportionali- tätsgrenze $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu E_a) für die Steigung im elastischen Bereich $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,922	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,845	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,770	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,615	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,354	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,167	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,087	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,051	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,034	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,017	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,000	0,0000	0,0000

ANMERKUNG: Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Abminderungsfaktor

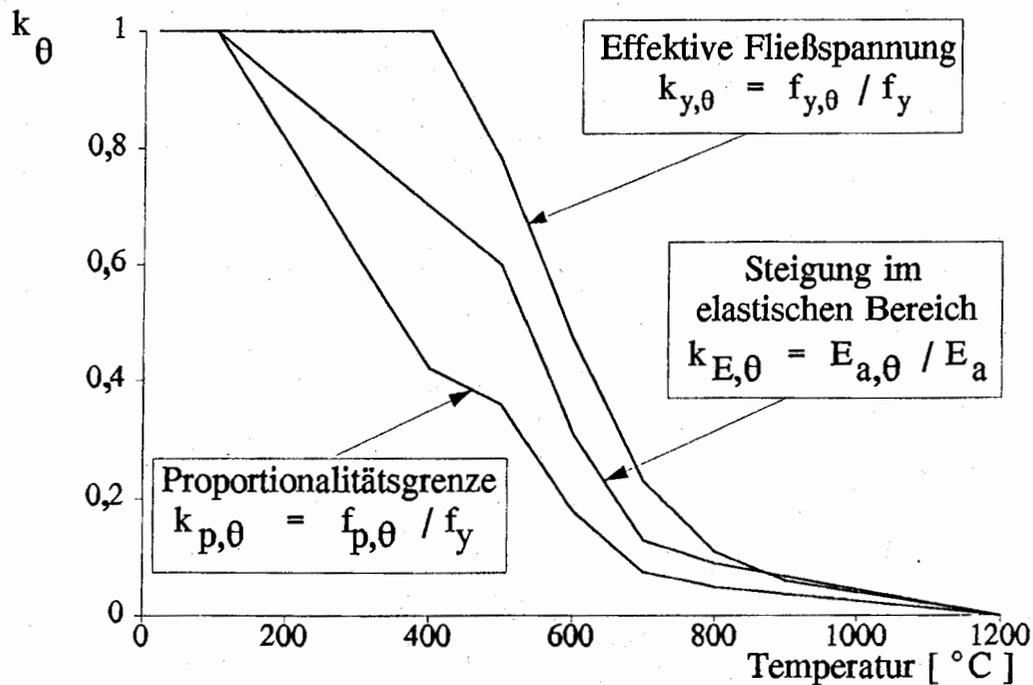


Bild 3.2: Abminderungsfaktoren für die Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Stahl unter erhöhten Temperaturen

3.3 Thermische Werkstoffeigenschaften

3.3.1 Stahl

3.3.1.1 Thermische Dehnung

(1)P Die thermische Dehnung von Stahl $\Delta l / l$ darf wie folgt bestimmt werden:- für $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta l / l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (3.1a)$$

- für $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta l / l = 1,1 \times 10^{-2} \quad (3.1b)$$

- für $860^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta l / l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (3.1c)$$

Dabei ist:

 l die Länge bei 20°C ; Δl die Verlängerung infolge der Temperatur; θ_a die Stahltemperatur [$^{\circ}\text{C}$].

(2) Die Abhängigkeit der Temperaturdehnung von der Temperatur wird in Bild 3.3 dargestellt.

(3)P Bei dem vereinfachten Berechnungsverfahren (siehe 4.2) darf angenommen werden, daß thermische Dehnung von Stahltemperatur unabhängig ist. In diesem Falle darf sie wie folgt berechnet werden:

$$\Delta l / l = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20) \quad (3.1d)$$

Dehnung $\Delta l / l$ [$\times 10^{-3}$]

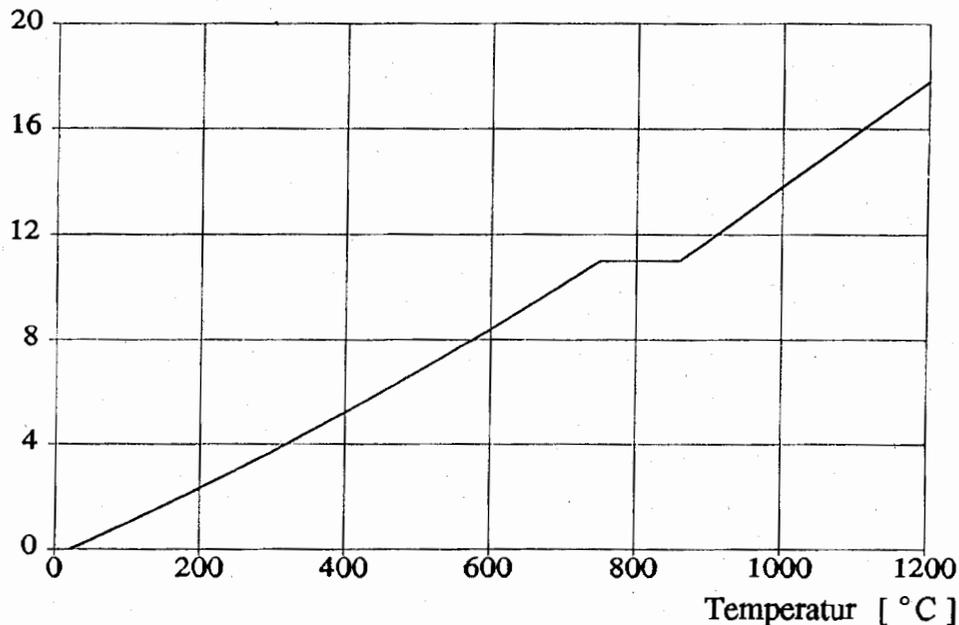


Bild 3.3: Thermische Dehnung von Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur

3.3.1.2 Spezifische Wärme

(1)P Die spezifische Wärme von Stahl c_a darf wie folgt ermittelt werden:

- für $20 \text{ °C} \leq \theta_a < 600 \text{ °C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \text{ J/kgK} \quad (3.2a)$$

- für $600 \text{ °C} \leq \theta_a < 735 \text{ °C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK} \quad (3.2b)$$

- für $735 \text{ °C} \leq \theta_a < 900 \text{ °C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK} \quad (3.2c)$$

- für $900 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ °C}$:

$$c_a = 650 \text{ J/kgK} \quad (3.2d)$$

Dabei ist:

θ_a die Stahltemperatur [°C].

(2) Die Abhängigkeit der spezifischen Wärme von der Temperatur wird in Bild 3.4 dargestellt.

(3)P Bei den vereinfachten Berechnungsverfahren (siehe 4.2) darf angenommen werden, daß die spezifische Wärme von der Stahltemperatur unabhängig ist. In diesem Falle darf die spezifische Wärme wie folgt angenommen werden:

$$c_a = 600 \text{ J/kgK} \quad (3.2e)$$

Spezifische Wärme [J / kg K]

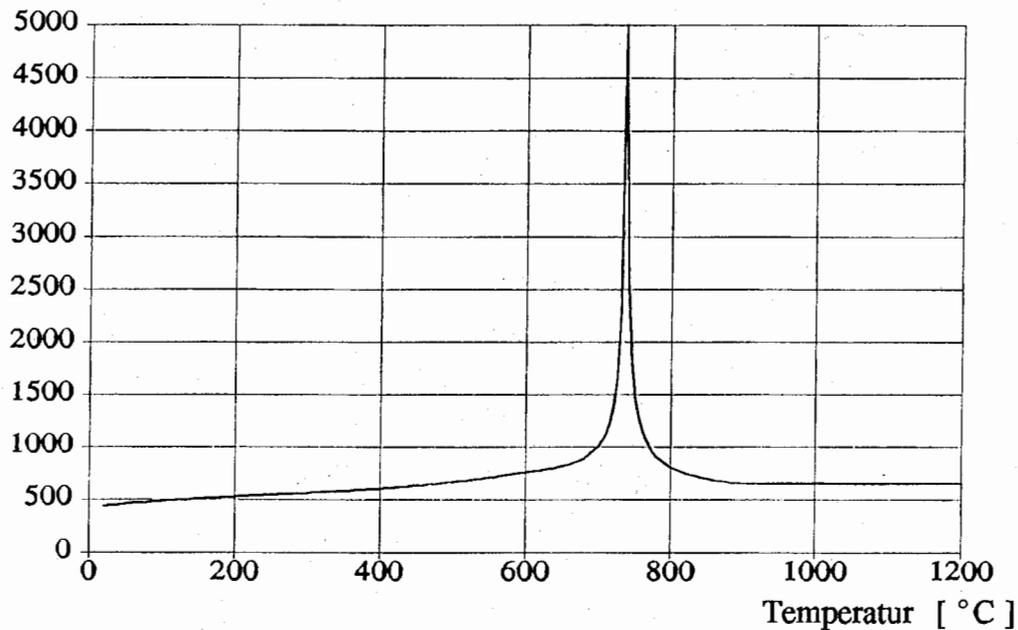


Bild 3.4: spezifische Wärme von Stahl in Abhängigkeit von der Temperatur

3.3.1.3 Wärmeleitfähigkeit

(1)P Die Wärmeleitfähigkeit von Stahl λ_a darf wie folgt bestimmt werden:

- für $20 \text{ °C} \leq \theta_a < 800 \text{ °C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK} \quad (3.3a)$$

- für $800 \text{ °C} \leq \theta_a \leq 1200 \text{ °C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK} \quad (3.3b)$$

mit:

θ_a Stahltemperatur [°C].

(2) Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur ist in Bild 3.5 dargestellt.

(3)P Bei den vereinfachten Berechnungsverfahren (siehe 4.2) darf angenommen werden, daß die Wärmeleitfähigkeit von der Stahltemperatur unabhängig ist. In diesem Fall darf die Wärmeleitfähigkeit wie folgt angenommen werden:

$$\lambda_a = 45 \text{ W/mK} \quad (3.3c)$$

Wärmeleitfähigkeit [W / mK]

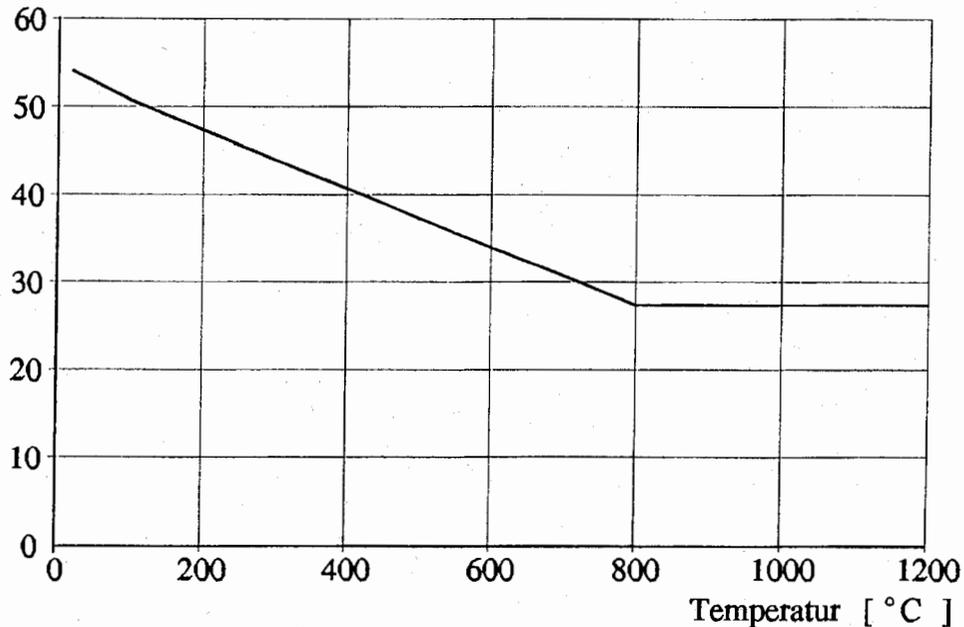


Bild 3.5: Wärmeleitfähigkeit von Stahl als Funktion der Temperatur

3.3.2 Brandschutzmaterialien

(1)P Die Eigenschaften und das Verhalten von Brandschutzmaterialien sind durch Versuche nach prENV yyy5-1, prENV yyy5-2 oder prENV yyy5-4 zu bestimmen.

ANMERKUNG : Dies gilt unter Annahme, daß diese Normen fordern, daß das Brandschutzmaterial im Laufe der Brandbeanspruchung an den Haltepunkten haften bleibt.

4 Tragwerksbemessung für den Brandfall

4.1 Allgemeines

(1)P Stahlkonstruktionen können entweder:

- ungeschützt,
- durch Brandschutzmaterialien geschützt,
- durch Wärmeschilde geschützt,
- durch jedes andere Verfahren, das den Temperaturanstieg im Stahl begrenzt, geschützt sein.

ANMERKUNG: Beispiele für andere Verfahren sind Wasserfüllung oder teilweiser Schutz von in Wänden und Decken.

(2)P Der Nachweis zum Tragwerksverhalten unter Brandbeanspruchung ist auf Grundlage einer der folgenden Ansätze oder einer Kombinationen davon, zu führen:

- vereinfachte Berechnungsverfahren, die auf einzelne Bauteile angewendet werden
- allgemeine Berechnungsverfahren

- Versuche

(3)P Vereinfachte Berechnungsverfahren ergeben sich aus vereinfachten Bemessungsansätzen, die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegend, liefern.

(4)P Allgemeine Berechnungsverfahren ergeben sich aus Bemessungsansätzen, die auf allgemeingültige Bemessungsgrundsätze derart basieren, daß die betrachteten Anwendungsbereiche realitätsbezogen erfaßt werden.

(5)P Wenn kein vereinfachter Berechnungsansatz angegeben ist, ist entweder eine Bemessung auf Grundlage des allgemeinen Berechnungsverfahrens oder auf Grundlage von Versuchen durchzuführen.

4.2 Vereinfachte Berechnungsverfahren

4.2.1 Allgemeines

(1)P Ein Bauteil erfüllt seine lasttragende Funktion zum Zeitpunkt t eines gegebenen Brandes, wenn:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (4.1)$$

mit :

$E_{fi,d}$ Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung im Brandfall, nach ENV 1991-2-2
 $R_{fi,d,t}$ entsprechender Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Stahlbauteils zum Zeitpunkt t .

(2)P Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit $R_{fi,d,t}$ zum Zeitpunkt t ist für die Temperaturverteilung im Querschnitt durch Anpassen der Beanspruchbarkeit unter normalen Temperaturen nach ENV 1993-1-1 zu ermitteln, wobei die mechanischen Eigenschaften von Stahl unter erhöhter Temperatur zu berücksichtigen sind. (siehe 4.2.3)

ANMERKUNG: In 4.2.3 wird $R_{fi,d,t}$ zu $M_{fi,t,Rd}$, $N_{fi,t,Rd}$ usw. (einzeln oder kombiniert) und die entsprechenden Werte $M_{fi,Ed}$, $N_{fi,Ed}$ usw. gelten für $E_{fi,d}$.

(3)P Alternativ darf die Bemessung unter Annahme gleichförmiger Temperaturverteilung auf Temperaturebene durchgeführt werden.

(4) Das Nettoquerschnittsversagen an den Löchern von Befestigungsmitteln braucht nicht berücksichtigt zu werden, wenn jedes Loch ausgefüllt ist, weil die Temperatur im Bereich von Verbindungen durch die größere Materialmenge geringer ist.

(5)P Die Tragfähigkeit von Verbindungen braucht nicht nachgewiesen zu werden, wenn die Widerstandsfähigkeit der Bekleidung der Verbindung gegen Temperaturbeanspruchung $(d_f / \lambda_f)_c$ mindestens der Widerstandsfähigkeit der Bekleidung $(d_f / \lambda_f)_m$ der angeschlossenen Bauteile entspricht.

Dabei ist:

d_f die Dicke der Bekleidung - bei unverkleideten Bauteilen gilt $d_f = 0$
 λ_f effektive Wärmeleitfähigkeit des Bekleidungsmaterials

(6) Wenn die Ziele des Brandschutzes oder die Bemessungskriterien für raumabschließende Bauteile die Berücksichtigung von Verformungskriterien erfordern (siehe 2.1(2)) sollte die Bemessung nach Unterabschnitt 4.2.3 erfolgen. Dafür sind die Abminderungswerte für die effektive Streckgrenze $k_{y,\theta}$ und $k_{y,\theta,max}$ bei den Temperaturen θ_a und $\theta_{a,max}$ durch die Abminderungsfaktoren $k_{x,\theta}$ and $k_{x,\theta,max}$ (siehe 3.2.1 und Tabelle 3.1) zu ersetzen.

4.2.2 Querschnittsklassifizierung

(1) Die Querschnittsklassifizierung nach ENV 1993-1-1 Abschnitt 5.3 sollte die Spannungs-Dehnungsbeziehung von Stahl bei erhöhter Temperatur bei einer Bemessung für den Brandfall berücksichtigen.

(2) Ein druckbeanspruchtes Bauteil darf ohne Änderung wie bei einer Bemessung unter Normaltemperatur klassifiziert werden.

(3) Ein Einfeldträger mit einer Beton- oder Verbunddecke auf dem Druckflansch und Brandbeanspruchung auf den anderen drei Seiten darf ohne Änderung wie bei einer Bemessung unter Normaltemperatur klassifiziert werden.

(4) Jedes andere Bauteil darf wie bei einer Bemessung unter Normaltemperatur bemessen werden, jedoch mit einem abgeänderten Wert für ϵ in Tabelle 5.3.1 der ENV 1993-1-1 :

$$\epsilon = [(235 / f_y)(k_{E,\theta} / k_{y,\theta})]^{0.5} \quad (4.2)$$

(5) Wenn Verformungskriterien beachtet werden, siehe 2.1(2), darf das Bauteil ohne Änderung wie bei einer Bemessung unter Normaltemperatur klassifiziert werden.

4.2.3 Tragfähigkeit

4.2.3.1 Zugbeanspruchte Bauteile

(1) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit $N_{fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t eines auf Zug beanspruchten Bauteils mit einer ungleichförmigen Temperaturverteilung über den Querschnitt darf wie folgt berechnet werden:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (4.3)$$

Dabei ist:

A_i Teilfläche des Querschnitts mit der Temperatur θ_i ,

$k_{y,\theta,i}$ der Abminderungsfaktor der Streckgrenze von Stahl, siehe 3.2.1;

θ_i die Temperatur der Teilfläche A_i .

(2) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit $N_{fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t eines auf Zug beanspruchten Bauteils mit einer ungleichförmigen Temperaturverteilung über den Querschnitt darf konservativ als die Tragfähigkeit eines Bauteils mit konstanter Temperatur θ_a über den Querschnitt bestimmt werden, wobei θ_a die maximal im Querschnitt auftretende Temperatur $\theta_{a,max}$ ist.

(3) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit $N_{fi,\theta,Rd}$ eines auf Zug beanspruchten Bauteils mit konstanter Temperatur über den Querschnitt sollte wie folgt berechnet werden:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi}] \quad (4.4)$$

Dabei ist:

$k_{y,\theta}$ der Abminderungsfaktor der Streckgrenze von Stahl unter erhöhter Temperatur bei der Temperatur θ_a , siehe 3.2.1

N_{Rd} der Bemessungswert der Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts $N_{pl,Rd}$ bei Berechnung unter Normaltemperatur, siehe Abschnitt 5.4.3 der ENV 1993-1-1.

4.2.3.2 Druckbeanspruchte Bauteile mit Querschnitten der Klassen 1, 2 oder 3

(1) Der Grenzwert gegen Knicken druckbeanspruchter Bauteile $N_{b,fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t mit Querschnitten der Klassen 1, 2 oder 3 ergibt sich zu:

$$N_{b,fi,t,Rd} = [\chi_{fi} / 1,2] A k_{y,\theta,max} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (4.5)$$

Dabei ist:

χ_{fi} der Abminderungsfaktor für das Biegeknicken unter Brandbeanspruchung
 $k_{y,\theta,max}$ der Abminderungsfaktor für die Streckgrenze von Stahl unter maximaler Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ zum Zeitpunkt t nach Unterabschnitt 3.2.1.

ANMERKUNG: Die Konstante 1,2 in dieser Gleichung ist ein Korrekturfaktor der einige Einflüsse einschließlich der Abweichung der Dehnung im Bruchzustand $\epsilon_{y,\theta}$ berücksichtigt. Es handelt sich um einen empirischen Wert.

(2) Für den Wert χ_{fi} sollte der kleinere der beiden Werte $\chi_{y,fi}$ und $\chi_{z,fi}$ nach Unterabschnitt 5.5.1 der ENV 1993-1-1 genommen werden, es sei denn, es werden verwendet:

- die Knickspannungslinie c unabhängig von dem Querschnittstyp und der Knickrichtung
- die Knicklänge l_{fi} für die Brandbemessung anstelle von l
- und die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{\theta,max}$ für die Temperatur $\theta_{a,max}$:

$$\bar{\lambda}_{\theta,max} = \bar{\lambda} [k_{y,\theta,max} / k_{E,\theta,max}]^{0,5} \quad (4.6)$$

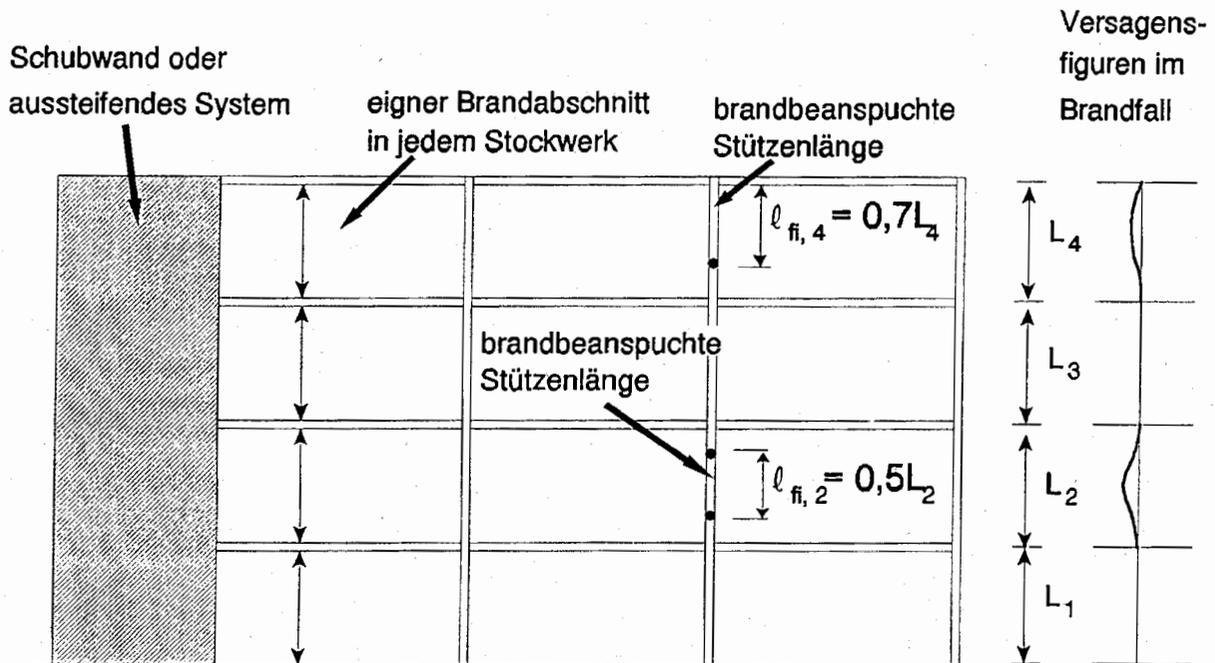
Dabei ist:

$k_{y,\theta,max}$ der Abminderungsfaktor für die Streckgrenze unter maximaler Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ zum Zeitpunkt t nach Unterabschnitt 3.2.1.

$k_{E,\theta,max}$ der Abminderungsfaktor für die Steigung im elastischen Bereich unter maximaler Stahltemperatur $\theta_{a,max}$ zum Zeitpunkt t nach Unterabschnitt 3.2.1.

(3) Die Knicklänge l_{fi} einer Stütze sollte im allgemeinen bei einer Bemessung im Brandfall so bestimmt werden wie bei einer Bemessung unter Normaltemperatur. Jedoch darf bei ausgesteiften Rahmen die Knicklänge l_{fi} unter Berücksichtigung einer Einspannung berechnet werden, wenn die Anschlüsse voll- oder teiltragfähig ausgebildet sind und die Bauteile, die die Brandabschnitte trennen mindestens den gleichen Feuerwiderstand aufweisen wie die Stützen.

(4) Falls bei einem Stahlrahmen jedes Stockwerk einen eigenen Brandabschnitt mit ausreichendem Feuerwiderstand bildet, darf bei innenliegenden Stockwerken die Knicklänge einer Stütze mit $l_{fi} = 0,5L$ und bei dem obersten Stockwerk mit $l_{fi} = 0,7L$ berechnet werden. Dabei ist L die Systemhöhe des Stockwerks, siehe Bild 4.1.

Bild 4.1: Knicklängen l_{fi} von Stützen in ausgesteiften Rahmen

4.2.3.3 Träger mit Querschnitten der Klassen 1 und 2

(1)P Der Bemessungswert der Momententragfähigkeit $M_{fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t von Querschnitten der Klassen 1 und 2 mit veränderlicher Temperatur über den Querschnitt darf berechnet werden mit:

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} f_{y,i} / \gamma_{M,fi} \quad (4.7)$$

Dabei ist:

z_i der Abstand der Schwerachse der Teilfläche A_i von der plastischen Nulllinie

$f_{y,i}$ die nominale Streckgrenze f_y der Teilfläche A_i , wobei diese auf der Druckseite von der plastischen Nulllinie positiv und auf der Zugseite negativ zu nehmen ist;

A_i und $k_{y,\theta,i}$ wie unter 4.2.3.1(1) beschrieben.

(2)P Die plastische Nullachse eines Querschnitts der Klasse 1 oder 2 mit veränderlicher Temperatur über den Querschnitt ist die Senkrechte auf die Biegefläche, die die folgende Bedingung erfüllt:

$$\sum_{i=1}^n A_i k_{y,\theta,i} f_{y,i} = 0 \quad (4.8)$$

(3) Alternativ darf der Bemessungswert der Momententragfähigkeit $M_{fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t eines Bauteils der Querschnittsklasse 1 oder 2 und veränderlicher Temperatur über den Querschnitt auf der sicheren Seite liegend bemessen werden mit:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / \kappa_1 \kappa_2 \quad (4.9)$$

Dabei ist:

- $M_{fi,\theta,Rd}$ der Bemessungswert der Momententragfähigkeit bei konstanter Temperatur θ_a im Querschnitt, wobei für θ_a die maximal im zum Zeitpunkt t auftretende Temperatur im Querschnitt $\theta_{a,max}$ zu setzen ist.
- κ_1 der Anpassungsfaktor für veränderliche Temperatur über den Querschnitt, siehe (8).
- κ_2 der Anpassungsfaktor für veränderliche Temperatur entlang des Trägers, siehe (9).

(4)P Der Bemessungswert der Momententragfähigkeit $M_{fi,\theta,Rd}$ eines Querschnitts der Klasse 1 oder 2 mit konstanter Temperatur über den Querschnitt darf wie folgt ermittelt werden:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad (4.10)$$

Dabei ist:

- M_{Rd} die plastische Momententragfähigkeit des Bruttoquerschnitts $M_{pl,Rd}$ unter Normaltemperatur nach 5.4.5, ENV 1993-1-1 oder abgeminderte Momententragfähigkeit nach 5.4.7, ENV 1993-1-1 bei Normaltemperatur unter Berücksichtigung von Schubbeanspruchungen, falls erforderlich.
- $k_{y,\theta}$ der Abminderungsfaktor für die Streckgrenze von Stahl unter der Temperatur θ_a , siehe 3.2.1

(5) Unter der Voraussetzung, daß die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ unter maximaler Temperatur des Druckflansches $\theta_{a,com}$ zum Zeitpunkt t den Wert 0,4 nicht übersteigt, braucht das Biegedrillknicken nicht untersucht zu werden. Wenn $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} > 0,4$ ist, sollte der Bemessungswert der Momententragfähigkeit $M_{b,fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t eines seitlich nicht gesützten Balkens mit einem Querschnitt der Klasse 1 oder 2 bestimmt werden mit:

$$M_{b,fi,t,Rd} = [\chi_{LT,fi} / 1,2] W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (4.11)$$

Dabei ist:

- $\chi_{LT,fi}$ der Abminderungsfaktor für das Biegedrillknicken für die Tragwerksbemessung im Brandfall
- $k_{y,\theta,com}$ der Abminderungsfaktor nach 3.2.1 für die Streckgrenze bei maximaler Temperatur $\theta_{a,com}$ zum Zeitpunkt t .

ANMERKUNG 1: Die Konstante 1,2 in dieser Gleichung dient der Berücksichtigung zahlreicher Einflüsse und ist der gleiche empirische Wert wie bei den druckbeanspruchten Bauteilen.

ANMERKUNG 2: Auf der sicheren Seite liegend kann für $\theta_{a,com}$ die maximal im Querschnitt auftretende Temperatur $\theta_{a,max}$ verwendet werden.

(6) Der Wert $\chi_{LT,fi}$ sollte nach 5.5.2, ENV 1993-1-1 unter Verwendung der bezogenen Schlankheit

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com}]^{0,5} \quad (4.12)$$

für die Temperatur $\theta_{a,com}$ berechnet werden.

Dabei ist:

- $k_{E,\theta,com}$ der Abminderungsfaktor nach 3.2.1 der Steigung im elastischen Bereich bei maximaler Temperatur $\theta_{a,com}$ des Druckflansches zum Zeitpunkt t .

(7) Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit $V_{fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t eines Querschnitts der Klasse 1 oder 2 mit veränderlicher Temperatur über den Querschnitt darf wie folgt berechnet werden:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} V_{Rd} [Y_{M,1} / Y_{M,fi}] / \kappa_1 \kappa_2 \quad (4.13)$$

Dabei ist:

V_{Rd} die Querkrafttragfähigkeit des Bruttoquerschnitts unter Normaltemperatur nach 5.4.6 ENV 1993-1-1.

(8) Die Größe des Anpassungsfaktors κ_1 für veränderliche Temperatur über den Querschnitt sollte wie folgt angenommen werden:

- für Balken, die von allen vier Seiten brandbeansprucht sind: $\kappa_1 = 1,0$;

- für Balken mit einer Beton oder Verbundplatte auf der einen Seite Brandbeanspruchung auf den anderen drei Seiten $\kappa_1 = 0,7$.

(9) Der Anpassungsfaktor κ_2 für veränderliche Temperatur über die Balkenlänge wie folgt angenommen werden:

- an den Auflagern statisch unbestimmt gelagerter Balken: $\kappa_2 = 0,8$;
- in allen anderen Fällen: $\kappa_2 = 1,0$.

4.2.3.4 Balken mit Querschnitten der Klasse 3

(1) Der Bemessungswert der Momententragfähigkeit $M_{fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t von Querschnitten der Klassen 3 mit veränderlicher Temperatur über den Querschnitt darf berechnet werden mit:

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} M_{Rd} [Y_{M,1} / Y_{M,fi}] / \kappa_1 \kappa_2 \quad (4.14)$$

Dabei ist:

M_{Rd} die elastische Momententragfähigkeit des Bruttoquerschnitts $M_{ef,Rd}$ unter Normaltemperatur nach 5.4.5, ENV 1993-1-1 oder die abgeminderte Momententragfähigkeit nach 5.4.7, ENV 1993-1-1 bei Normaltemperatur unter Berücksichtigung von Schubbeanspruchungen, falls erforderlich.

$k_{y,\theta,max}$ der Abminderungsfaktor für die Fließgrenze von Stahl unter der zum Zeitpunkt t maximal auftreten Temperatur $\theta_{a,max}$, siehe 3.2.1.

κ_1 der Anpassungsfaktor für veränderliche Temperatur über den Querschnitt, siehe 4.2.3.3(8).

κ_2 der Anpassungsfaktor für veränderliche Temperatur entlang des Balkens, siehe 4.2.3.3(9).

(2) Unter der Voraussetzung, daß die bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$ unter maximaler Temperatur des Druckflansches $\theta_{a,com}$ zum Zeitpunkt t den Wert 0,4 nicht übersteigt, braucht das Biegedrillknicken nicht untersucht zu werden. Wenn $\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} > 0,4$ ist, sollte der Bemessungswert der Momententragfähigkeit $M_{b,fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t eines seitlich nicht gesützten Balkens mit einem Querschnitt der Klasse 3 bestimmt werden mit:

$$M_{b,fi,t,Rd} = [\chi_{LT,fi} / 1,2] W_{ef,y} k_{y,\theta,com} f_y / Y_{M,fi} \quad (4.15)$$

Dabei ist:

$\chi_{LT,fi}$ wie in 4.2.3.3(6) angegeben.

ANMERKUNG 1: Die Konstante 1,2 in dieser Gleichung dient der Berücksichtigung zahlreicher Einflüsse und ist der gleiche empirische Wert wie bei den druckbeanspruchten Bauteilen.

ANMERKUNG 2: Auf der sicheren Seite liegend kann für $\theta_{a,com}$ die maximal im Querschnitt auftretende Temperatur $\theta_{a,max}$ verwendet werden.

(3) Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit $V_{fi,t,Rd}$ zum Zeitpunkt t eines Querschnitts der Klasse 3 mit veränderlicher Temperatur über den Querschnitt darf wie folgt berechnet werden:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta,max} V_{Rd} [\gamma_{M,1} / \gamma_{M,fi}] / \kappa_1 \kappa_2 \quad (4.16)$$

Dabei ist:

V_{Rd} die Querkrafttragfähigkeit des Bruttoquerschnitts unter Normaltemperatur nach 5.4.6 von ENV 1993-1-1.

4.2.3.5 Auf Biegung und axialen Druck beanspruchte Bauteile der Querschnittsklassen 1, 2 oder 3

(1) Der Bemessungswert der Tragfähigkeit $R_{fi,t,d}$ zum Zeitpunkt t von Bauteilen unter gleichzeitiger Beanspruchung durch Biegung und axialen Druck sollte unter Verwendung der unter (2) und (3) angegebenen Werte mit den Gleichungen (5.51) und (5.52) von ENV 1993-1-1 für Querschnitte der Klassen 1 und 2 und mit den Gleichungen (5.53) und (5.54) von ENV 1993-1-1 für Querschnitte der Klasse 3 ermittelt werden.

(2) Für die geänderten Schnittgrößen sollte eingesetzt werden:

$$M_{y,Sd} = M_{y,fi,Ed} \quad (4.17a)$$

$$M_{z,Sd} = M_{z,fi,Ed} \quad (4.17b)$$

$$N_{Sd} = N_{fi,Ed} \quad (4.17c)$$

(3) Die Ausdrücke auf der Widerstandsseite sollten wie folgt geändert werden:

- $[X_{y,fi} / 1,2]$	an Stelle von	X_y ,	dabei ist $X_{y,fi}$ wie in 4.2.3.2(2)
- $[X_{z,fi} / 1,2]$	an Stelle von	X_z ,	dabei ist $X_{z,fi}$ wie in 4.2.3.2(2)
- $[X_{LT,fi} / 1,2]$	an Stelle von	X_{LT} ,	dabei ist $X_{LT,fi}$ wie in 4.2.3.3(6)
- $k_{y,\theta,max} f_y$	an Stelle von	f_y ,	dabei ist $k_{y,\theta,max}$ wie in 4.2.3.2(1)
- $\gamma_{M,fi}$	an Stelle von	γ_{M1}	

4.2.4 Kritische Temperatur

(1)P Alternativ zu 4.2.3 darf die Bemessung auf Temperaturebene durchgeführt werden.

(2) Wenn Verformungskriterien nicht zu beachten sind, darf die kritische Stahltemperatur $\theta_{a,cr}$ zum Zeitpunkt t bei gleichförmiger Temperaturverteilung unter jedem Auslastungsgrad μ_0 zum Zeitpunkt $t = 0$ wie folgt bestimmt werden:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (4.18)$$

(3) In Tabelle 4.1 werden für verschiedene Ausnutzungsgrade μ_0 von 0,22 bis 0,80 die kritischen Temperaturen $\theta_{a,cr}$ angegeben.

(4) Der Ausnutzungsgrad μ_0 von Bauteilen mit Querschnitten der Klassen 1, 2 oder 3 und allen auf Zug beanspruchten Bauteilen zum Zeitpunkt $t = 0$ dürfen wie folgt bestimmt werden:

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0} \quad (4.19)$$

Dabei ist:

$R_{fi,d,0}$ die Größe von $R_{fi,d,t}$ zum Zeitpunkt $t = 0$ nach 4.2.3

$E_{fi,d}$ und $R_{fi,d,t}$ wie in 4.2.1(1) angegeben.

(5) Alternativ darf der Ausnutzungsgrad μ_0 bei zugbeanspruchten Bauteilen und Balken, bei denen das Biegedrillknicken als maßgebende Versagensform ausgeschlossen werden kann, auf der sicheren Seite liegend wie folgt bestimmt werden:

$$\mu_0 = \eta_{fi} [\gamma_{M,fi} / \gamma_{M1}] \quad (4.20)$$

Dabei ist:

η_{fi} der Abminderungsfaktor, wie in 2.4.3(3) angegeben

(6) Bei Bauteilen mit Querschnitten der Klasse 4, die keine Zugglieder sind, darf angenommen werden, daß 4.2.1(1) erfüllt ist, wenn zum Zeitpunkt t an keinem Punkt des Querschnitts die Stahltemperatur θ_a größer als 350°C ist.

Tabelle 4.1: kritische Temperaturen $\theta_{a,cr}$ in Abhängigkeit des Ausnutzungsgrads μ_0

μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

4.2.5 Entwicklung der Stahltemperatur

4.2.5.1 Ungeschützte Stahlkonstruktionen im Gebäudeinneren

(1) Für eine äquivalente konstante Temperatur im Querschnitt darf der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ eines ungeschützten Stahlbauteils während eines Zeitintervalls Δt berechnet werden mit:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{\text{net},d} \Delta t \quad (4.21)$$

Dabei ist:

A_m/V	der Profilmfaktor des ungeschützten Stahlbauteils
A_m	die dem Brand ausgesetzte Oberfläche des Bauteils pro Längeneinheit
V	das Bauteilvolumen pro Längeneinheit
c_a	die spezifische Wärme von Stahl nach 3.3.1.2 [J/kgK]
$\dot{h}_{\text{net},d}$	der flächenbezogene Bemessungswert des Nettowärmestroms [W/m ²]
Δt	das Zeitintervall [Sekunden]
ρ_a	die Dichte von Stahl nach 3.2.2(1) [kg/m ³].

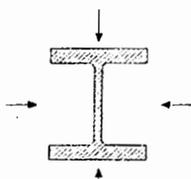
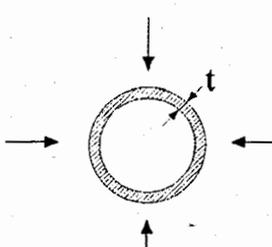
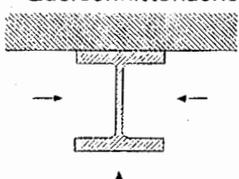
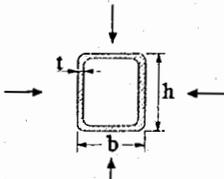
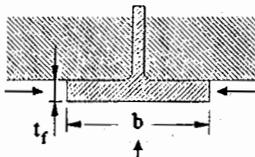
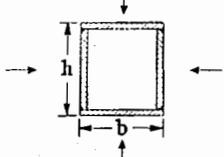
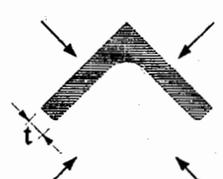
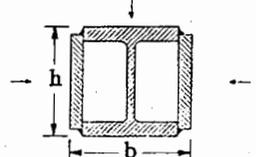
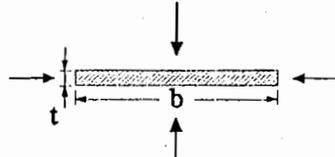
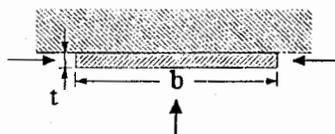
(2) Die Größe von $\dot{h}_{\text{net},d}$ sollte von ENV 1991-2-2 unter Verwendung von $\epsilon_f = 0,8$ und $\epsilon_m = 0,625$ (das ergibt $\epsilon_{\text{res}} = 0,5$) ermittelt werden. Die Größen ϵ_f , ϵ_m und ϵ_{res} sind in ENV 1991-2-2 definiert.

(3) Die Größe von Δt sollte nicht größer als 5 Sekunden sein.

(4) Die Größe des Profilmfaktors A_m/V in Gleichung (4.21) sollte nicht kleiner als 10m^{-1} sein.

(5) In Tabelle 4.2 werden einige Gleichungen zur Berechnung des Profilmfaktors A_m/V von unverkleideten Stahlbauteilen angegeben.

Tabelle 4.2: Profilmfaktor A_m/V für ungeschützte Stahlbauteile

<p>offener Querschnitt mit allseitiger Brandbeanspruchung:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{Umfang}}{\text{Querschnittsfläche}}$ 	<p>Rohr mit allseitiger Brandbeanspruchung: $A_m/V = 1/t$</p> 
<p>Offener Querschnitt mit dreiseitiger Brandbeanspruchung:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{brandbeanspruchte Oberfläche}}{\text{Querschnittsfläche}}$ 	<p>Hohlquerschnitt (oder geschweißter Kasten) mit allseitiger Brandbeanspruchung: falls $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 
<p>Flansch eines I-Querschnitts mit dreiseitiger Brandbeanspruchung: $A_m/V = (b + 2t_f) / (bt_f)$ If $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t_f$</p> 	<p>Geschweißter Kastenquerschnitt mit allseitiger Brandbeanspruchung: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{Querschnittsfläche}}$</p> 
<p>Winkel (oder beliebiger offener Querschnitt mit konstanter Dicke) mit allseitiger Brandbeanspruchung: $A_m/V = 2/t$</p> 	<p>I-Querschnitt mit Kastenverstärkung und allseitiger Brandbeanspruchung: $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b + h)}{\text{Querschnittsfläche}}$</p> 
<p>Flachstahl mit allseitiger Brandbeanspruchung: $A_m/V = 2(b + t) / (bt)$ falls $t \ll b$: $A_m/V \approx 2/t$</p> 	<p>Flachstahl mit dreiseitiger Brandbeanspruchung: $A_m/V = (b + 2t) / (bt)$ falls $t \ll b$: $A_m/V \approx 1/t$</p> 

4.2.5.2 Bekleidete Stahlkonstruktionen im Gebäudeinneren

(1) Für eine konstante Temperaturverteilung im Querschnitt darf der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ eines bekleideten Stahlbauteils während des Zeitintervalls Δt wie folgt berechnet werden:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi / 3)} \Delta t - (e^{\phi / 10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad \text{jedoch} \quad \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \quad (4.22)$$

mit:

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

Dabei ist:

A_p / V	der Profilmfaktor des bekleideten Stahlbauteils
A_p	die Fläche des Brandschutzmaterials, bezogen auf die Bauteillänge
V	das auf die Bauteillänge bezogene Bauteilvolumen
c_a	spezifische Wärme von Stahl, nach 3.3.1.2 [J/kgK]
c_p	spezifische Wärme des Brandschutzmaterials [J/kgK]
d_p	Dicke des Brandschutzmaterials [m]
Δt	das Zeitintervall [Sekunden]
$\theta_{a,t}$	die Stahltemperatur zum Zeitpunkt t
$\theta_{g,t}$	die Tempertur der umgebenden Luft zum Zeitpunkt t
$\Delta\theta_{g,t}$	der Anstieg der Umgebungstemperatur während des Zeitintervalls Δt
λ_p	die Wärmeleitfähigkeit des Brandschutzmaterials [W/mK]
ρ_a	die Dicht von Stahl nach 3.2.2 [kg/m ³]
ρ_p	die Dichte des Brandschutzmaterials [kg/m ³].

(2) Die Größen von c_p , λ_p und ρ_p sollten wie in 3.3.2 beschrieben berechnet werden.

(3) Die Größe von Δt sollte nicht größer als 30 Sekunden gewählt werden.

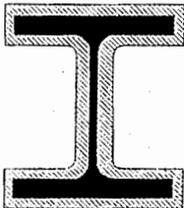
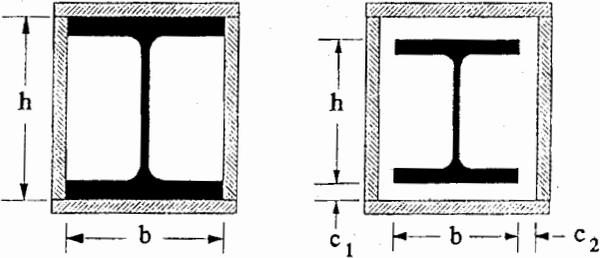
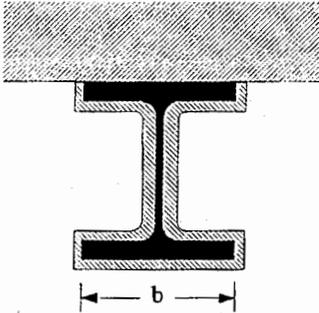
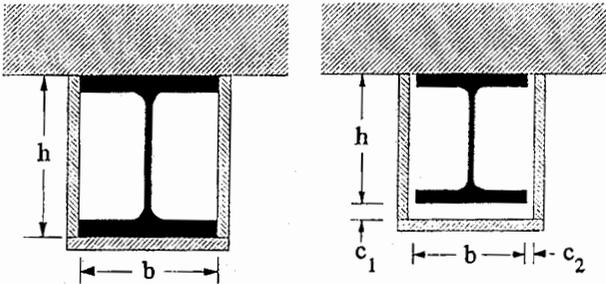
(4) Für die Fläche A_p der Brandschutzmaterials sollte im allgemeinen die innere Fläche angesetzt werden. Wenn es einen Zwischenraum zwischen Bauteil und Brandschutzbekleidung gibt, dann wird A_p wie bei einer Bekleidung, die ohne Zwischenraum angebracht ist, bestimmt.

(5) In Tabelle 3.4 werden einige Bemessungswerte für den Profilmfaktor A_p / V angegeben.

(6) Bei feuchten Brandschutzmaterialien darf der Temperaturanstieg im Stahl $\Delta\theta_a$ zur Berücksichtigung der zeitlichen Verzögerung bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von 100°C modifiziert werden. Diese zeitliche Verzögerung sollte nach einem Verfahren, wie es in prENV yyy5-4 angegeben wird, bestimmt werden.

(7) Alternativ kann die gleichmäßige Temperatur eines bekleideten Stahlbauteils unter Normbrandbeanspruchung zu einem bestimmten Zeitpunkt aus Tafeln, die nach prENV yyy5-4 aufgestellt wurden, entnommen werden.

Tabelle 4.3: Profilmfaktor A_p / V von durch Brandschutzbekleidungen geschützten Stahlbauteilen

Skizze	Beschreibung	Profilfaktor (A_p / V)
	profilfolgende Bekleidung konstanter Dicke	$\frac{\text{Stahlumfang}}{\text{Stahlfläche}}$
	Kastenverkleidung ¹⁾ konstanter Dicke	$\frac{2(b + h)}{\text{Stahlfläche}}$
	profilfolgende Bekleidung konstanter Dicke mit dreiseitiger Brandbeanspruchung	$\frac{\text{Stahlumfang} - b}{\text{Stahlfläche}}$
	Kastenverkleidung ¹⁾ konstanter Dicke mit dreiseitiger Brandbeanspruchung	$\frac{2h + b}{\text{Stahlfläche}}$

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

4.2.5.3 Abgeschirmte Stahlkonstruktionen im Gebäudeinneren

(1)P Die unten angegebenen Regeln gelten für die folgenden beiden Fälle:

- Stahlbauteile in Hohlräumen, die oben durch eine Decke und unten durch einen Wärmeschild begrenzt sind und
- Stahlbauteile in Hohlräumen, die durch vertikale Wärmeschilde auf beiden Seiten begrenzt sind in beiden Fällen unter der Voraussetzung, daß zwischen den Wärmeschildern und den Stahlbauteile ein Spalt besteht. Sie gelten nicht bei unmittelbarer Berührung von Wärmeschild und Bauteil.

(2)P Die Eigenschaften und das Verhalten der Wärmeschilde sind durch Versuche nach prENV yyy5-1 bzw. prENV yyy5-2 zu bestimmen.

(3)P Die Temperaturentwicklung in dem Hohlraum, in dem sich das Bauteil befindet, ist durch Normbrandversuche nach prENV yyy5-1 bzw. prENV yyy5-2 zu bestimmen.

(4) Die Temperaturentwicklung durch Wärmeschilde geschützter Stahlkonstruktionen im Gebäudeinneren sollte auf Grundlage der in 4.2.5.1 bzw. 4.2.5.2 angegebenen Verfahren erfolgen. Dabei wird als Umgebungstemperatur $\theta_{g,t}$ die Temperatur im Hohlraum eingesetzt.

(5) Alternativ zu dem in 4.2.5.1 angegebenen Verfahren darf $\Delta\theta_a$ auch unter Verwendung von Wärmeübergangskoeffizienten α_c und α_r , die durch Versuche nach prENV yyy5-1 bestimmt wurden, berechnet werden.

4.2.5.4 Stahlkonstruktionen an der Gebäudeaußenseite

(1)P Die Temperatur außenliegender Stahlbauteile muß bestimmt werden unter Berücksichtigung von:

- der Wärmestrom durch Strahlung aus dem Brandabschnitt
- der Wärmestrom durch Strahlung und Konvektion durch aus Öffnungen herausschlagende Flammen
- die Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion der Stahlkonstruktion an die Umgebung
- die Größe und Lage der Bauteile

(2)P Es dürfen auf einer, zwei oder drei Seiten Wärmeschilde angebracht werden, um außenliegende Stahlbauteile vor Wärmestrahlung zu schützen.

(3) Wärmeschilde sollten entweder

- auf der Seite des Stahlbauteils, das geschützt werden soll, direkt befestigt werden

oder

- groß genug sein, um die Seite vor der erwarteten Wärmestrahlung vollkommen zu schützen

(4) Wärmeschilde sollten nicht brennbar sein und mindestens einen Feuerwiderstand von EI 30 nach pr ISO EN 834 besitzen.

(5) Die Temperatur durch Wärmeschilde geschützter außenliegender Stahlbauteile sollte wie in (1) beschrieben ermittelt werden, wobei kein Wärmeübergang durch Strahlung an den abgeschirmten Seiten zu berücksichtigen ist.

(6) Berechnungen dürfen nach Anhang C auf Grundlage des stationären Wärmeübergangs durchgeführt werden.

(7) Berechnungen nach Anhang C dieses Teils 1.2 der ENV 1993-1-2 sollten auf Grundlage des in Anhang C der ENV 1991-2-2 beschriebenen Modells erfolgen. Dieses Modell dient der Beschreibung der Brandbedingungen im Brandabschnitt und der aus Öffnungen schlagenden Flammen. Es sollte der Berechnung des Wärmeübergangs durch Strahlung und Konvektion zugrunde gelegt werden.

4.3 Allgemeine Berechnungsverfahren

4.3.1 Grundlage

(1)P Allgemeine Berechnungsverfahren dürfen auf einzelene Bauteile, Teilsysteme oder das Gesamtsystem angewendet werden.

(2)P Allgemeine Berechnungsverfahren dürfen auf jeden Querschnittstyp angewendet werden.

(3)P Die Untersuchung von Tragwerken unter Brandbeanspruchung durch das vereinfachte Berechnungsverfahren muß realistisch sein. Sie sollte auf Grundlage der phsikalischen Gesetzmäßigkeiten eine verlässliche Annäherung an das erwartete Tragverhalten der maßgebenden Bauteile sein.

(4)P Die allgemeinen Berechnungsverfahren dürfen getrennte Berechnungsverfahren für

- die Temperaturentwicklung und -verteilung in den Bauteilen (thermisches Verhalten) und
- das Tragverhalten der Konstruktion oder Teilen davon enthalten.

(5)P Alle Versagensformen, die durch das allgemeinen Berechnungsverfahren nicht erfaßt werden (einschließlich Biegedrillknicken und Schubversagen), sind durch entsprechende Verfahren zu berücksichtigen.

(6)P Unter der Vorraussetzung, daß die Materialeigenschaften für die maßgebenden Temperaturbereiche bekannt sind, dürfen allgemeine Berechnungsverfahren auf jede Aufheizkurve angewendet werden.

(7)P Die Gültigkeit eines allgemeinen Berechnungsverfahrens ist im Einzelfall mit dem Kunden, dem Planer und der zuständigen Behörde abzustimmen.

4.3.2 Thermisches Verhalten

(1)P Allgemeinen Berechnungsverfahren zur Untersuchung des thermischen Verhaltens sind auf Grundlage der Theorie der Wärmeübertragung durchzuführen.

(2)P Das Berechnungsverfahren muß berücksichtigen:

- die maßgebenden thermischen Einwirkungen nach ENV 1991-2-2;
- die Abhängigkeiten der thermischen Materialeigenschaften, siehe 3.3.

(3) Die Einflüsse ungleichmäßiger Temperaturbeanspruchung und der Wärmetransport in angrenzende Bauteile darf ggf. berücksichtigt werden.

(4) Der Einfluß des Feuchtegehalts im Brandschutzmaterial darf auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden.

4.3.3 Tragverhalten

(1)P Erweiterte mechanische Berechnungen sind auf Grundlage der bekannten Regeln und Annahmen der technischen Mechanik und unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften durchzuführen.

(2)P Der Einfluß von Zwängungen und Spannungen infolge von Erwärmung und Temperaturgradienten ist zu berücksichtigen.

(3)P Falls erforderlich muß das mechanische Berechnungsmodell zusätzlich erfassen:

- den kombinierten Einfluß von mechanischen und thermischen Einwirkungen und geometrischen Imperfektionen
- die Temperaturabhängigkeit der Materialeigenschaften, siehe 3.2
- Einflüsse aus geometrischen Nichtlinearitäten
- Einflüsse aus der Nichtlinearität des Werkstoffverhaltens

(4) Unter der Voraussetzung, daß die Spannungsdehnungsbeziehungen nach 3.2 verwendet werden, kann das thermische Kriechen vernachlässigt werden.

(5)P Die im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelten Verformungen sind zu begrenzen, um das Zusammenwirken aller Teile des Tragwerks sicherzustellen.

(6) Als Versagensart können die berechneten Verformungen durch Verlust der Auflagerung einzelner Bauteile maßgebend werden bevor der Grenzzustand der Tragfähigkeit erreicht wird.

Anhang A (Informativ)**Spannungs-Dehnungsbeziehungen bei erhöhten Temperaturen (ohne Verfestigung)**

- (1) Die in 3.2.1 angegebene Spannungsdehnungsbeziehung ist für die Stahlgüten S 235, S 275, S 355 und S 460 berechnet worden und wird in den Tabellen A.1 bis A.4 jeweils aufgeführt. Die Temperaturabhängigkeit ist jeweils in den Bildern A.1 bis A.4 für die Stahlgüten S 235, S 275, S 355 und S 460 dargestellt.

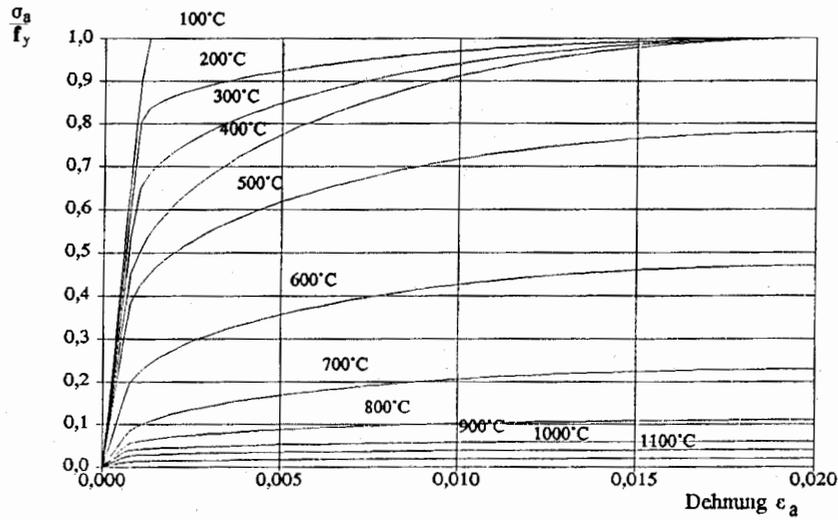


Bild A.1: Abhängigkeit der Spannungsdehnungsbeziehung von der Temperatur bei der Stahlgüte S 235 (ohne Verfestigung)

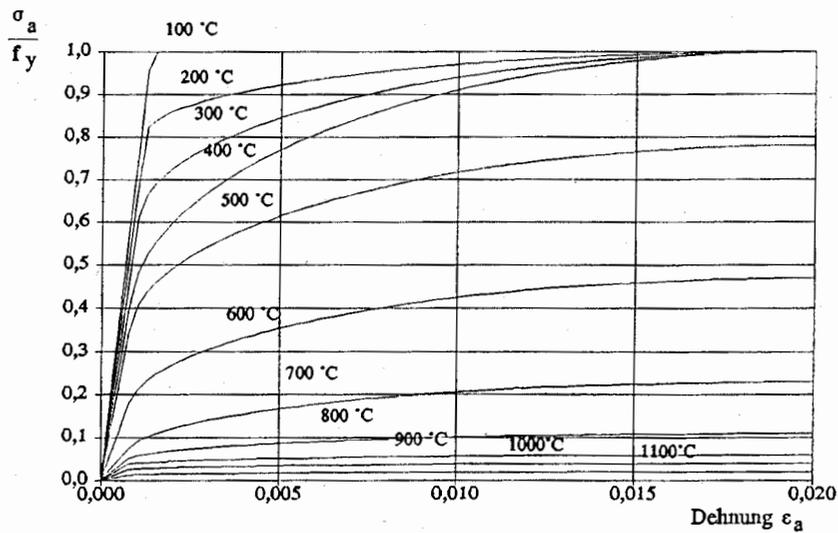


Bild A.2: Abhängigkeit der Spannungsdehnungsbeziehung von der Temperatur bei der Stahlgüte S 275 (ohne Verfestigung)

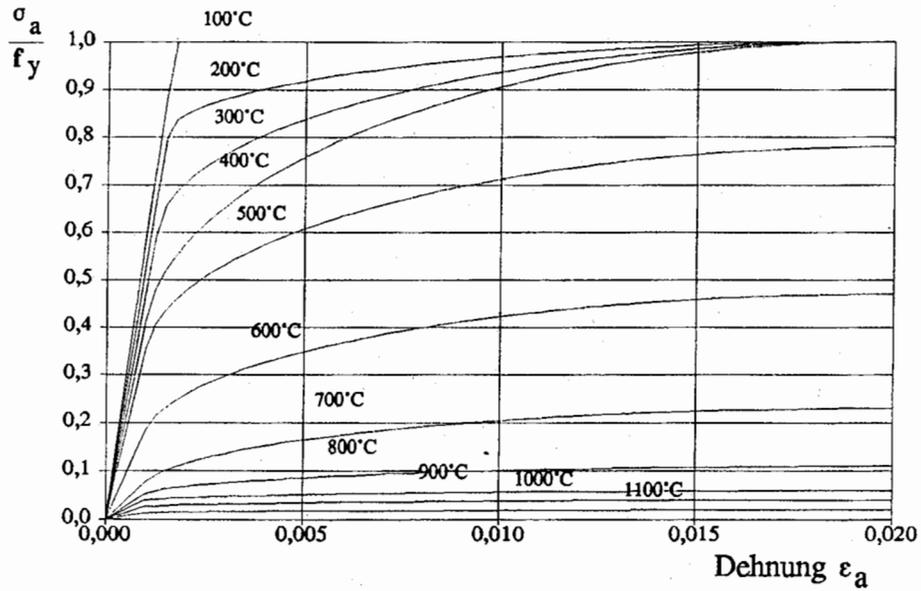


Bild A.3: Abhängigkeit der Spannungsdehnungsbeziehung von der Temperatur bei der Stahlgüte S 335 (ohne Verfestigung)

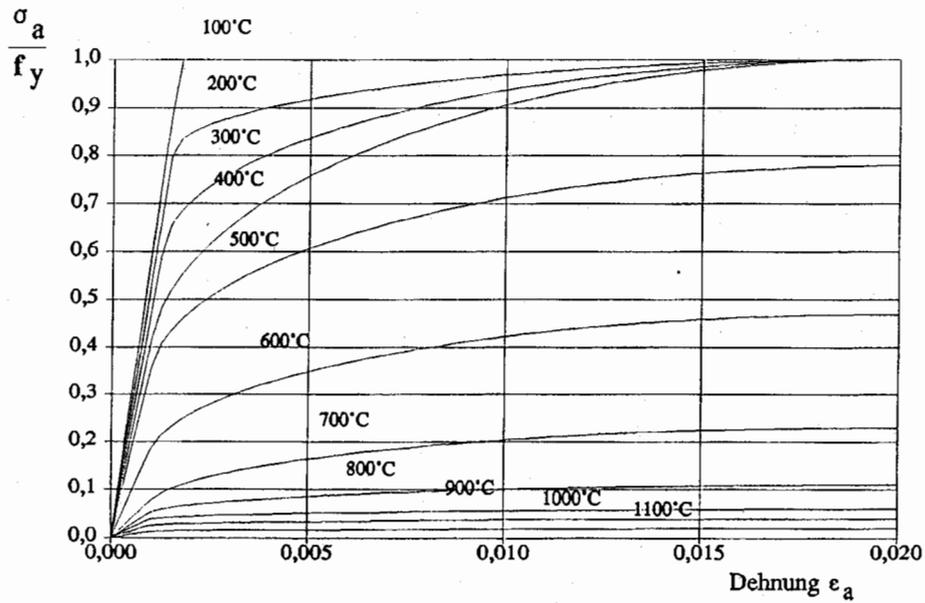


Bild A.4: Abhängigkeit der Spannungsdehnungsbeziehung von der Temperatur bei der Stahlgüte S 460 (ohne Verfestigung)

Tabelle A.1: Spannungsdehnungsbeziehung der Stahlgüte S 235
unter erhöhter Temperatur

Dehnung	effektive Streckgrenze bezogen auf die Streckgrenze bei 20 °C.							
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$							
	Stahltemperatur θ_a [°C]							
	100	200	300	400	500	600	700	800
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,0005	0,447	0,402	0,357	0,313	0,268	0,139	0,058	0,040
0,0010	0,894	0,804	0,652	0,505	0,424	0,223	0,097	0,060
0,0015	1,000	0,849	0,705	0,569	0,470	0,254	0,113	0,066
0,0020	1,000	0,867	0,738	0,614	0,502	0,276	0,125	0,071
0,0025	1,000	0,880	0,763	0,650	0,528	0,295	0,135	0,074
0,0030	1,000	0,892	0,785	0,681	0,551	0,310	0,143	0,078
0,0035	1,000	0,901	0,804	0,708	0,570	0,324	0,151	0,080
0,0040	1,000	0,910	0,821	0,733	0,588	0,336	0,157	0,083
0,0045	1,000	0,917	0,836	0,755	0,604	0,347	0,163	0,085
0,0050	1,000	0,924	0,849	0,775	0,618	0,357	0,169	0,087
0,0055	1,000	0,931	0,862	0,794	0,632	0,367	0,174	0,089
0,0060	1,000	0,937	0,873	0,811	0,644	0,375	0,179	0,091
0,0065	1,000	0,942	0,884	0,827	0,656	0,383	0,183	0,092
0,0070	1,000	0,947	0,894	0,842	0,666	0,391	0,187	0,094
0,0075	1,000	0,952	0,903	0,856	0,676	0,397	0,191	0,095
0,0080	1,000	0,956	0,912	0,868	0,685	0,404	0,194	0,097
0,0085	1,000	0,960	0,920	0,880	0,694	0,410	0,197	0,098
0,0090	1,000	0,964	0,928	0,892	0,702	0,416	0,201	0,099
0,0095	1,000	0,967	0,935	0,902	0,710	0,421	0,203	0,100
0,0100	1,000	0,971	0,941	0,912	0,717	0,426	0,206	0,101
0,0110	1,000	0,977	0,953	0,930	0,730	0,435	0,211	0,103
0,0120	1,000	0,982	0,964	0,945	0,741	0,443	0,215	0,104
0,0130	1,000	0,986	0,972	0,959	0,750	0,449	0,219	0,106
0,0140	1,000	0,990	0,980	0,970	0,758	0,455	0,222	0,107
0,0150	1,000	0,993	0,986	0,979	0,765	0,460	0,224	0,108
0,0160	1,000	0,996	0,991	0,987	0,771	0,463	0,226	0,109
0,0170	1,000	0,998	0,995	0,993	0,775	0,466	0,228	0,109
0,0180	1,000	0,999	0,997	0,997	0,778	0,468	0,229	0,110
0,0190	1,000	1,000	0,999	0,999	0,779	0,470	0,230	0,110
0,0200	1,000	1,000	1,000	1,000	0,780	0,470	0,230	0,110

Tabelle A.2: Spannungsdehnungsbeziehung der Stahlgüte S 275
unter erhöhter Temperatur

Dehnung	effektive Streckgrenze bezogen auf die Streckgrenze bei 20 °C.							
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$							
	Stahltemperatur θ_a [°C]							
	100	200	300	400	500	600	700	800
0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,0005	0,382	0,344	0,305	0,267	0,229	0,118	0,050	0,034
0,0010	0,764	0,687	0,611	0,482	0,407	0,212	0,091	0,058
0,0015	1,000	0,840	0,691	0,553	0,459	0,247	0,109	0,065
0,0020	1,000	0,861	0,728	0,602	0,494	0,270	0,122	0,070
0,0025	1,000	0,876	0,756	0,640	0,522	0,290	0,132	0,074
0,0030	1,000	0,888	0,779	0,672	0,545	0,306	0,141	0,077
0,0035	1,000	0,898	0,798	0,701	0,565	0,320	0,148	0,080
0,0040	1,000	0,907	0,816	0,726	0,583	0,333	0,155	0,082
0,0045	1,000	0,915	0,831	0,749	0,600	0,344	0,161	0,085
0,0050	1,000	0,922	0,845	0,770	0,615	0,354	0,167	0,087
0,0055	1,000	0,929	0,858	0,789	0,628	0,364	0,172	0,089
0,0060	1,000	0,935	0,870	0,806	0,641	0,373	0,177	0,090
0,0065	1,000	0,941	0,881	0,823	0,653	0,381	0,182	0,092
0,0070	1,000	0,946	0,892	0,838	0,664	0,389	0,186	0,094
0,0075	1,000	0,950	0,901	0,852	0,674	0,396	0,190	0,095
0,0080	1,000	0,955	0,910	0,865	0,683	0,402	0,193	0,096
0,0085	1,000	0,959	0,918	0,878	0,692	0,409	0,197	0,098
0,0090	1,000	0,963	0,926	0,889	0,701	0,414	0,200	0,099
0,0095	1,000	0,967	0,933	0,900	0,708	0,420	0,203	0,102
0,0100	1,000	0,970	0,940	0,910	0,716	0,425	0,205	0,102
0,0110	1,000	0,976	0,952	0,928	0,729	0,434	0,210	0,104
0,0120	1,000	0,981	0,963	0,944	0,740	0,442	0,215	0,105
0,0130	1,000	0,986	0,972	0,958	0,750	0,449	0,218	0,107
0,0140	1,000	0,990	0,980	0,969	0,758	0,455	0,222	0,108
0,0150	1,000	0,993	0,986	0,979	0,765	0,459	0,224	0,108
0,0160	1,000	0,996	0,991	0,985	0,769	0,462	0,226	0,109
0,0170	1,000	0,997	0,995	0,992	0,775	0,466	0,228	0,110
0,0180	1,000	0,999	0,998	0,997	0,778	0,468	0,229	0,110
0,0190	1,000	1,000	0,999	0,999	0,779	0,470	0,230	0,110
0,0200	1,000	1,000	1,000	1,000	0,780	0,470	0,230	0,110

Tabelle A.3: Spannungsdehnungsbeziehung der Stahlgüte S 355
unter erhöhter Temperatur

Dehnung	effektive Streckgrenze bezogen auf die Streckgrenze bei 20 °C.							
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$							
	Stahltemperatur θ_a [°C]							
	100	200	300	400	500	600	700	800
0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,0005	0,296	0,266	0,237	0,207	0,177	0,092	0,038	0,027
0,0010	0,592	0,532	0,473	0,414	0,355	0,183	0,077	0,052
0,0015	0,887	0,799	0,657	0,520	0,435	0,230	0,100	0,062
0,0020	1,000	0,848	0,706	0,576	0,476	0,258	0,114	0,067
0,0025	1,000	0,866	0,739	0,619	0,507	0,279	0,126	0,072
0,0030	1,000	0,880	0,765	0,654	0,532	0,296	0,135	0,075
0,0035	1,000	0,892	0,786	0,685	0,554	0,312	0,144	0,078
0,0040	1,000	0,902	0,805	0,712	0,574	0,325	0,151	0,081
0,0045	1,000	0,910	0,822	0,736	0,591	0,337	0,158	0,083
0,0050	1,000	0,918	0,837	0,758	0,607	0,348	0,164	0,086
0,0055	1,000	0,925	0,851	0,778	0,621	0,359	0,169	0,088
0,0060	1,000	0,932	0,864	0,797	0,635	0,368	0,174	0,090
0,0065	1,000	0,938	0,876	0,814	0,647	0,377	0,179	0,091
0,0070	1,000	0,943	0,886	0,830	0,659	0,385	0,183	0,093
0,0075	1,000	0,948	0,896	0,845	0,669	0,399	0,187	0,094
0,0080	1,000	0,953	0,906	0,859	0,679	0,406	0,191	0,096
0,0085	1,000	0,957	0,915	0,872	0,689	0,412	0,195	0,097
0,0090	1,000	0,961	0,923	0,884	0,697	0,417	0,198	0,098
0,0095	1,000	0,965	0,930	0,896	0,705	0,423	0,201	0,099
0,0100	1,000	0,969	0,937	0,906	0,713	0,428	0,204	0,101
0,0110	1,000	0,975	0,950	0,925	0,726	0,437	0,209	0,102
0,0120	1,000	0,981	0,961	0,942	0,738	0,441	0,214	0,104
0,0130	1,000	0,985	0,971	0,956	0,748	0,448	0,218	0,106
0,0140	1,000	0,989	0,979	0,968	0,757	0,454	0,221	0,107
0,0150	1,000	0,993	0,985	0,978	0,764	0,459	0,224	0,108
0,0160	1,000	0,995	0,991	0,986	0,770	0,463	0,226	0,109
0,0170	1,000	0,997	0,995	0,992	0,774	0,466	0,228	0,109
0,0180	1,000	0,999	0,998	0,997	0,778	0,468	0,229	0,110
0,0190	1,000	1,000	0,999	0,999	0,779	0,470	0,230	0,110
0,0200	1,000	1,000	1,000	1,000	0,780	0,470	0,230	0,110

Tabelle A.4: Spannungsdehnungsbeziehung der Stahlgüte S 460
unter erhöhter Temperatur

Dehnung	effektive Streckgrenze bezogen auf die Streckgrenze bei 20 °C.							
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$							
	Stahltemperatur θ_a [°C]							
	100	200	300	400	500	600	700	800
0,0000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,0005	0,228	0,205	0,183	0,160	0,137	0,071	0,030	0,021
0,0010	0,457	0,411	0,365	0,320	0,274	0,142	0,059	0,041
0,0015	0,685	0,616	0,548	0,465	0,395	0,205	0,087	0,057
0,0020	0,913	0,815	0,669	0,537	0,449	0,239	0,104	0,064
0,0025	1,000	0,850	0,712	0,587	0,485	0,263	0,117	0,069
0,0030	1,000	0,868	0,743	0,627	0,514	0,283	0,127	0,073
0,0035	1,000	0,882	0,769	0,661	0,538	0,300	0,137	0,076
0,0040	1,000	0,893	0,790	0,691	0,560	0,315	0,145	0,079
0,0045	1,000	0,903	0,809	0,718	0,579	0,328	0,152	0,082
0,0050	1,000	0,912	0,825	0,742	0,596	0,340	0,158	0,084
0,0055	1,000	0,920	0,841	0,764	0,611	0,351	0,164	0,086
0,0060	1,000	0,927	0,854	0,784	0,626	0,361	0,170	0,088
0,0065	1,000	0,933	0,867	0,802	0,639	0,370	0,175	0,090
0,0070	1,000	0,939	0,879	0,819	0,651	0,379	0,180	0,092
0,0075	1,000	0,945	0,890	0,835	0,663	0,387	0,184	0,094
0,0080	1,000	0,950	0,900	0,850	0,673	0,395	0,188	0,095
0,0085	1,000	0,954	0,909	0,864	0,683	0,402	0,192	0,096
0,0090	1,000	0,959	0,918	0,877	0,692	0,408	0,196	0,098
0,0095	1,000	0,963	0,926	0,889	0,701	0,414	0,199	0,099
0,0100	1,000	0,967	0,933	0,900	0,709	0,420	0,202	0,100
0,0110	1,000	0,974	0,947	0,921	0,723	0,430	0,208	0,102
0,0120	1,000	0,979	0,959	0,938	0,736	0,439	0,213	0,104
0,0130	1,000	0,984	0,969	0,953	0,747	0,446	0,217	0,105
0,0140	1,000	0,989	0,977	0,966	0,756	0,453	0,221	0,107
0,0150	1,000	0,992	0,984	0,977	0,763	0,458	0,223	0,108
0,0160	1,000	0,995	0,990	0,985	0,769	0,462	0,226	0,109
0,0170	1,000	0,997	0,994	0,992	0,774	0,466	0,228	0,109
0,0180	1,000	0,999	0,998	0,996	0,777	0,468	0,229	0,110
0,0190	1,000	0,999	0,999	1,000	0,779	0,470	0,230	0,110
0,0200	1,000	1,000	1,000	1,000	0,780	0,470	0,230	0,110

Anhang B (normativ)**Verfestigung von Stahl unter erhöhter Temperatur**

(1) Die Verfestigung darf bei Temperaturen unter 400 °C wie folgt berücksichtigt werden:

- für $0,02 < \varepsilon < 0,04$:

$$\sigma_a = 50 (f_{u,\theta} - f_{y,\theta}) \varepsilon + 2 f_{y,\theta} - f_{u,\theta} \quad (\text{B.1a})$$

- für $0,04 \leq \varepsilon \leq 0,15$:

$$\sigma_a = f_{u,\theta} \quad (\text{B.1b})$$

- für $0,15 < \varepsilon < 0,20$:

$$\sigma_a = f_{u,\theta} [1 - 20 (\varepsilon - 0,15)] \quad (\text{B.1c})$$

- für $\varepsilon \geq 0,20$:

$$\sigma_a = 0,00 \quad (\text{B.1d})$$

Dabei ist:

$f_{u,\theta}$ die Bruchfestigkeit unter erhöhter Temperatur und Berücksichtigung der Verfestigung

(2) Die alternative Spannungsdehnungsbeziehung mit Berücksichtigung der Verfestigung ist in Bild B.1 dargestellt.

(3) Die Bruchfestigkeit unter Berücksichtigung der Verfestigung sollte für erhöhte Temperaturen wie folgt bestimmt werden:

- für $\theta_a < 300 \text{ °C}$:

$$f_{u,\theta} = 1,25 f_{y,\theta} \quad (\text{B.2a})$$

- für $300 \text{ °C} \leq \theta_a < 400 \text{ °C}$:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} (2 - 0,0025 \theta_a) \quad (\text{B.2b})$$

- für $\theta_a \geq 400 \text{ °C}$:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} \quad (\text{B.2c})$$

(4) Die Abhängigkeit der Spannungsdehnungsbeziehung von der Temperatur ist in Bild B.2 dargestellt.

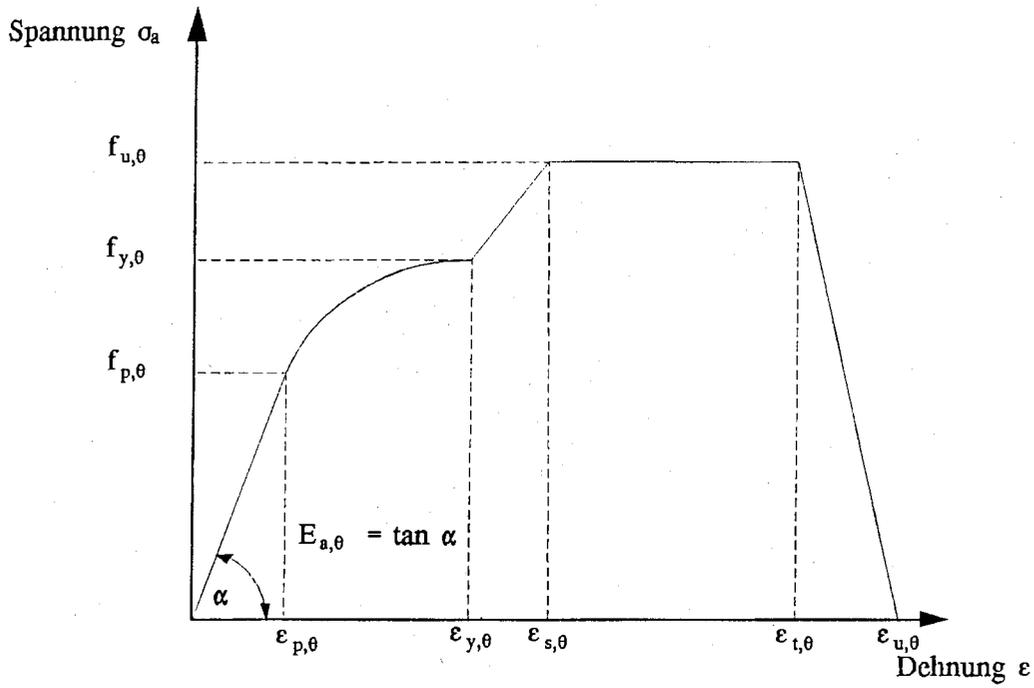


Bild B.1: Alternative Spannungsdehnungsbeziehung von Stahl mit Berücksichtigung der Verfestigung

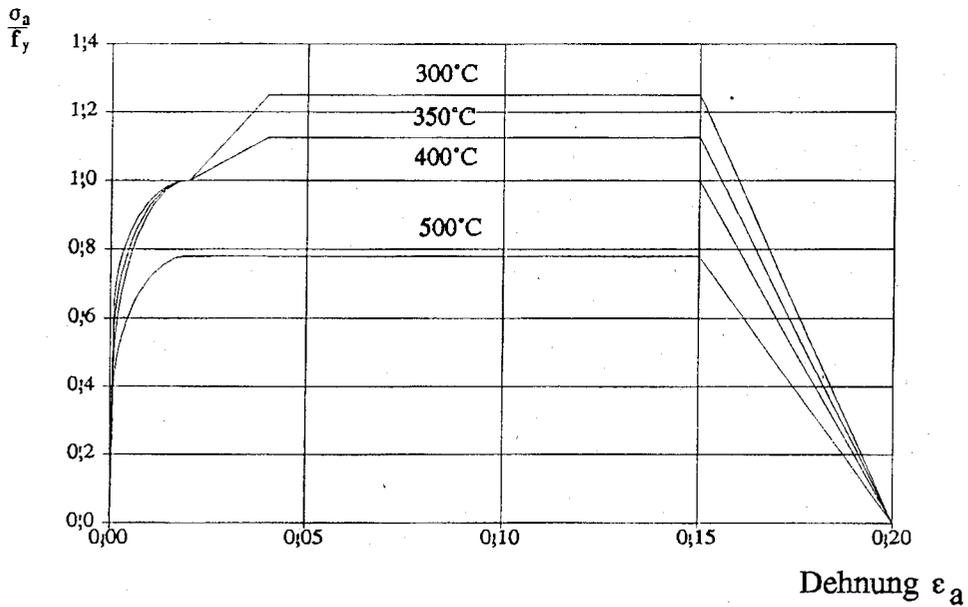


Bild B.2: Alternative Spannungsdehnungsbeziehung von Stahl unter erhöhter Temperatur mit Berücksichtigung der Verfestigung

Anhang C (normativ)

Wärmeübertragung auf außenliegende Stahlbauteile

C.1 Allgemeines

C.1.1 Grundlagen

(1) Dieser Anhang C gilt unter der Annahme, daß sich der Brandabschnitt nur über ein Stockwerk erstreckt und alle Fenster und vergleichbaren Öffnungen rechteckig sind.

(2) Die Temperatur im Brandabschnitt, die Größe und Temperatur der Flammen und die Konvektions- und Strahlungswerte sollten auf Grundlage des Anhang C von ENV 1991-2-2 ermittelt werden.

(3) Abhängig von der Lage eines Bauteils vor einer Öffnung sollte eine Unterscheidung zwischen direkt den Flammen ausgesetzten Bauteilen und nicht direkt den Flammen ausgesetzten Bauteilen gemacht werden.

(4) Es sollte angenommen werden, daß ein Bauteil, daß nicht direkt den Flammen ausgesetzt ist, von allem umliegenden Öffnungen und den darausschlagenden Flammen Wärmestrahlen empfängt.

(5) Ist ein Bauteil direkt den Flammen ausgesetzt, dann sollte davon ausgegangen werden, daß es von der Flamme durch Konvektion und Strahlung und aus der Öffnung, vor der es sich befindet, durch Wärmestrahlung Wärme aufnimmt. Die Wärmestrahlung von Flammen, die aus benachbarten Öffnungen schlagen, darf vernachlässigt werden.

C.1.2 Bauteilabmessungen und Seiten

(1) Die für die Abmessungen d_1 und d_2 sowie für die vier Bauteilseiten getroffenen Vereinbarungen sind Bild C.1 zu entnehmen.

C.1.3 Wärmebilanz

(1) Die mittlere Temperatur T_m [K] eines nicht direkt den Flammen ausgesetzten Bauteils sollte durch Lösen der folgenden Wärmebilanz bestimmt werden:

$$\sigma T_m^4 + \alpha T_m = \Sigma I_z + \Sigma I_f + 293\alpha \quad (\text{C.1})$$

Dabei ist:

σ die Stefan-Boltzmann-Konstante [$56,7 \times 10^{-12}$ kW/m²K⁴]

α der konvektive Wärmeübergangskoeffizient [kW/m²K]

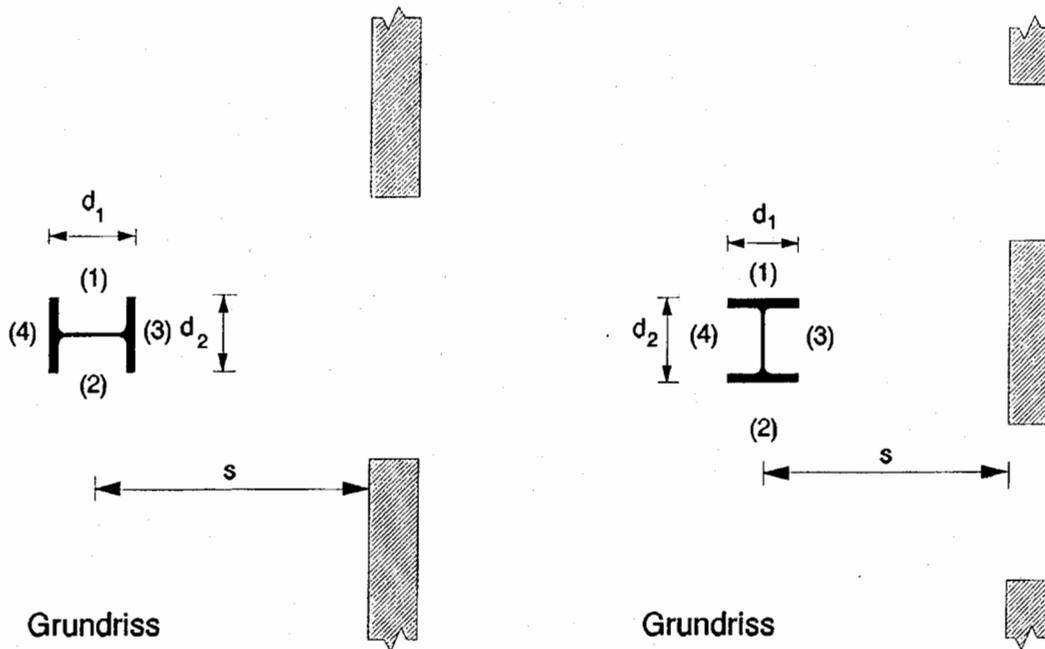
I_z der Wärmestrom durch Strahlung einer Flamme [kW/m²]

I_f der Wärmestrom durch Strahlung aus der Öffnung [kW/m²].

(2) Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α sollte der ENV 1991-2-2 für Feuer "mit Zwangsbe- und Entlüftung" bzw. "ohne Zwangsbe- und Entlüftung" unter Verwendung einer effektiven Querschnittsabmessung

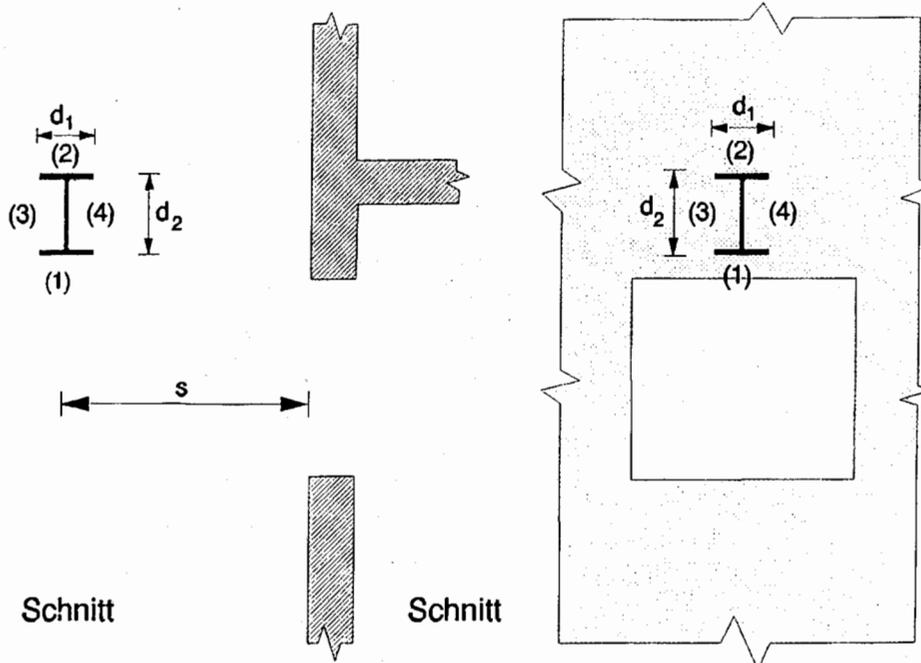
$$d = (d_1 + d_2) / 2.$$

entnommen werden.



1) Stütze vor einer Öffnung
 a) Stützen

2) Stütze zwischen Öffnungen



1) Träger parallel zur Wand 2) Träger senkrecht zur Wand
 b) Träger

Bild C.1: Trägerabmessungen und Seiten

(3) Die mittlere Temperatur T_m [K] eines direkt den Flammen ausgesetzten Bauteils sollte durch Lösen der folgenden Wärmebilanz bestimmt werden:

$$\sigma T_m^4 + \alpha T_m = I_z + I_f + \alpha T_z \quad (\text{C.2})$$

Dabei ist:

T_z die Temperatur der Flamme [K]

I_z der Wärmestrom durch Strahlung einer Flamme [kW/m²]

I_f der Wärmestrom durch Strahlung aus der davorliegenden Öffnung [kW/m²]

(4) Der Wärmestrom durch Strahlung I_z von Flammen sollte entsprechend der Art und Lage des Bauteils wie folgt bestimmt werden:

- Stützen, die nicht direkt den Flammen ausgesetzt sind: siehe C.2;
- Träger, die nicht direkt den Flammen ausgesetzt sind: siehe C.3;
- Stützen, die direkt den Flammen ausgesetzt sind: siehe C.4;
- Träger, die direkt den Flammen ausgesetzt sind: siehe C.5.

Andere Fälle dürfen analog durch Anpassen der in C.2 und C.5 gegebenen Verfahren behandelt werden.

(5) Der Wärmestrom durch Strahlung aus einer Öffnung I_f sollte ermittelt werden mit:

$$I_f = \phi_f \varepsilon_f (1 - a_z) \sigma T_f^4 \quad (\text{C.3})$$

Dabei ist:

ϕ_f der Gesamtkonfigurationsfaktor des Bauteils für die Wärmestrahlung aus der Öffnung

ε_f der Emissionswert der Öffnung

a_z der Absorbtionswert der Flammen

T_f die Temperatur des Brandes [K] nach Anhang C von ENV 1991-2-2.

(6) Der Emissionswert ε_f einer Öffnung sollte als Einheitswert angenommen werden, siehe Anhang C von ENV 1991-2-2.

(7) Der Absorbtionswert a_z der Flammen sollte nach dem entsprechenden Abschnitt C.2 bis C.5 ermittelt werden.

C.1.4 Gesamtkonfigurationsfaktoren

(1) Der Gesamtkonfigurationsfaktor ϕ_f zur Berechnung der Wärmeübertragung durch Strahlung aus einer Öffnung sollte wie folgt berechnet werden:

$$\phi_f = \frac{(C_1 \phi_{f,1} + C_2 \phi_{f,2}) d_1 + (C_3 \phi_{f,3} + C_4 \phi_{f,4}) d_2}{(C_1 + C_2) d_1 + (C_3 + C_4) d_2} \quad (\text{C.4})$$

Dabei ist:

$\phi_{f,i}$ der Konfigurationsfaktor einer Bauteilseite i zu dieser Öffnung, siehe Anhang D

d_i die Abmessung der Bauteilseite i ;

C_i der Schutzbeiwert der Bauteilseite i , definiert, wie folgt:

- für eine geschützte Seite: $C_i = 0$

- für eine ungeschützte Seite: $C_i = 1$

(2) Der Konfigurationsfaktor $\phi_{f,i}$ einer von der Öffnung nicht sichtbaren Bauteilseite sollte zu Null gesetzt werden.

(3) Der Gesamtkonfigurationsfaktor ϕ_z für die Berechnung der Wärmestrahlung einer Flamme sollte wie folgt berechnet werden:

$$\phi_z = \frac{(C_1 \phi_{z,1} + C_2 \phi_{z,2}) d_1 + (C_3 \phi_{z,3} + C_4 \phi_{z,4}) d_2}{(C_1 + C_2) d_1 + (C_3 + C_4) d_2} \quad (\text{C.5})$$

Dabei ist:

$\phi_{z,i}$ der Konfigurationsfaktor der Bauteilseite für diese Flamme, siehe Anhang D

(4) Die Konfigurationsfaktoren für die Wärmestrahlung der Flammen der einzelnen Bauteilseiten $\phi_{z,i}$ dürfen mit Hilfe von äquivalenten rechteckigen Flammenabmessungen berechnet werden. Die Abmessungen und Lagen der Rechtecke, die die Vorderfläche und Seitenflächen der Flammen darstellen, sollten für Stützen nach C.2 und für Träger nach C.3 berechnet werden.

(5) Der Konfigurationsfaktor $\phi_{z,i}$ einer Bauteilfläche, von der aus die Flamme nicht sichtbar ist sollte Null sein.

(6) Eine Bauteilseite darf nach 4.2.5.2 durch einen Wärmeschild geschützt sein. Eine Bauteilseite, die direkt an der Wand des Brandabschnitts befestigt ist darf als geschützt betrachtet werden, wenn sich in diesem Teil der Wand keine Öffnungen befinden. Alle anderen Bauteilseiten sollten als ungeschützt betrachtet werden.

C.2 Nicht direkt beflamnte Stützen

C.2.1 Wärmeübertragung durch Strahlung

(1) Es sollte zwischen Stützen, die vor einer Öffnung stehen, und Stützen, die zwischen Öffnungen stehen, unterschieden werden. (siehe Bild C.2)

(2) Wenn eine Stütze vor einer Öffnung steht (siehe Bild C.3), dann sollte der Wärmestrom durch Strahlung I_z wie folgt berechnet werden:

$$I_z = \phi_z \varepsilon_z \sigma T_z^4 \quad (\text{C.6})$$

Dabei ist:

ϕ_z der Gesamtkonfigurationsfaktor für Wärmestrahlung der Flamme nach C.1.4;

ε_z der Emissionswert der Flamme, siehe C.2.2;

T_z die Temperatur der Flamme [K] nach C.2.3.

(3) Für Stützen zwischen Öffnungen, siehe Bild C.4, sollte der Wärmestrom durch Wärmestrahlung der Flamme von jeder Seite berechnet mit:

$$I_z = (\phi_{z,m} \epsilon_{z,m} + \phi_{z,n} \epsilon_{z,n}) \sigma T_z^4 \quad (C.7)$$

Dabei ist:

$\phi_{z,m}$ der Gesamtkonfigurationsfaktor der Stütze für die Wärmestrahlung der Flammen auf Seite m , Siehe C.1.4 ;

$\phi_{z,n}$ der Gesamtkonfigurationsfaktor der Stütze für die Wärmestrahlung der Flammen auf Seite n , Siehe C.1.4 ;

$\epsilon_{z,m}$ der Gesamtemissionswert der Flammen auf Seite m , see C.2.2;

$\epsilon_{z,n}$ der Gesamtemissionswert der Flammen auf Seite n , see C.2.2.

C.2.2 Emissionswert der Flamme

(1) Wenn die Stütze vor einer Öffnung steht sollte der Emissionswert ϵ_z der Flamme mit der in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegebenen Gleichung für ϵ mit der Flammendicke λ an der Oberkante der Öffnung ermittelt werden. Wenn keine oberliegenden Balkone oder Markisen vorhanden sind, darf λ wie folgt berechnet werden:

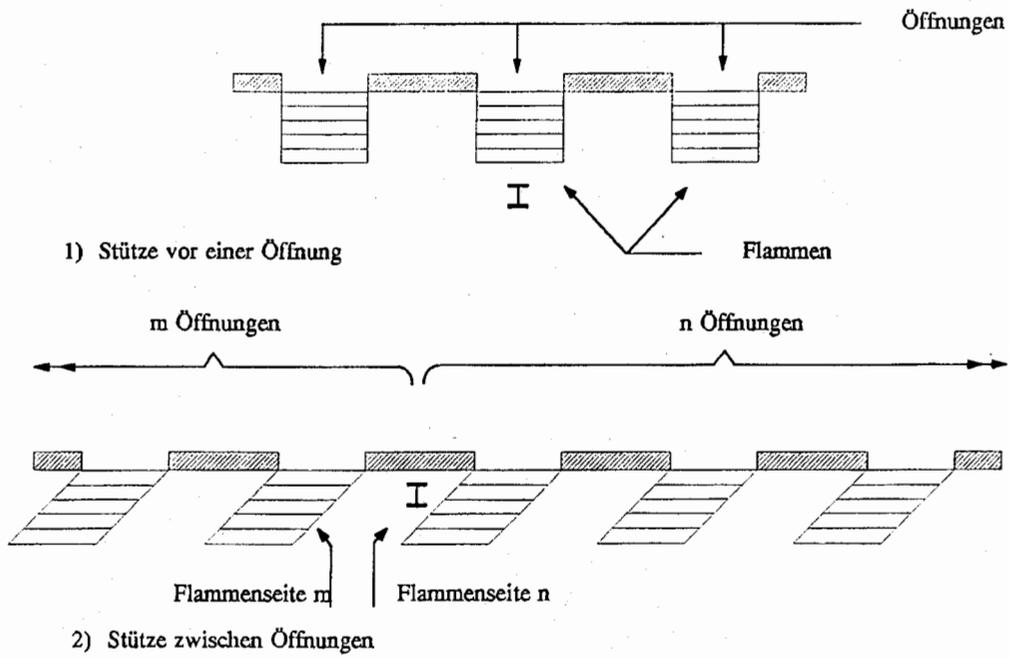
- "ohne Zwangsbe- und Entlüftung":

$$\lambda = 2h/3 \quad (C.8a)$$

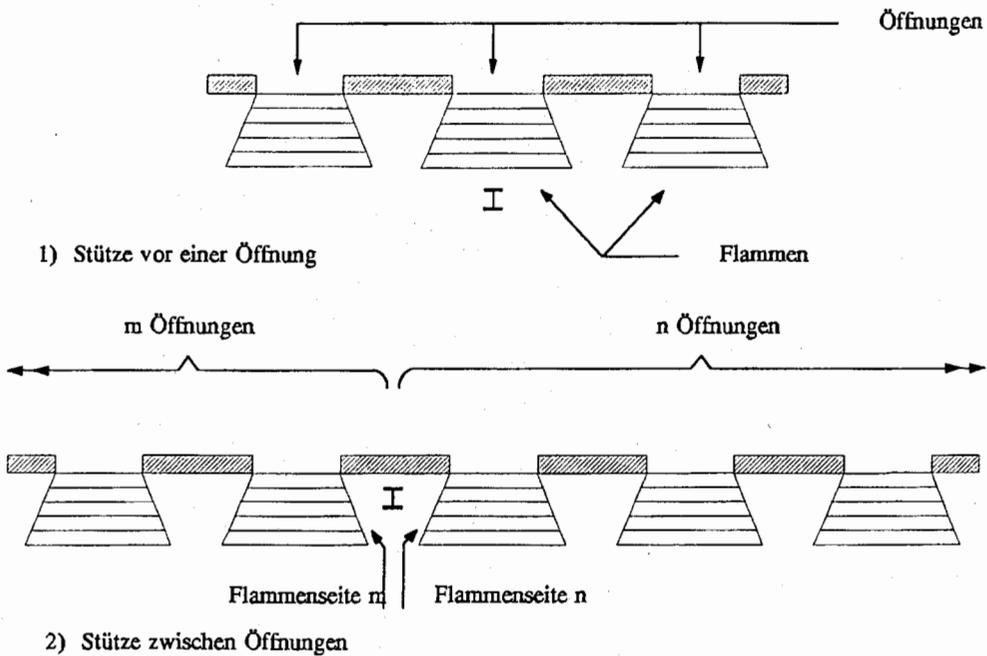
- "mit Zwangsbe- und Entlüftung":

$$\lambda = x \quad \text{jedoch} \quad \lambda \leq hx/z \quad (C.8b)$$

Dabei sind h , x und z wie in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegeben.

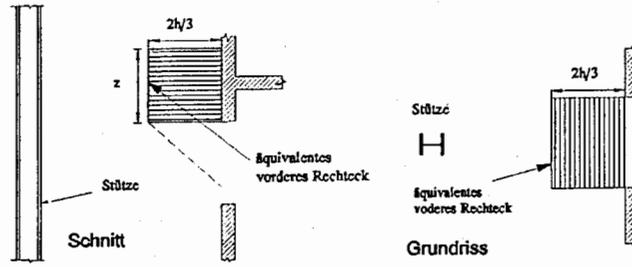


a) "ohne Zwangsbe- und Entlüftung"

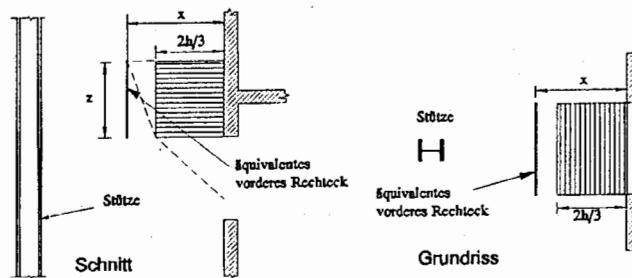


b) "mit Zwangsbe- und Entlüftung"

Bild C.2: Stützenpositionen

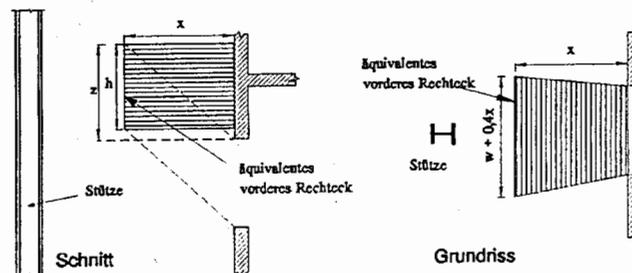


1) mit Wand darüber und $h < 1,25w$



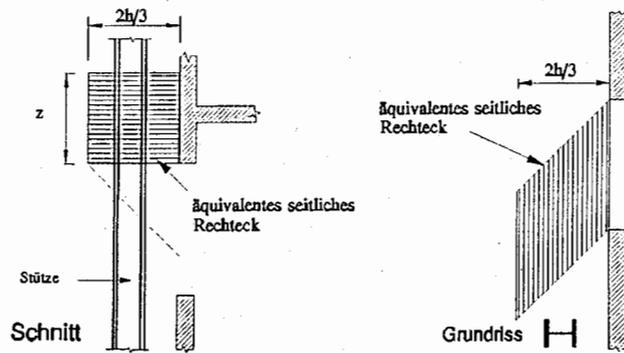
2) mit Wand darüber und $h > 1,25w$ oder keine Wand darüber

a) "ohne Zwangsbe- und Entlüftung"

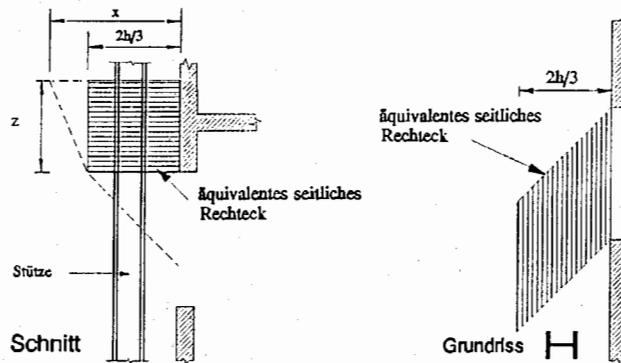


b) "mit Zwangsbe- und Entlüftung"

Bild C.3: Stütze vor Öffnung

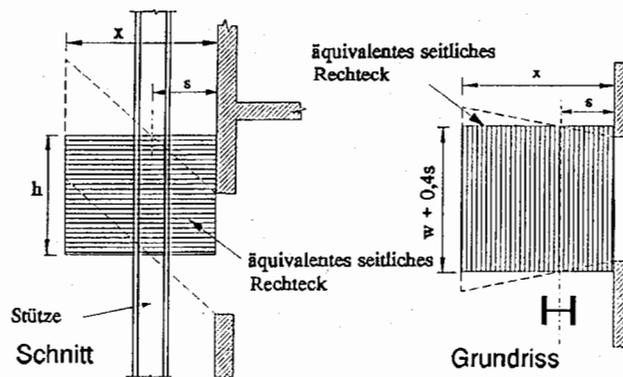


1) Wand darüber und $h < 1,25w$



2) Wand darüber und $h > 1,25w$ oder keine Wand darüber

a) "ohne Zwangsbe- und Entlüftung"



b) "mit Zwangsbe- und Entlüftung"

Bild C.4: Stütze zwischen Öffnungen

(2) Wenn die Stütze zwischen zwei Öffnungen steht, sollten die Emissionswerte $\varepsilon_{z,m}$ und $\varepsilon_{z,n}$ der Flammen auf den Seiten m und n mit Gleichung für ε nach Anhang C von ENV 1991-2-2 bestimmte werden. Die dabei zu verwendende Flammendicke λ ergibt sich zu:

$$\text{- für Seite } m: \quad \lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (\text{C.9a})$$

$$\text{- für Seite } n: \quad \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{C.9b})$$

Dabei ist:

m die Zahl der Öffnungen auf Seite m ;

n die Zahl der Öffnungen auf Seite n ;

λ_i die Flammendicke für Öffnung i .

(3) Die Flammendicke λ_i sollte wie folgt angenommen werden:

$$\text{- für den Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung":} \\ \lambda_i = w_i \quad (\text{C.10a})$$

$$\text{- für den Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung":} \\ \lambda_i = w_i + 0,4s \quad (\text{C.10b})$$

Dabei ist:

w_i die Breite der Öffnung

s die horizontale Entfernung der Stützenachse von der Wand des Brandabschnitts, siehe Bild C.1

C.2.3 Flammentemperatur

(1) Die Flammentemperatur T_z sollte mit der in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegebenen Gleichung für T_z im Abstand ℓ von der Öffnung ermittelt werden. Die Länge wird entlang der Flammenachse gemessen und ergibt sich wie folgt:

$$\text{- für den Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung":} \\ \ell = h/2 \quad (\text{C.11a})$$

- für den Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung":

$$\text{- für eine Stütze vor einer Öffnung:} \\ \ell = 0 \quad (\text{C.11b})$$

- bei einer Stütze zwischen Öffnungen ist die Länge ℓ entlang der Flammenachse zu einem Punkt, der im horizontalen Abstand s von der Wand des Brandabschnitts entfernt liegt. Wenn sich keine Markise oder oder Balkon über der Öffnung befindet, ergibt sich ℓ zu:

$$\ell = sX/x \quad (\text{C.11c})$$

Dabei sind X und x wie in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegeben.

C.2.4 Absorbtionswert der Flamme

(1) Im Falle "ohne Zwangsbe- und Entlüftung" sollte der Absorbtionswert der Flamme a_z zu Null angenommen werden.

(2) Im Falle "mit Zwangsbe- und Entlüftung" sollte der Absorbtionswert der Flamme a_z die gleiche Größe haben wie der Emissionswert ε_z der maßgebenden Flamme, siehe C.2.2 .

C.3 Nicht direkt beflamnte Träger

C.3.1 Wärmeübertragung durch Strahlung

(1) Abschnitt C.3 gilt unter der Annahme, daß die Unterseite des Trägers über der Oberkante der Öffnung des Brandabschnitts liegt.

(2) Es sollte eine Unterscheidung zwischen Trägern, die parallel zu der äußeren Wand des Brandabschnitts liegen und Trägern, die senkrecht dazu sind, gemacht werden. (siehe Bild C.5)

(3) Wenn der Träger parallel zu der Außenwand des Brandabschnitts liegt, sollte die Temperatur des Stahlbauteils T_m an einem Punkt in dem Trägerbereich direkt über Öffnung ermittelt werden. In diesem Fall wird der Wärmestrom durch Strahlung I_z wie folgt ermittelt:

$$I_z = \phi_z \varepsilon_z \sigma T_z^4 \quad (C.12)$$

Dabei ist:

ϕ_z der Gesamtkonfigurationsfaktor der direkt vor dem Träger befindlichen Flammen, siehe C.1.4

ε_z der Emissionwert der Flamme, siehe C.3.2

T_z die Temperatur der Flamme nach C.3.3 [K].

(4) Steht der Träger senkrecht auf die Außenwand des Brandabschnittes, dann sollten die Temperaturen an einer Reihe von 100 mm weit auseinanderliegenden Punkten entlang des Trägers bestimmt werden. Als Bauteiltemperatur T_m sollte die größte der ermittelten Temperaturen angenommen werden. In diesem Fall wird der Wärmestrom durch Strahlung I_z wie folgt ermittelt:

$$I_z = (\phi_{z,m} \varepsilon_{z,m} + \phi_{z,n} \varepsilon_{z,n}) \sigma T_z^4 \quad (C.13)$$

Dabei ist:

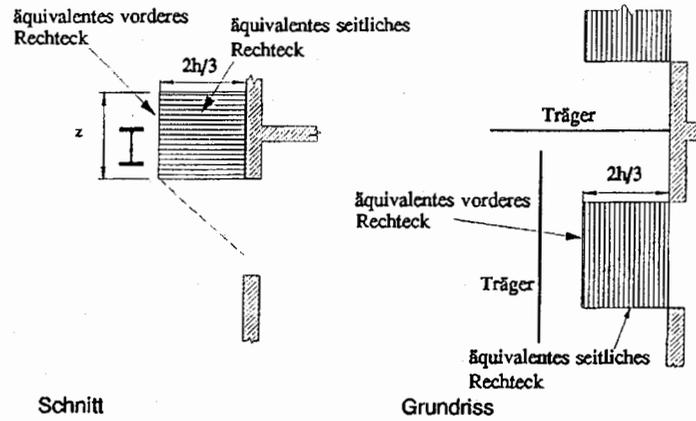
$\phi_{z,m}$ der Gesamtkonfigurationsfaktor für Flammen auf Seite m , siehe C.3.2;

$\phi_{z,n}$ der Gesamtkonfigurationsfaktor für Flammen auf Seite n , siehe C.3.2;

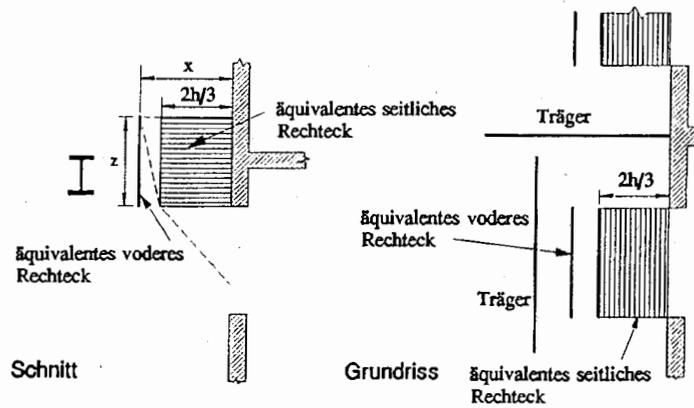
$\varepsilon_{z,m}$ der Gesamtemissionswert von Flammen auf Seite m , siehe C.3.3;

$\varepsilon_{z,n}$ der Gesamtemissionswert von Flammen auf Seite n , siehe C.3.3;

T_z die Flammentemperatur [K], siehe C.3.4.

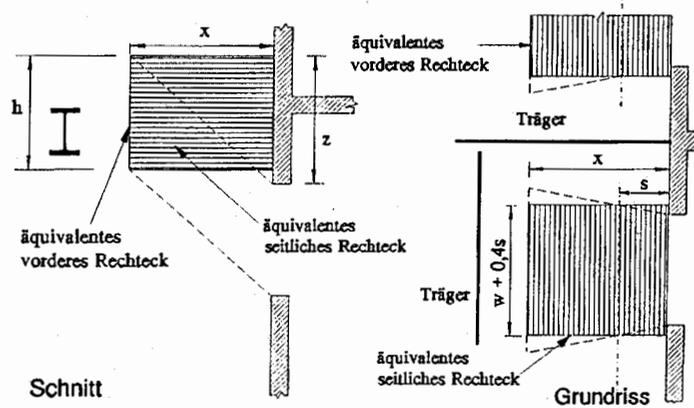


1) Wand darüber und $h < 1,25w$



2) Wand darüber und $h > 1,25w$ oder keine Wand drüber

a) Fall: "ohne Zwangsbe- und Entlüftung"



b) Fall: "mit Zwangsbe- und Entlüftung"

Bild C.5: nicht direkt beflamelter Träger

C.3.2 Emissionwert der Flamme

(1) Wenn der Träger parallel zu der Außenwand des Brandabschnitts liegt und sich oberhalb einer Öffnung befindet, sollte der Emissionswert ϵ_z der Flamme mit der in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegebenen Gleichung für ϵ mit der Flammendicke λ an der Oberkante der Öffnung ermittelt werden. Wenn keine oberliegenden Balkone oder Markisen vorhanden sind, darf λ wie folgt berechnet werden:

- im Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung":

$$\lambda = 2h/3 \quad (\text{C.14a})$$

- im Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung":

$$\lambda = x \quad \text{jedoch} \quad \lambda \leq hx/z \quad (\text{C.14b})$$

Dabei sind h , x und z wie in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegeben.

(2) Wenn der Träger senkrecht auf die Außenwand des steht und sich zwischen zwei Öffnung befindet, dann sollten die Gesamtemissionswerte $\epsilon_{z,m}$ und $\epsilon_{z,n}$ der Flammen auf den Seiten m und n mit der Gleichung für ϵ nach Anhang C von ENV 1991-2-2 bestimmt werden. Die dabei zu verwendende Flammendicke λ ergibt sich zu:

$$\text{- für Seite } m: \quad \lambda = \sum_{i=1}^m \lambda_i \quad (\text{C.15a})$$

$$\text{- für Seite } n: \quad \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{C.15b})$$

Dabei ist:

- m die Zahl der Öffnungen auf Seite m ;
- n die Zahl der Öffnungen auf Seite n ;
- λ_i die Flammendicke für Öffnung i .

(3) Die Flammendicke λ_i sollte wie folgt angenommen werden:

- für den Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung":

$$\lambda_i = w_i \quad (\text{C.16a})$$

- für den Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung":

$$\lambda_i = w_i + 0,4s \quad (\text{C.16b})$$

Dabei ist:

w_i die Breite der Öffnung

s die horizontale Entfernung der Stützenachse von der Wand des Brandabschnitts, siehe Bild C.1

C.3.3 Flammentemperatur

(1) Die Flammentemperatur T_z sollte mit der in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegebenen Gleichung für T_z im Abstand l von der Öffnung ermittelt werden. Die Länge wird entlang der Flammenachse gemessen und ergibt sich wie folgt:

- für den Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung":

$$l = h/2 \quad (\text{C.17a})$$

- für den Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung":

- für Träger parallel zur Außenwand des Brandabschnitts und oberhalb einer Öffnung:

$$l = 0 \quad (\text{C.17b})$$

- für Träger senkrecht zur Außenwand des Brandabschnitts und zwischen Öffnungen ist l die Länge entlang der Flammenachse zu einem Punkt, der im horizontalen Abstand s von der Wand des Brandabschnitts entfernt liegt. Wenn sich keine Markise oder Balkon über der Öffnung befindet, ergibt sich l zu:

$$l = sX/x \quad (\text{C.17c})$$

Dabei sind X und x wie in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegeben.

C.3.4 Absorbtionswert der Flamme

(1) Im Falle "ohne Zwangsbe- und Entlüftung" sollte der Absorbtionswert der Flamme a_z zu Null angenommen werden.

(2) Im Falle "mit Zwangsbe- und Entlüftung" sollte der Absorbtionswert der Flamme a_z die gleiche Größe haben wie der Emissionswert ϵ_z der maßgebenden Flamme, siehe C.3.2.

C.4 Direkt beflamte Stützen

(1) Der Wärmestrom I_z infolge der Wärmestrahlung der Flammen sollte berechnet werden mit:

$$I_z = \frac{(I_{z,1} + I_{z,2})d_1 + (I_{z,3} + I_{z,4})d_2}{2(d_1 + d_2)} \quad (\text{C.18})$$

mit:

$$\begin{aligned} I_{z,1} &= C_1 \epsilon_{z,1} \sigma T_z^4 \\ I_{z,2} &= C_2 \epsilon_{z,2} \sigma T_z^4 \\ I_{z,3} &= C_3 \epsilon_{z,3} \sigma T_0^4 \\ I_{z,4} &= C_4 \epsilon_{z,4} \sigma T_z^4 \end{aligned}$$

Dabei ist:

$I_{z,i}$ der Wärmestrom durch Strahlung von der Flamme zu der Stützenseite i

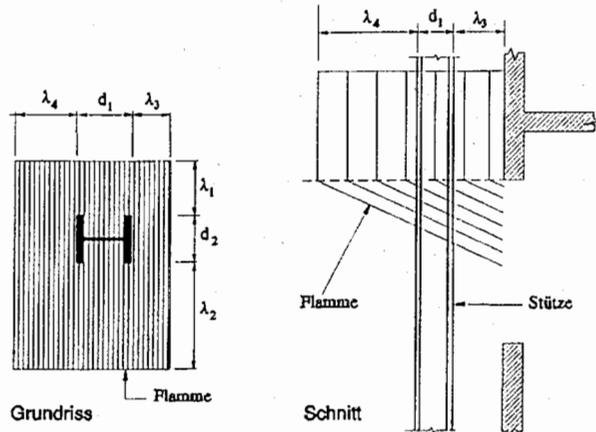
$\epsilon_{z,i}$ der Emissionswert von Flammen bezüglich der Stützenseite i

i die Bezeichnung der Stützenseite (1), (2), (3) oder (4)

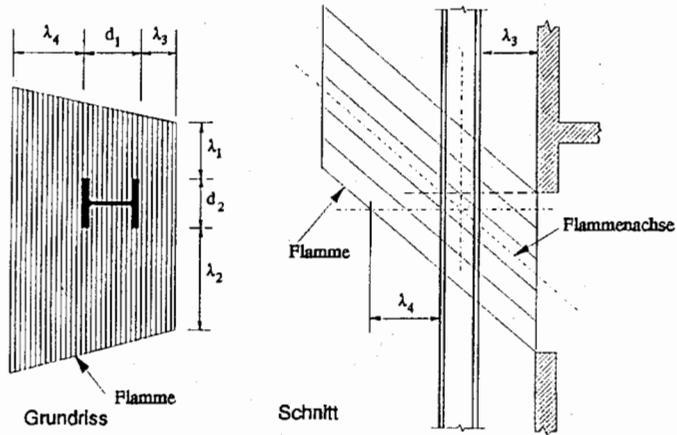
C_i Schutzbeiwert der Bauteilseite i , siehe C.1.4

T_z die Flammentemperatur [K];

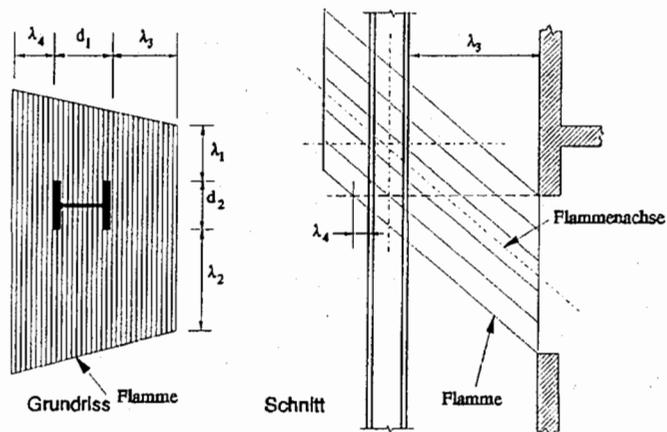
T_0 die Flammentemperatur an der Öffnung [K] nach Anhang C von ENV 1991-2-2.



a) Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung"



1) Flammenachse schneidet Stützenachse unter Öffnungsoberkante



2) Flammenachse schneidet Stützenachse über Öffnungsoberkante

b) Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung"

Bild C.6: direkt beflamte Stütze

(2) Der Emissionswert der Flammen $\varepsilon_{z,i}$; jeder Stützensseite 1, 2, 3 und 4 sollte mit der Gleichung für ε , die Anhang C von ENV 1991-2-2 angegeben ist, bestimmt werden. Die Flammendicke λ sollte entsprechend der in Bild C.6 für die jeweilige Stützensseite i angegebene Flammendicke λ_i angenommen werden.

(3) Im Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung" sollten die Flammendicken λ_i an der Oberkante der Öffnung ermittelt werden, siehe Bild C.6(a).

(4) Im Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung" ist zu unterscheiden, ob der Schnittpunkt von Flammenachse unter oder über der Oberkante der Öffnung liegt. Liegt er unterhalb der Öffnungsoberkante, dann ist die Flammendicke in Höhe des Schnittpunktes anzunehmen (siehe Bild C.6(b)(1)). Liegt der Schnittpunkt oberhalb der Öffnung, dann werden die Flammendicken λ_i in Höhe der Öffnungsoberkante bestimmt (siehe Bild C.6(b)(2)). Ist in diesem Fall die Flammendicke $\lambda_4 < 0$, dann sind die Flammendicken in der Höhe zu ermitteln, in der $\lambda_4 = 0$ ist.

(5) Die Flammentemperatur T_z sollte mit der in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegebenen Gleichung für T_z im Abstand l von der Öffnung ermittelt werden. Die Länge wird entlang der Flammenachse gemessen und ergibt sich wie folgt:

- für den Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung":

$$l = h/2 \quad (C.19a)$$

- für den Fall "mit Zwangsbe- und Entlüftung" ist l die Strecke auf der Flammenachse zu der Höhe, in der λ_i bestimmt wird. Unter der Voraussetzung, daß sich kein Balkon oder Markise oberhalb der Öffnung befindet, gilt:

$$l = (\lambda_3 + 0,5 d_1) X/x \quad \text{jedoch} \quad l \leq 0,5 hX/z \quad (C.19b)$$

Dabei sind h , X , x und z wie in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegeben.

(6) Der Absorptionswert der Flammen a_z sollte wie folgt berechnet werden:

$$a_z = \frac{\varepsilon_{z,1} + \varepsilon_{z,2} + \varepsilon_{z,3}}{3} \quad (C.20)$$

Dabei sind $\varepsilon_{z,1}$, $\varepsilon_{z,2}$ und $\varepsilon_{z,3}$ die Emissionswerte der Stützensseiten 1, 2 und 3.

C.5 Voll oder teilweise beflammete Träger

C.5.1 Wärmeübertragung durch Strahlung

C.5.1.1 Allgemeines

(1) Für den gesamten Abschnitt C.5 gilt die Annahme, daß die Unterkante des Trägers nicht unter der Oberkante der Öffnung liegt.

(2) Es sollte eine Unterscheidung zwischen Trägern, die parallel zu der Außenwand des Brandabschnitts liegen, und solchen, die senkrecht dazu stehen, gemacht werden (siehe Bild C.7).

(3) Wenn der Träger parallel zu der Außenwand des Brandabschnitts liegt, sollte die Temperatur des Stahlbauteils T_m an einem Punkt im Trägerbereich direkt über der Öffnung ermittelt werden.

(4) Steht der Träger senkrecht auf die Außenwand des Brandabschnitts, dann sollten die Temperaturen an einer Reihe von 100mm auseinanderliegenden Punkten entlang des Trägers bestimmt werden. Als Bauteiltemperatur T_m sollte die größte der ermittelten Temperaturen angenommen werden.

(5) Der Wärmestrom I_z infolge der Wärmestrahlung der Flamme sollte berechnet werden mit:

$$I_z = \frac{(I_{z1} + I_{z2}) d_1 + (I_{z3} + I_{z4}) d_2}{2 (d_1 + d_2)} \quad (\text{C.21})$$

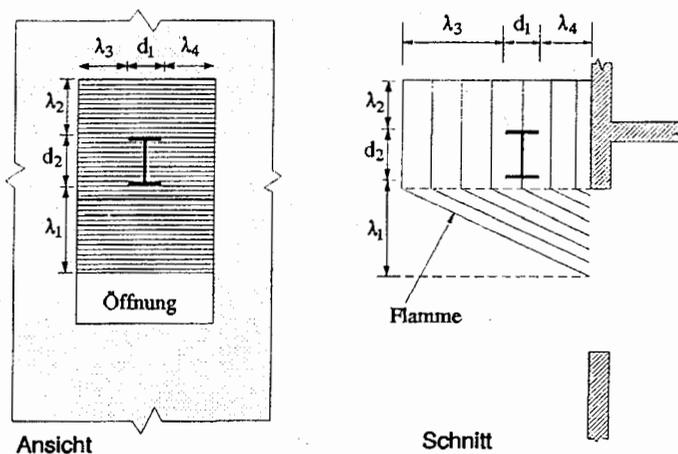
Dabei ist:

$I_{z,i}$ der Wärmestrom durch Strahlung von der Flamme zu der Trägerseite i

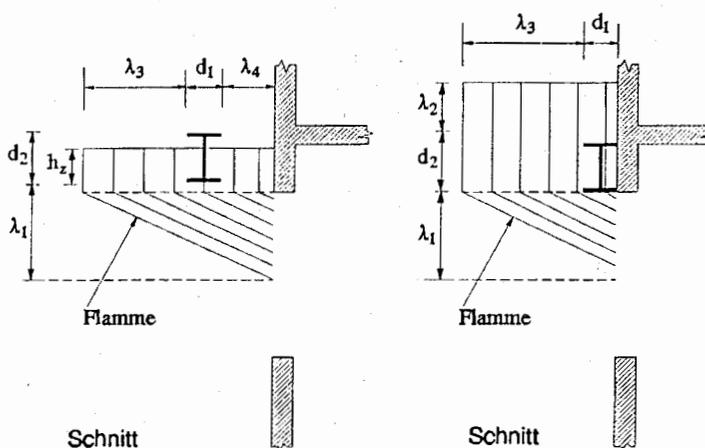
i die Bezeichnung der Stützenseite (1), (2), (3) oder (4)

C.5.1.2 Fall ohne Zwangsbe- und Entlüftung

(1) Im Fall "ohne Zwangsbe- und Entlüftung" sollte eine Unterscheidung zwischen den Fällen gemacht werden, in denen die Oberseite der Flamme über der Trägeroberkante liegt und denen, in denen sie darunter liegt. (siehe Bild C.7(a)(3) und (4)).

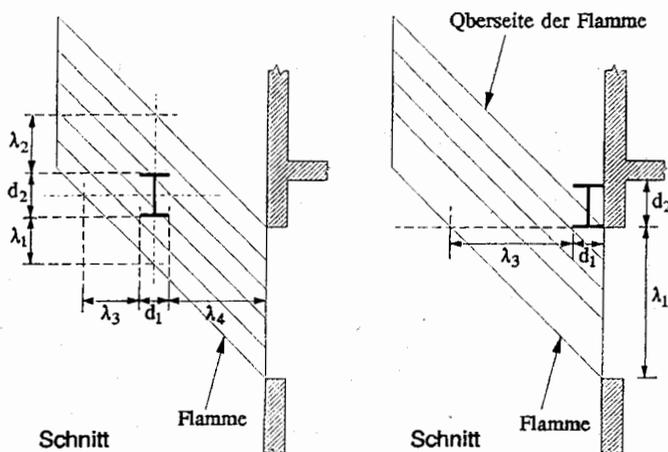


1) Träger senkrecht auf die Wand 2) Träger parallel zur Wand



3) Oberseite der Flamme über Trägeroberkante 4) an Wand anliegender Träger

a) ohne Zwangsbe- und Entlüftung



1) Träger ohne Wandkontakt
b) mit Zwangsbe- und Entlüftung

2) an Wand anliegender Träger

Bild C.7: beflamelter Träger

(2) Falls die Flammenoberseite über der Trägeroberkante liegt, gilt:

$$I_{z,1} = C_1 \epsilon_{z,1} \sigma T_0^4 \quad (\text{C.22a})$$

$$I_{z,2} = C_2 \epsilon_{z,2} \sigma T_{z,2}^4 \quad (\text{C.22b})$$

$$I_{z,3} = C_3 \epsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4) / 2 \quad (\text{C.22c})$$

$$I_{z,4} = C_4 \epsilon_{z,4} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4) / 2 \quad (\text{C.22d})$$

Dabei ist:

$\epsilon_{z,i}$ der Emissionswert von Flammen bezwüglich der Trägerseite i

T_0 die Temperatur an der Öffnung [K] nach Anhang C von ENV 1991-2-2;

$T_{z,1}$ die Flammentemperatur [K] nach Anhang C von ENV 1991-2-2, in Höhe der Trägerunterkante

$T_{z,2}$ die Flammentemperatur [K] nach Anhang C von ENV 1991-2-2, in Höhe der Trägeroberkante

(3) Falls ein Träger parallel zu der Außenwand des Brandabschnittes verläuft und an dieser Wand anliegt, darf C_4 zu Null angenommen werden. (siehe Bild C.7)

(4) Falls die Oberseite der Flamme unter der Oberkante des Trägers liegt, gilt:

$$I_{z,1} = C_1 \epsilon_{z,1} \sigma T_0^4 \quad (\text{C.23a})$$

$$I_{z,2} = 0 \quad (\text{C.23b})$$

$$I_{z,3} = (h_z / d_2) C_3 \epsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_x^4) / 2 \quad (\text{C.23c})$$

$$I_{z,4} = (h_z / d_2) C_4 \epsilon_{z,4} \sigma (T_{z,1}^4 + T_x^4) / 2 \quad (\text{C.23d})$$

Dabei ist:

T_x die Temperatur an der Flammenoberseite [813 K];

h_z der Höhe der Flammenoberseite über der Trägerunterkante

C.5.1.3 Mit Zwangsbe- und Entlüftung

(1) Im Falle "mit Zwangsbe- und Entlüftung" muß bei parallel zur Außenwand des Brandabschnittes verlaufenden Träger zwischen an der Wand anliegenden Trägern und nicht anliegenden Trägern unterschieden werden. (siehe Bild C.7)

(2) Für nicht an der Wand anliegende oder senkrecht darauf stehende Träger gilt:

$$I_{z,1} = C_1 \epsilon_{z,1} \sigma T_0^4 \quad (\text{C.24a})$$

$$I_{z,2} = C_2 \epsilon_{z,2} \sigma T_{z,2}^4 \quad (\text{C.24b})$$

$$I_{z,3} = C_3 \epsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4) / 2 \quad (\text{C.24c})$$

$$I_{z,4} = C_4 \epsilon_{z,4} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4) / 2 \quad (\text{C.24d})$$

(3) Wenn der Träger direkt an der Wand anliegt, sollte nur von der Trägerunterseite angenommen werden, daß sie direkt den Flammen ausgesetzt ist. Seitenfläche und die Oberseite des Trägers werden dann lediglich durch die Wärmestrahlung der Flammenoberseite betroffen (siehe Bild C.7(b)(2)). Deshalb gilt:

$$I_{z,1} = C_1 \varepsilon_{z,1} \sigma T_o^4 \quad (\text{C.25a})$$

$$I_{z,2} = \phi_{z,2} C_2 \varepsilon_{z,2} \sigma T_{z,2}^4 \quad (\text{C.25b})$$

$$I_{z,3} = \phi_{z,3} C_3 \varepsilon_{z,3} \sigma (T_{z,1}^4 + T_{z,2}^4) / 2 \quad (\text{C.25c})$$

$$I_{z,4} = 0 \quad (\text{C.25d})$$

Dabei ist $\phi_{z,i}$ der Konfigurationsfaktor der Flammenoberseite bezüglich der Seite i des Trägers nach Anhang D.

C.5.2 Emission der Flamme

(1) Der Emissionswert der Flamme ε_{zi} für jede Seite i des Trägers sollte mit der in Anhang C von ENV 1991-2-2 angegebenen Gleichung für ε ermittelt werden. Dabei sollte für die Flammendicke λ die jeweilige Abmessung λ_i nach Bild C.7 eingesetzt werden.

C.5.3 Absorbtion der Flamme

(1) Der Absorbtionswert der Flamme a_z sollte berechnet werden mit:

$$a_z = 1 - e^{-0,3h} \quad (\text{C.26})$$

Anhang D (informativ)
Konfigurationsfaktor

(1) Der Konfigurationsfaktor ϕ wird in 1.4.1 definiert. Er beschreibt das Verhältnis der insgesamt von einer Oberfläche abgegebenen Strahlung zu der Strahlung, die die empfangende Oberfläche erreicht. Die Größe des Konfigurationsfaktors hängt von der Größe der strahlenden Fläche, ihrer Entfernung von der empfangenden Fläche und der Orientierung der beiden Flächen zueinander ab.

(2) Dieser Anhang gilt unter der Annahme, daß alle strahlenden Flächen rechteckig sind. Die strahlenden Flächen sind die Fenster und andere Öffnungen in der Wand des Brandabschnitts sowie die äquivalenten rechteckigen Oberflächen der Flammen, siehe C.1.4 .

(3) Für die Bestimmung des Konfigurationsfaktors sollte um den Querschnitt des empfangenden Bauteils, wie in Bild D.1 dargestellt, ein einhüllendes Rechteck gezogen werden. Die Größe von ϕ sollte dann an den Mittelpunkten P der Rechteckseiten bestimmt werden.

(4) Der Konfigurationsfaktor einer empfangenden Fläche ergibt sich aus der Summe der Anteile jedes einzelnen Bereichs der strahlenden Fläche (i.d.R. 4), die von Punkt P der empfangenden Fläche aus sichtbar ist (siehe Bild D.2 und D.3). Die Bereiche der strahlenden Fläche sollten auf einen Punkt X bezogen beschrieben werden. X ist der Punkt, an dem die horizontale und senkrecht auf die empfangende Fläche stehende Gerade die Ebene trifft, in der die strahlende Fläche liegt.

(5) Wenn der Punkt X außerhalb der strahlenden Fläche liegt, dann sollte der Konfigurationsfaktor durch Subtraktion der Faktoren für die Flächen von X bis zum näher gelegenen Rand der strahlenden Flächen von den Faktoren für die Flächen von X zum entfernteren Rand der strahlenden Fläche bestimmt werden.

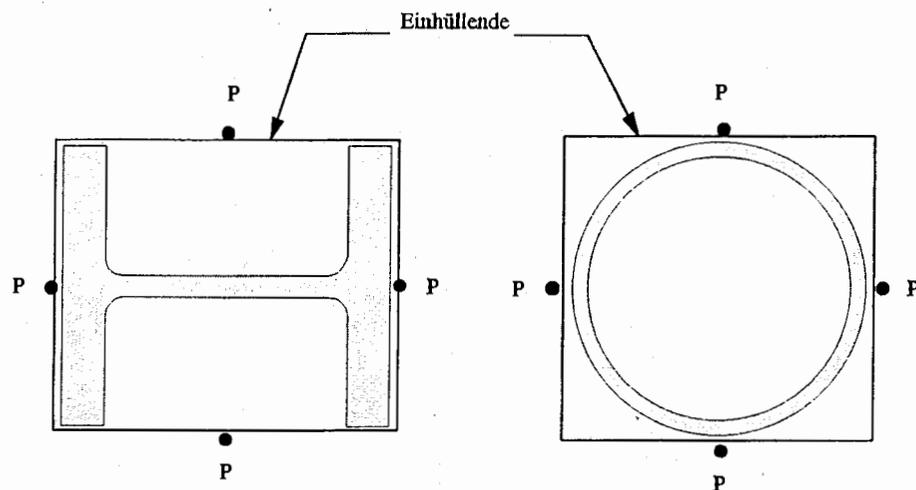


Bild D.1: Einhüllende der empfangenden Oberfläche

(6) Der Anteil jeder Zone sollte wie folgt berechnet werden:

a) empfangende Fläche ist parallel zur strahlenden Fläche:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{a}{(1+a^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{b}{(1+a^2)^{0,5}} \right) + \frac{b}{(1+b^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right) \right] \quad (\text{D.1})$$

mit:

$$a = h/s$$

$$b = w/s$$

Dabei ist:

s die Entfernung von P nach X

h die Höhe des Bereichs in der strahlenden Fläche

w die Breite dieses Bereichs

b) empfangende Fläche steht senkrecht auf die strahlenden Fläche:

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1}(a) - \frac{1}{(1+b^2)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{(1+b^2)^{0,5}} \right) \right] \quad (\text{D.2})$$

c) Die strahlende und empfangende Fläche schließen in der Ebene den Winkel θ ein:

$$\begin{aligned} \phi = & \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1}(a) - \frac{(1-b\cos\theta)}{(1+b^2-2b\cos\theta)^{0,5}} \tan^{-1} \left(\frac{a}{(1+b^2-2b\cos\theta)^{0,5}} \right) \right. \\ & \left. + \frac{a\cos\theta}{(a^2+\sin^2\theta)^{0,5}} \left[\tan^{-1} \left(\frac{(b-\cos\theta)}{(a^2+\sin^2\theta)^{0,5}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{\cos\theta}{(a^2+\sin^2\theta)^{0,5}} \right) \right] \right] \quad (\text{D.3}) \end{aligned}$$

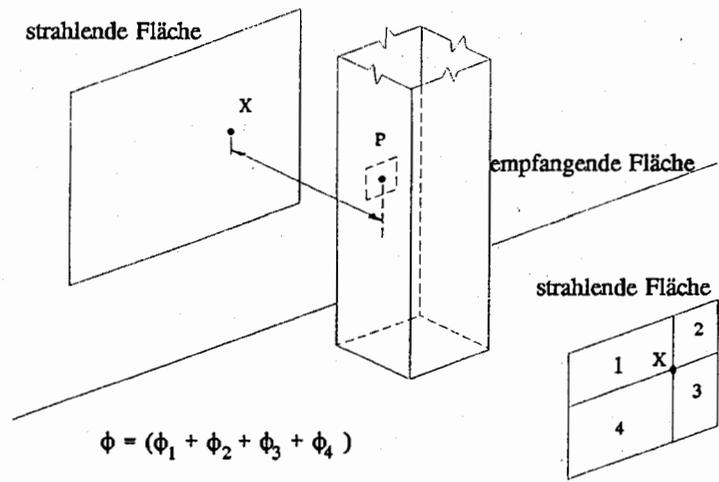


Bild D.2:

empfangende Fläche und strahlende Fläche sind parallel

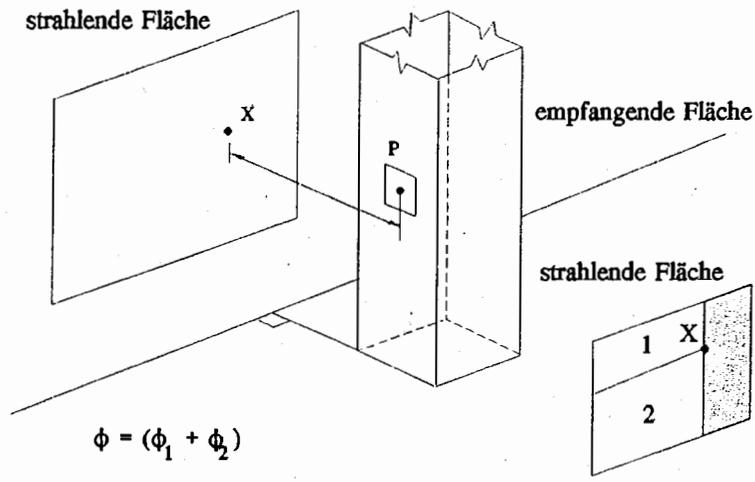


Bild D.3:

strahlende Fläche und empfangende Fläche stehen senkrecht aufeinander

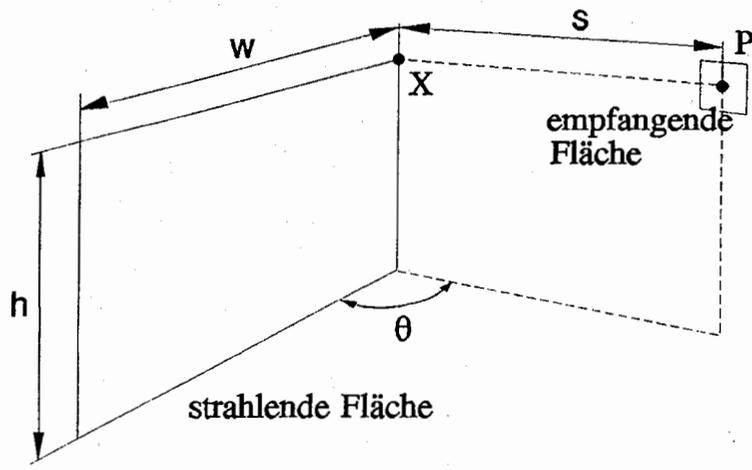


Bild D.4:

strahlende Fläche und empfangende Fläche schließen den Winkel θ ein